

# 卒業研究

論文名    ロボットの屋内外における  
             自律移動に関する研究

---

指導教員名	伊藤 恒平
提出年月日	平成24年2月10日
提出者	機械工学科
氏名	岡部 真也
	中嶋 将
	林 誠司

金 沢 工 業 高 等 専 門 学 校

## 論文目次

### 第 1 章 序 論

1 . 1	研 究 の 背 景	..... 1
1 . 2	研 究 の 内 容	..... 1
1 . 3	論 文 の 構 成	..... 2

### 第 2 章 つくばチャレンジ 2 0 1 1

2 . 1	つくばチャレンジ概要	..... 3
2 . 2	つくばチャレンジ 5 年間の歴史	..... 4
2 . 2 . 1	つくばチャレンジ 2 0 0 7	..... 4
2 . 2 . 2	つくばチャレンジ 2 0 0 8	..... 5
2 . 2 . 3	つくばチャレンジ 2 0 0 9	..... 7
2 . 2 . 4	つくばチャレンジ 2 0 1 0	..... 8
2 . 2 . 5	つくばチャレンジ 2 0 1 1	..... 1 0
2 . 3	つくばチャレンジの課題	..... 1 0
2 . 4	つくばチャレンジのコース	..... 1 1

### 第 3 章 ロボットのシステム

3 . 1	システム構成	..... 1 2
3 . 2	搭載センサ	..... 1 2
3 . 3	機体の仕様	..... 1 5

## 第 4 章 自己位置推定

4 . 1	座 標 系	..... 1 6
4 . 2	自 己 位 置 推 定 方 法	..... 1 7
4 . 2 . 1	G P S 測 位	..... 1 7
4 . 2 . 2	ジ ャ イ ロ オ ド メ ト リ	..... 1 8
4 . 3	ロ ボ ッ ト の 自 己 位 置 推 定	..... 2 0

## 第 5 章 駆動部の改良

5 . 1	従 来 の 駆 動 機 構	..... 2 2
5 . 2	問 題 点	..... 2 2
5 . 3	駆 動 部 の 改 良	..... 2 5
5 . 3 . 1	ギ ャ ボ ッ ク ス の 改 良	..... 2 5
5 . 3 . 2	車 輪 の ガ タ つ き の 解 消	..... 2 6
5 . 3 . 3	ノ ー バ ッ ク ラ ッ シ ギ ャ の 調 整	..... 2 8

## 第 6 章 ジャイロセンサのドリフトと補整

6 . 1	ド リ フ ト 現 象 と 自 己 位 置 推 定	..... 2 9
6 . 1 . 1	ジ ャ イ ロ セ ン サ の ド リ フ ト 現 象	..... 2 9
6 . 1 . 2	ジ ャ イ ロ オ ド メ ト リ へ の 影 響	..... 3 1
6 . 2	ジ ャ イ ロ ド リ フ ト の 補 正	..... 3 1
6 . 3	ド リ フ ト と 温 度	..... 3 3
6 . 3 . 1	ド リ フ ト 傾 向 と セ ン サ 温 度	..... 3 3

6 . 3 . 2	ジャイロセンサの自己発熱	..... 3 4
第 7 章	自己位置推定の実験	
7 . 1	実験概要	..... 3 6
7 . 2	実験結果	..... 3 6
7 . 3	考察	..... 3 7
第 8 章	画像処理	
8 . 1	ハフ変換について	..... 3 9
8 . 2	ハフ変換の原理	..... 3 9
8 . 2 . 1	画像空間	..... 4 0
8 . 2 . 2	$ab$ パラメータ空間	..... 4 1
8 . 2 . 3	$\theta\rho$ パラメータ空間	..... 4 2
8 . 2 . 4	ハフ変換の式	..... 4 6
8 . 3	実験結果と考察	..... 4 7
第 9 章	結論	
9 . 1	自己位置推定のまとめ	..... 4 8
9 . 2	画像処理のまとめ	..... 4 8
9 . 3	今後の課題	..... 4 9
参考文献		..... 5 0
謝辞		..... 5 1

## 第 1 章 序 論

本章では，研究の背景および研究内容を述べ，本論文の構成を述べる．

### 1 . 1 研究の背景

近年，自律移動ロボットの研究が進んでおり，病院内で薬品を無人搬送する自律ロボットなどが実現されている．また，自律移動ロボットの技術が発展することにより，自動車を自律的かつ，より安全に走行させることなどが期待されている．

このような自律移動ロボットには，自分の位置や角度を認識・推定する自己位置推定技術や，走行させたい場所や経路などを指定する経路計画技術，障害物によって経路計画通りに走行できない場合に，その障害物を回避して元の経路に戻る障害物回避技術，ロボットを任意の地点や方向に走行させる誘導技術，天候や交通などの変化する外界環境に対応できる信頼性の高い機体設計など，多くの技術が要求される．

本研究では，つくばチャレンジ 2 0 1 1 という自律移動ロボットの実証実験に参加するロボットの製作を通じて，これらの自律移動ロボットに要求される技術に関する研究を行う．

### 1 . 2 研究の内容

我々は，つくばチャレンジ 2 0 1 1 に参加するために，都市部や施設内などの人々が生活する環境の中で，定められた目的地まで自律移動するロボットの開発を行った．

本研究では，自己位置をロボットに搭載したエンコーダとジャイロセンサの情報によって逐次算出していくジャイロ

オドメトリと呼ばれる自己位置推定方法や，その算出過程でジャイロセンサからの情報を積分していった際，その情報に含まれるノイズの累積が自己位置推定に与える影響とその低減方法，前年度ロボットからの駆動部の改良についての研究を行った．

また，つくばチャレンジ2011の「走行コースに設けられた白線の前で自律的に一時停止する」という課題を達成するために，Webカメラを用いて白線を検出する研究を行った．

### 1. 3 論文の構成

本論文は，1章で研究の背景と内容を述べ，2章でつくばチャレンジの概要と，本研究室の参加の歴史について述べる．3章では我々の研究で使用したロボットの仕様やシステム構成について述べ，4章ではロボットに自己位置を認識させる方法について述べる．5章ではロボットの駆動部に施した改良について述べ，6章ではジャイロセンサに発生するドリフト現象とその補正方法について述べる．7章では駆動部の改良とドリフト現象の補正を行った状態で走行実験を行い，その実験結果について述べる．8章では白線検出のための画像処理方法について述べ，9章で本研究の結論を述べる．

## 第 2 章 つくばチャレンジ

2 章では，つくばチャレンジ概要と歴史，伊藤研究室のこれまでの大会参加の歴史，そして，つくばチャレンジ 2011 のルールについて説明する．

### 2. 1 つくばチャレンジ概要

つくばチャレンジとは，人々が生活している空間の中で，定められた目的地までロボットが自律的に走行することを目標としたチャレンジである．つくばチャレンジに参加するロボットには，目的地まで自律で走行することは勿論，環境内に存在する人間の行動を邪魔しないことや，高い親和性などが要求される．

## 2. 2 つくばチャレンジ5年間の歴史

ここでは，今までの大会と伊藤研究室の大会出場の歴史を述べる．

### 2. 2. 1 つくばチャレンジ2007

最初のつくばチャレンジ2007では，図2-1のような殆ど直線の1kmコースで，このときは27チーム中3チームしか完走することはできなかった．最初の大会となるこの大会では，大会に出場するための機体を1から製作しなければならなかった．そのため時間がなく，機体もプログラムも満足のいくものが完成しなかった．図2-2のように機体には外装が無く，防水防砂対策に手が回らず，組み立て，分解のやりにくい設計になってしまった．

しかし，ここで作ったロボットはその後の研究室のロボットの基盤となった．

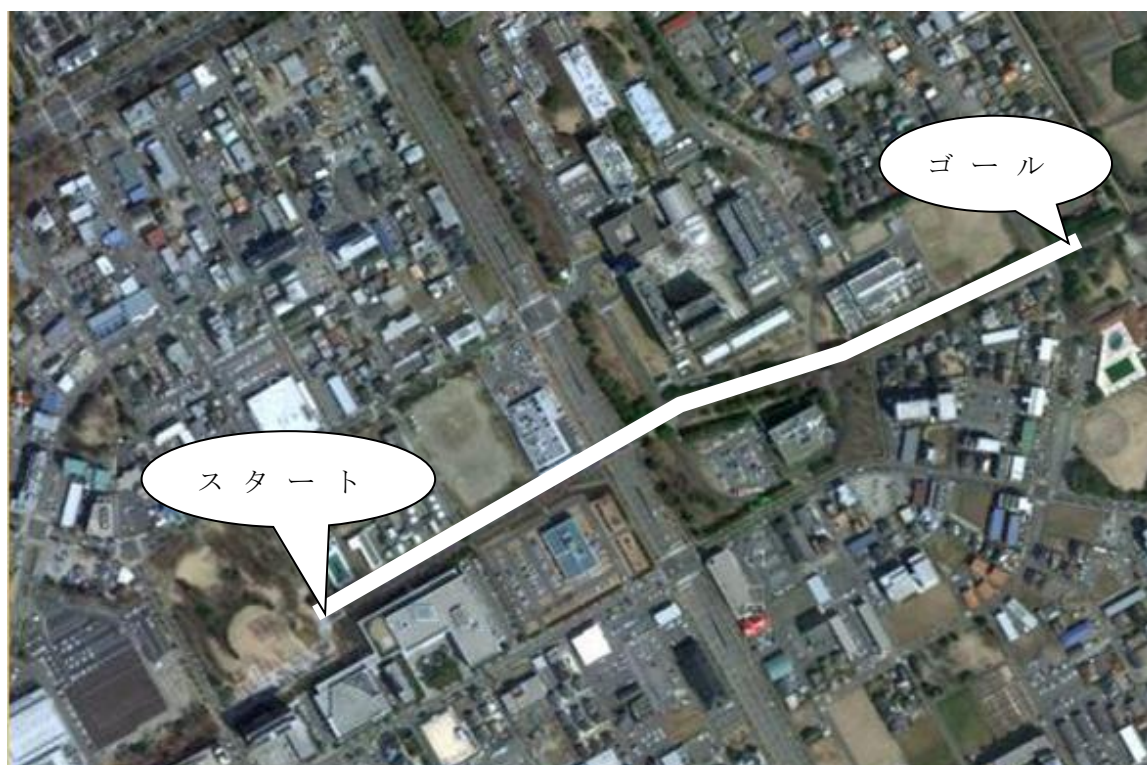


図 2 - 1      2 0 0 7 年 コ ー ス





図 2 - 2      2 0 0 7 年 の ロ ボ ッ ト

## 2 . 2 . 2      つ く ば チ ャ レ ン ジ 2 0 0 8

つくばチャレンジ2008ではコースがやや難しくなり，図2-3のような折り返しやすれ違いを含む約1kmのコースで行われた．出場チームは47チームでこのとき完走したロボットは僅か1チームだけだった．2回目の参加となるこの大会では，ロボットの改善ということで，図2-4のような防水防砂用の外装を製作した．雪ウサギをイメージしたもので，見た目の評価はかなり良かった．さらに，GPSと比例航法による自律走行を実現し，コースの完走を達成した．



図 2 - 3 2 0 0 8 年 コー ス

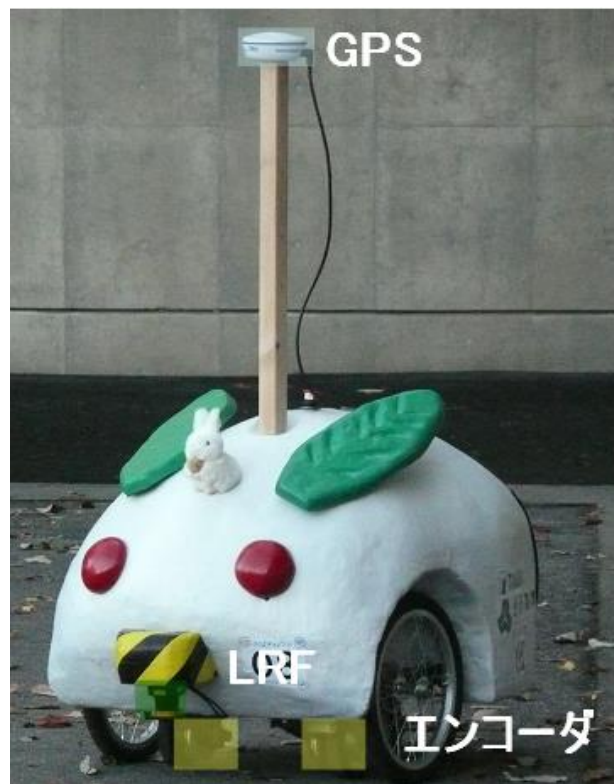


図 2 - 4 2 0 0 8 年 ロ ボ ッ ト

### 2 . 2 . 3 つくばチャレンジ 2 0 0 9

つくばチャレンジ 2 0 0 9 は，図 2 - 5 のようにつくば中央公園を反時計回りに周回し，公園内のステージをゴールとしたコースで，出場したチームは 6 5 チーム，その中 5 チームが完走した．3 回目の参加となるこの大会では，機体の大幅改善として足回りが変更された．さらに外装も変更し，図 2 - 6 のようにねずみをイメージしたものになった．走行方法は比例航法と壁伝い走行を使用した．しかし，自己位置の推定に問題が残ったまま臨んでしまい途中で走行不能な状態に陥った．



図 2 - 5 2 0 0 9 年 コース



図 2 - 6 2 0 0 9 年 ロ ボ ッ ト

#### 2 . 2 . 4 つくばチャレンジ2010

つくばチャレンジ2010では，図2-7のように白線で停止する等の課題が追加され，さらに難解なコースとなった．出場したチーム64チーム中7チームが完走した．4回目の参加となるこの大会では，外装の大幅改善をした．図2-8のようなトラをイメージしたもので，以前の外装に比べ滑らかなボディになった．さらに，上蓋を付けて中を整備しやすくし，雨垂れを付けることにより，雨が長時間降っていても問題ない防水性がある．誘導にはトポロジカルマップを使用し，壁伝い走行を駆使してトライアルはクリアしたが，本走行でコースアウトした．





図 2 - 7 2 0 1 0 年 コ ー ス



図 2 - 8 2 0 1 0 年 ロ ボ ッ ト

## 2 . 2 . 5 つくばチャレンジ2011

我々の参加したつくばチャレンジ2011は，最後のつくばチャレンジであり，コースと課題が一気に難解になった．出場チームは66チームで，その中の6チームが室内走行やエレベーター搭乗等の課題をクリアし完走した．

最初は直進のコースでもゴールできないチームが沢山あったが，毎年コースが難解になっていくにもかかわらず完走チームが増えていくという進歩がある．我々の研究内容とロボットについては後述する．

## 2 . 3 つくばチャレンジ2011の課題

(1) ロボットを自律移動させゴールまで行く．

ここで，ロボットの行動に影響を与える操作を一切してはいけない．

(2) 走行コースに設けられた白線の前で自律的に一時停止する．

(3) エレベーターに乗り室内へ移動する．

ここで，エレベーターに他のロボットが乗り込んでいる場合，ロボットは列を作って待つ．

(4) ゴール前には幅の狭い上りスロープがあり，これを自動で上る．一方通行で帰りのロボットなどもあるので，スロープ前で一時停止をする．

## 2. 4 つくばチャレンジ2011のコース

図2-1のようにエキスポセンターからスタートし，公園を抜け，橋を通り，Uターンをしてエレベーターに搭乗．ショッピングモールを進み，広場に出てスロープを登った先がゴールである．止マークの場所は白線があり，停止しなければならない．

予選として，トライアルゴールまで辿り着いたロボットが本走行を行うことができる．

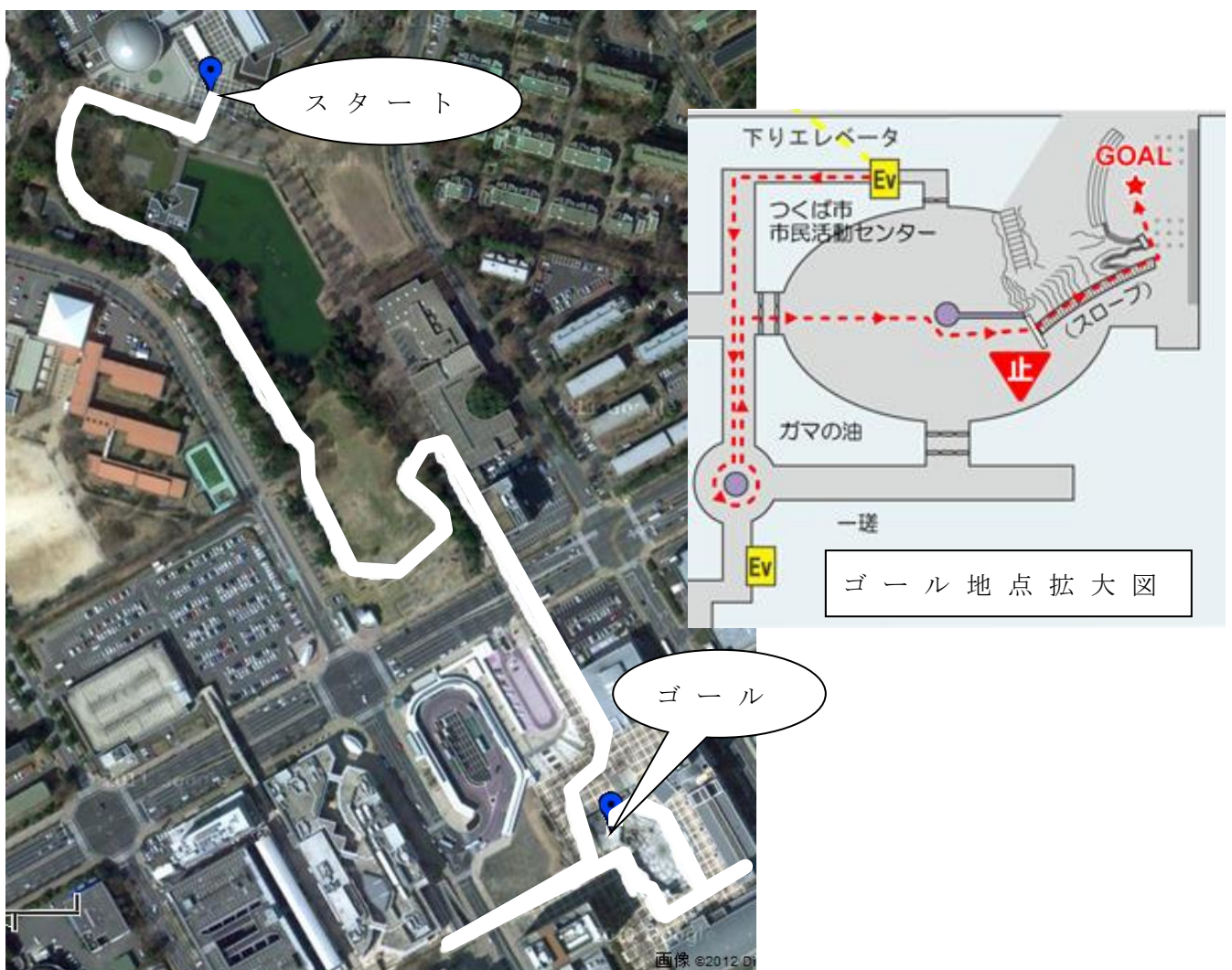


図2-1 つくばチャレンジ2011コース

### 第 3 章 ロボットのシステム

本章では，ロボットのシステム構成や機体の仕様，搭載されているセンサについて述べる．

#### 3. 1 システム構成

我々のロボットは内部に搭載した Windows ノート PC により制御される．システムの開発言語には，オブジェクト指向の C# 言語を使用した．図 3-1 にシステムの構成を示す．

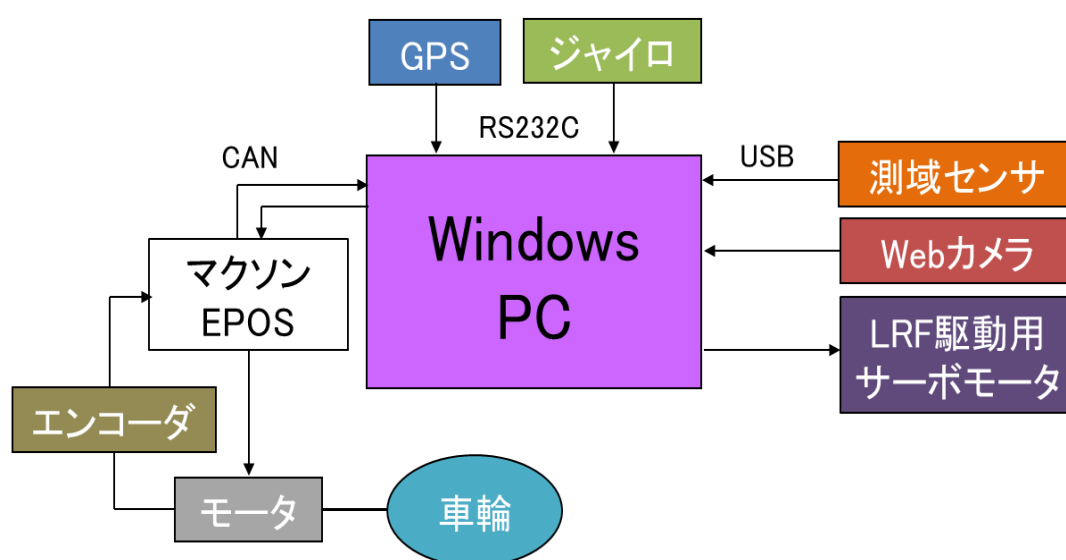


図 3-1 動作システム図

ノート PC には，USB 通信によって GPS とジャイロセンサが接続されており，RS232C 通信により測域センサと Web カメラ，LRF 駆動用のサーボモータが接続されている．また，CAN 通信により接続されたマクソンモータ製 EPOS を介して，車輪駆動用モータの制御と，モータに取り付けられたエンコーダ情報の送信が行われる．

#### 3. 2 搭載センサ

この節では，我々のロボットに搭載されているセンサについて説明する．



( 1 ) 全地球測位システム ( Global Positioning System )  
( 以下 GPS ) は , ロボットの自己位置を得るために使用する .  
このセンサは複数の人工衛星から電波を受信することで , 自己の緯度・経度・高さなどの位置情報を得ることができる .  
電波を受信する GPS アンテナは , 地面から 135cm の高さに取り付けた .



図 3 - 2 GPS アンテナ

( 2 ) 測域センサ ( Laser Range Scanner )  
測域センサは , 障害物などの外界環境を認識するために使用する . このセンサはレーザ光により周囲をスキャンすることによって , 半径 30 m ・角度 270 度の範囲内にある物体を検知することができる .



図 3 - 3 測域センサ

( 3 ) 振動式ジャイロセンサ  
ジャイロセンサは , 機体のヨー角方向の角度変化を検出するために使用する . このセンサは振動する素子に加わるコリオリ力から角速度を検知することができる . また , この角速

度を積分することにより機体の角度情報を得ることができる。



図 3 - 4 ジャイロセンサ

#### ( 4 ) エンコーダ

エンコーダは，車輪の回転数を検出するために使用される．このセンサは，スリットが刻まれた円盤を介して光の検出を行うことで，軸の回転数をパルス信号として得ることができる．エンコーダは，車輪を駆動させるモータに左右別々に取り付けた．

#### ( 5 ) Web カメラ

Web カメラは，白線を検出するために使用される．Web カメラはロボット前方に取り付けてあり，周期的に路面を撮影して画像データを取得する．

ロボットに搭載したセンサの製造元と型番を表 3 - 1 に示す．

表 3 - 1 搭載センサ一覧

種 類	製 造 元	型 番
GPS	Hemisphere	Crescent A100
測 域 セ ン サ	北 洋 電 機	UTM30-LX
ジャイロセンサ	住友精密工業	SS-3001
エンコーダ	Maxon Motor	MR Type L
Web カメラ	Logicool	Webcam C200

### 3 . 3 機 体 の 仕 様

今回使用した機体は，去年の機体をベースにして駆動部の改良を加えたものである．表 3 - 2 に機体の仕様をまとめる．また，図 3 - 5 に外観図を示す．

表 3 - 2 機体の仕様

全 高	1 3 5 [ c m ]
車 高	8 5 [ c m ]
全 長	1 1 0 [ c m ]
車 幅	7 0 [ c m ]
重 量	6 0 [ k g ]
駆 動 形 式	3 輪 車 2 輪 駆 動
駆 動 タ イ ヤ 直 径	4 0 [ c m ]
使 用 モ ー タ	Maxon Motor 製 RE 4 0
モ ー タ 減 速 比	1 5 6 : 1
外 装	ス タ イ ロ フ ォ ー ム ・ F R P



図 3 - 5 ロ ボ ッ ト 外 観 図

## 第 4 章 自 己 位 置 推 定

ロボットに機体の位置座標や角度といった自己位置を認識・推測させることを自己位置推定という．自律移動ロボットにおいて自己位置は，進路決定や機体誘導に必要な情報であり，この自己位置を得る自己位置推定は非常に重要な技術である．

4 章では，この自己位置推定について述べる．

#### 4. 1 座 標 系

この節では自己位置推定に用いる座標系を説明する．我々のロボットの自己位置推定で使用する座標系は，地平座標系と地球中心直交座標系，測地座標系<sup>[1]</sup>の 3 つである．図 4 - 1 に各座標系の模式図を示す．

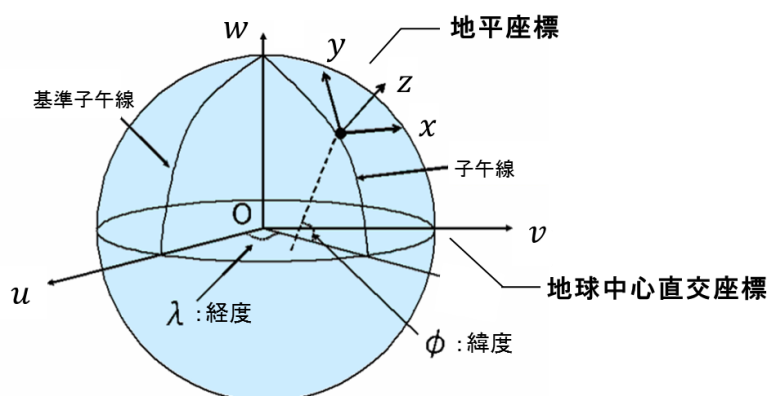


図 4 - 1 各座標系

我々のロボットで機体誘導や進路決定に用いる座標系を地平座標系と呼ぶ．地平座標系は，地球上のある地点を原点として，原点から見て東方向を  $x$  軸のプラス方向，北方向を  $y$  軸のプラス方向，天頂方向を  $z$  軸のプラス方向とした  $x-y-z$  直交座標系である．機体の位置を，地球重心を原点とした  $u-v-w$  直交座標で表す座標系を地球中心直交座標系と呼ぶ．このとき，地球重心から見て  $w$  軸が自転軸の北極方向， $u$  軸が基準子午線方向， $v$  軸が両軸に直交する方向を表す．機体の位

置を緯度  $\phi$ ，経度  $\lambda$ ，楕円体高  $h$  で表す座標系を測地座標系と呼ぶ． $\phi$  は機体位置の子午線の接線からおろした垂線が赤道面と交わる角度， $\lambda$  は機体位置の子午線と基準子午線が赤道面上でなす角度， $h$  が子午線の垂線方向高さを表す．

ロボットの自己位置は地平座標上で推定され，地球中心座標や測地座標で得られた機体の位置は，地平座標に変換することで自己位置として使用される．今回， $z$  軸方向の自己位置は機体誘導などに使用しないため， $z$  軸方向については自己位置推定を行わない．

## 4. 2 自己位置推定方法

我々のロボットには自己位置推定方法が二種類ある．衛星測位システムを利用する GPS 測位と，ジャイロセンサとエンコーダを利用するジャイロオドメトリである．本節では，それぞれの推定方法と問題点について述べる

### 4. 2. 1 GPS 測位

GPS 測位による自己位置推定では，GPS アンテナから送られてくる NMEA センテンスの GPGGA データコード<sup>[2]</sup>により機体の測地座標  $(\phi, \lambda, h)$  を得る．この座標を地平座標  $(x, y)$  に座標変換<sup>[1]</sup>することで自己位置推定を行う．座標変換は以下のようなになる．

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - (2f - f^2)^2 \sin^2 \phi}} \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 1)$$

$$f = \frac{1}{298.257223563} \quad : \text{扁平率}$$

$$a = 6378137 \quad : \text{赤道面平均半径 [m]}$$

としたとき，測地座標  $(\phi, \lambda, h)$  は地球中心直交座標  $(u, v, w)$  で

$$u = (N + h) \cos \phi \cos \lambda \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 2)$$

$$v = (N + h) \cos \phi \sin \lambda \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 3)$$

$$w = \{N(f^2 - 2f + 1) + h\} \sin \phi \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 4)$$

となる．

さらに，この地球中心直交座標  $(u, v, w)$  を地平座標に変換する．地平座標原点の地球中心直交座標を  $(u_0, v_0, w_0)$  とすると，地平座標上の自己位置座標  $(x, y)$  は

$$x = -(u - u_0) \sin \lambda + (v - v_0) \cos \lambda \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 5)$$

$$y = -(u - u_0) \sin \phi \cos \lambda - (v - v_0) \sin \phi \sin \lambda + (w - w_0) \cos \phi \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 6)$$

として求めることができる．

G P S 測位による自己位置推定では，電波の受信により自己位置情報を得るため，上空に遮蔽物があったり，近くに高い建物があると，電波の受信環境が悪化して，得られる位置情報の精度が悪化する．また，屋内など，衛星からの電波を受信できない環境では位置情報を取得することができず，自己位置推定を行うことができない．

## 4 . 2 . 2 ジャイロオドメトリ

ジャイロオドメトリによる自己位置推定では，ロボットに搭載したジャイロセンサとエンコーダにより自己位置推定を行う．周期的にジャイロセンサによって機体のヨー角方向の角度，エンコーダにより機体の前後方向の微小移動距離を検出して，機体の微小移動量を算出する．この微小移動量を累積することによって現在の機体位置を推定する．

ジャイロオドメトリによる自己位置推定の模式図を図 4 - 2 に示す．

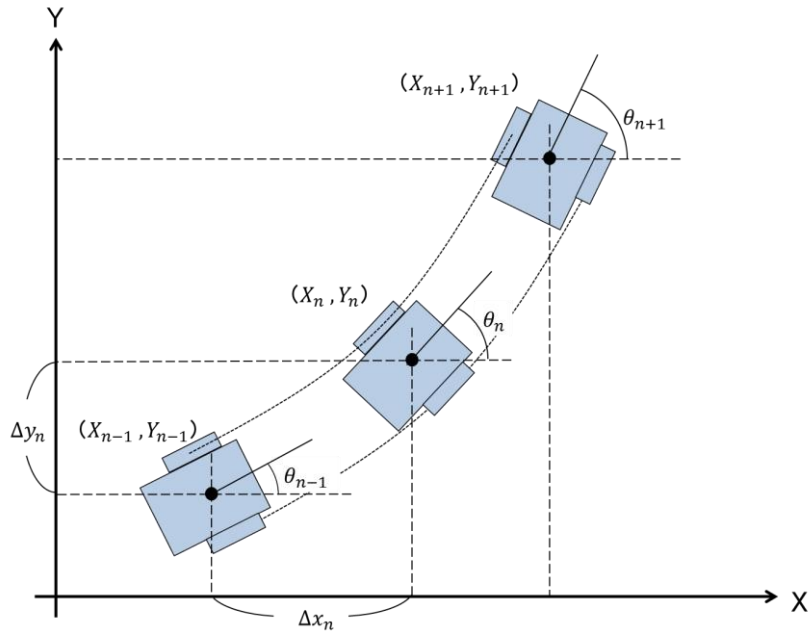


図 4 - 2 ジャイロオドメトリ模式図

以下に自己位置の算出過程を示す．1 周期の間に進む機体前後方向の微小移動距離  $\Delta \ell_n$  は

$$\Delta \ell_n = \frac{(\text{Pr}_n - \text{Pr}_{n-1}) + (\text{Pl}_n - \text{Pl}_{n-1})}{2} \times Cd \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 7)$$

と表すことができる．ここで， $\text{Pr}_n$  は右輪エンコーダのパルス数， $\text{Pl}_n$  は左輪エンコーダのパルス数， $\text{Pr}_{n-1}$  が 1 周期前の右輪エンコーダパルス数， $\text{Pl}_{n-1}$  が 1 周期前の左輪エンコーダパルス数で， $Cd$  は 1 パルスで進む距離を表す．

微小移動距離  $\Delta \ell_n$  を算出する周期が十分短いと，ロボットが微小移動する間，ロボットは直進していると仮定できる．

このとき，現在の機体角度を  $\theta_n$ ，1 周期前の角度を  $\theta_{n-1}$  とすると，地平座標系での微小移動量  $\Delta x_n$ ， $\Delta y_n$  は

$$\Delta x_n = \Delta \ell_n \times \cos\left(\frac{\theta_n + \theta_{n-1}}{2}\right) \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 8)$$

$$\Delta y_n = \Delta \ell_n \times \sin\left(\frac{\theta_n + \theta_{n-1}}{2}\right) \quad \cdot \cdot \cdot (4 - 9)$$

として算出<sup>[3][4]</sup>することができる．ここで，角度は  $x$  軸から

反時計方向になす角である．この微小移動量  $\Delta x_n$ ,  $\Delta y_n$  を累積計算することにより，現在の自己位置座標  $X_n$ ,  $Y_n$  を推定する．すなわち，1 周期前の位置を  $X_{n-1}$ ,  $Y_{n-1}$  とすると

$$X_n = X_{n-1} + \Delta x_n \quad \cdot \cdot \cdot (4-1 \ 0)$$

$$Y_n = Y_{n-1} + \Delta y_n \quad \cdot \cdot \cdot (4-1 \ 1)$$

として自己位置を求めることができる．

しかし，算出した移動量や角度にはセンサノイズなどによる誤差が含まれ，推定される自己位置にも誤差が累積する．このため，長距離を移動する際には自己位置推定精度が悪化する．また，坂道の走行などは  $z$  軸方向にも移動しており，算出した移動量と地平座標上の移動量との間に差が発生して誤差の要因となる．さらに，ジャイロオドメトリは微小時間の間はロボットが直進していると仮定した近似走行モデルであるため，センサノイズ等がなくても実際の自己位置と推定値との間に誤差が累積する．

#### 4. 3 ロボットの自己位置推定

つくばチャレンジ 2011 の課題では，屋内のショッピングモールなど，GPS 測位による自己位置推定を行うことができない場所を走行する必要がある．このため我々のロボットでは，ジャイロオドメトリによる自己位置推定を行うことにした．しかし，4. 2 で述べたようにジャイロオドメトリによる自己位置推定では誤差の累積が発生し，徐々に推定位置の精度が悪化する．このため我々のロボットでは定期的に，GPS の受信状態が良好な地点で長時間の GPS 測位を行い，その推定位置によってジャイロオドメトリの推定位置を上書きすることにした．また，自己角度についても走行コースの



各地点で，測域センサから得られた外界情報とあらかじめロボットに与えておいた地図情報を比較することで，現在の自己角度を認識して補正することにした．これによってジャイロオドメトリの累積する誤差を定期的に初期化する．

なお，我々のロボットではジャイロオドメトリによる自己位置推定を 100ms 周期で行っている．また，ロボットの通常速度は 0.5m/s である．

## 第 5 章 駆動部の改良

5 章では，ロボットの駆動部を改良する目的とその改良点について述べる．

### 5 . 1 従 来 の 駆 動 機 構

昨年まで使用していた駆動部を以下に示す．

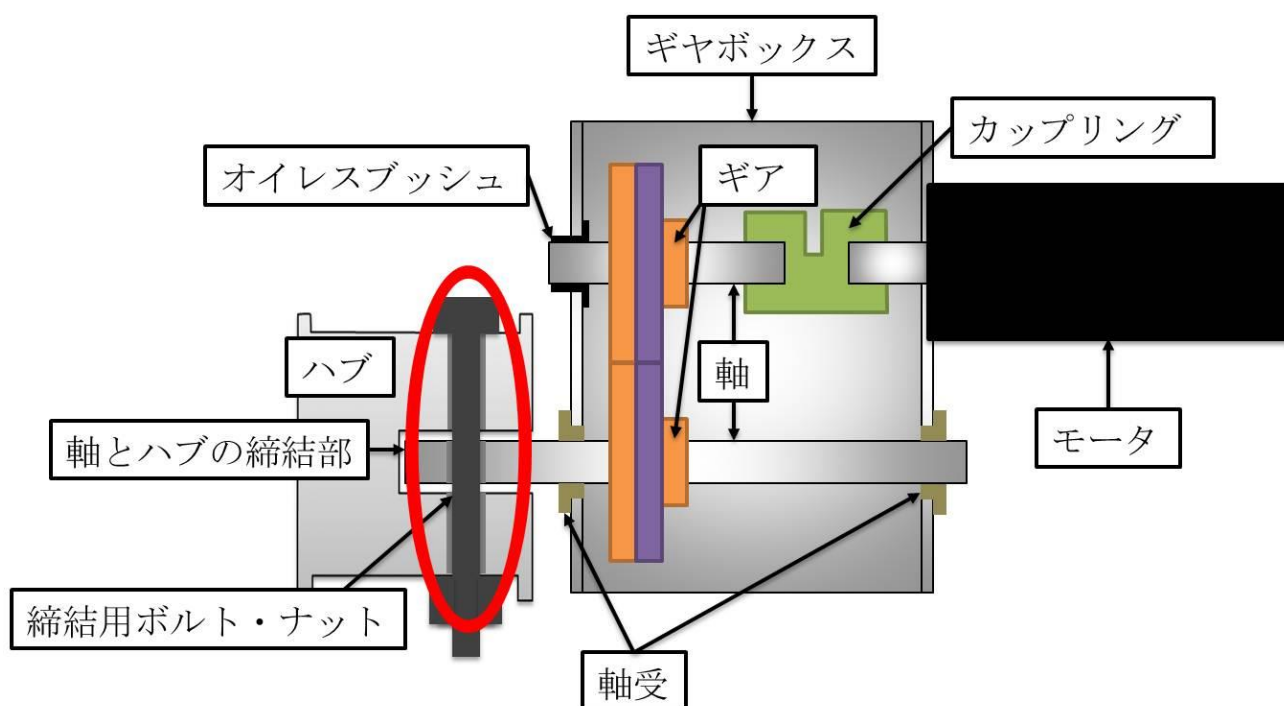


図 5 - 1 昨年までの駆動部

### 5 . 2 問 題 点

図 5 - 1 で示す駆動部で問題があった箇所は以下の 3 点である．

- ( 1 ) ギヤボックス
- ( 2 ) 軸とハブの締結部
- ( 3 ) ノーバックラッシギヤ

問題点を ( 1 ) , ( 2 ) , ( 3 ) の順で述べていく．

- ( 1 ) ギヤボックスは、板厚 3 . 0 m m のアルミ角管を使用していた。ボックス内のギヤを野晒しに近い環境で運用していたため、小石や砂埃を少なからず巻き込んでいることが考えられた。また、車軸にロボット全重量が掛かり、その荷重によって角管に歪みが生じており、走行に影響を及ぼしている恐れがあった。図 5 - 2 に駆動部の全体図を示す。

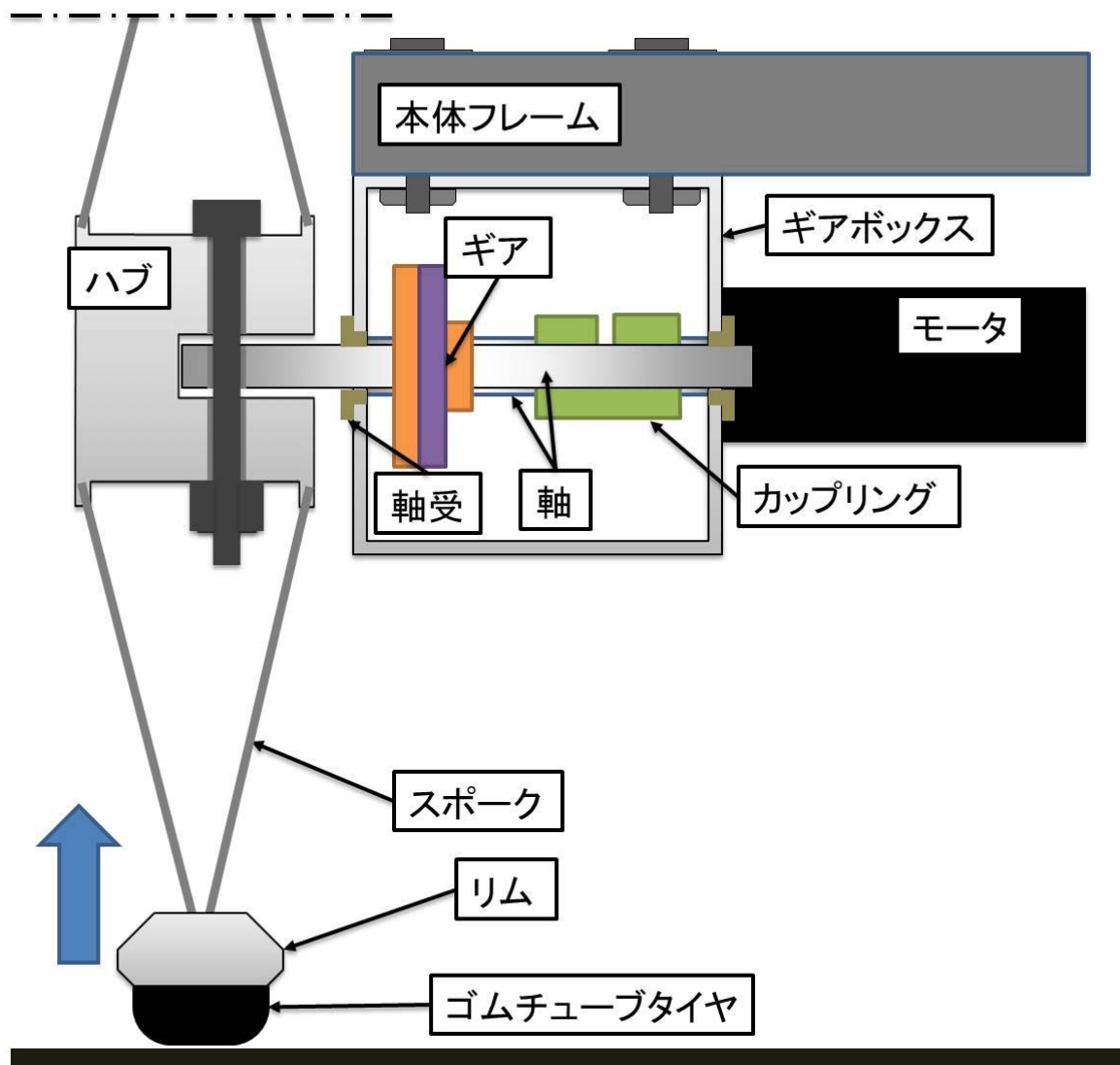


図 5 - 2 全体図

- ( 2 ) 軸とハブの締結方法については，締結するための貫通穴をハブと軸にあけ，この2つをボルト・ナットで締結していただけた。締結されたボルトが穴にある隙間によってガタつきが生じていたものとする。図5-3にモデル図を示す。

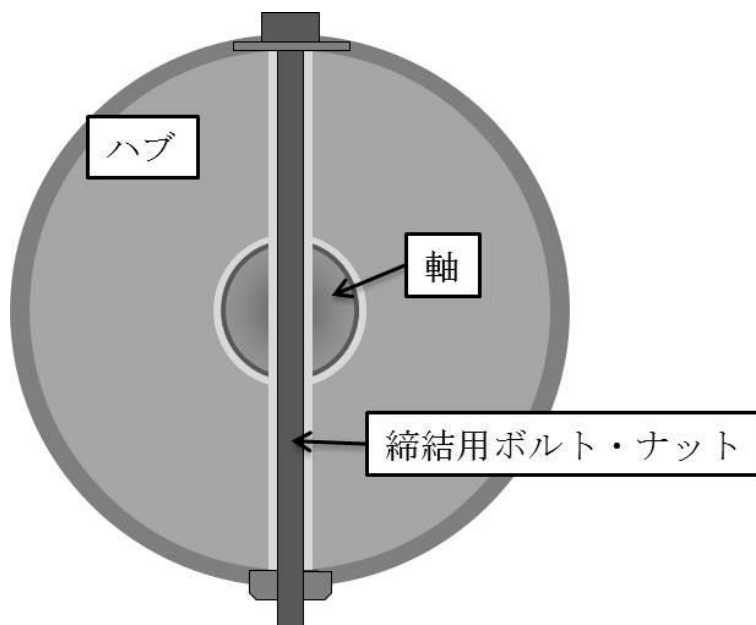


図 5 - 3 軸とハブの締結方法

- ( 3 ) ノーバックラッシギヤは，駆動部を改良するために一度ギヤボックスを分解した。ギヤボックスを組み直す際に，噛み合いがずれたノーバックラッシギヤの調整が必要だった。噛み合いの図を図5-4に示す。

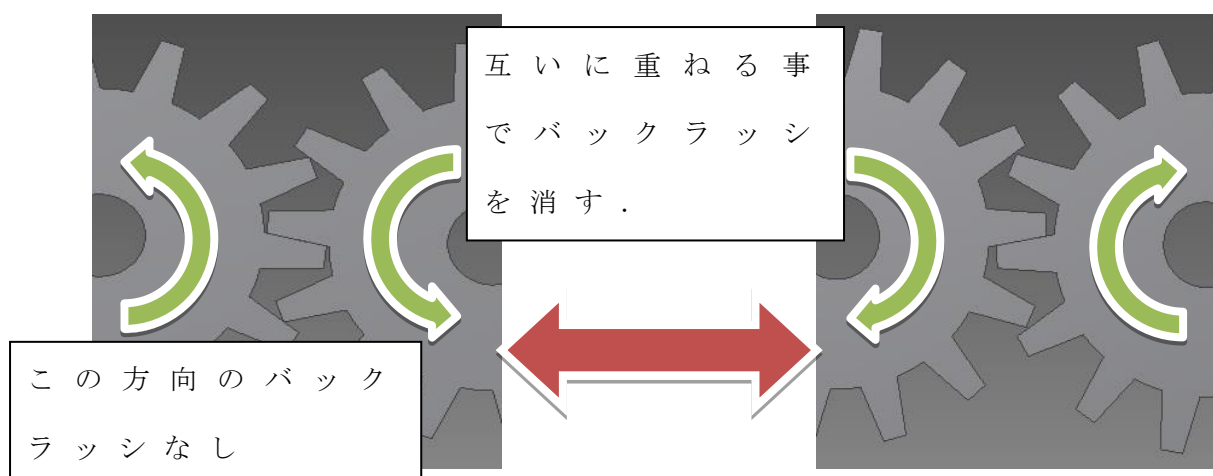


図 5 - 4 ノーバックラッシギヤの噛み合い

### 5 . 3 改 良 点

改良に際して，自律移動ロボットに使用されている駆動部の改良点を挙げる．

- (1) ギヤボックスの剛性向上
- (2) 車輪の回転方向に生じるガタつきの解消
- (3) ノーバックラッシギヤの調整

この3項目を満たす改良を行った．駆動部の改良点を以下に記述する．

#### 5 . 3 . 1 ギヤボックスの改良

ギヤボックスの問題を解消するために板厚 5 . 0 m m のアルミ板を 2 0 × 2 0 m m のアルミ角材を用いてボルトとナットで固定し箱型に組み合わせた．完成したものを図 5 - 4 に示す．

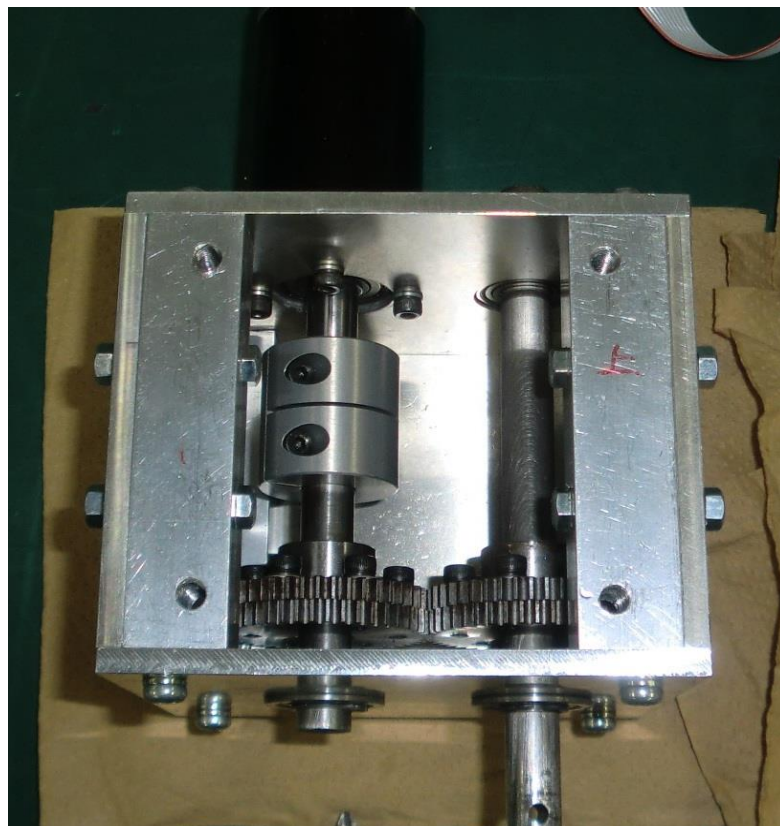


図 5 - 4 改良型ギヤボックス

### 5 . 3 . 2 車 輪 の ガ タ つ き の 解 消

ガタつきが生じる最大の原因は，前述の 5 . 1 にあるように車輪のハブとギヤボックスから延びる軸との締結方法である．

このガタつきをメカロックと呼ばれる摩擦締結具を用いて解消を図った．摩擦締結具はねじを締めつけることで，軸外径とハブ内径に対して軸に垂直方向の力が加えられ，この作用力に応じた摩擦力で同軸締結させるものである．車輪を分解し取り出したハブに摩擦締結具を取り付けるための追加工を施す．ハブの軸挿入部の直径 12 mm の穴を中心に直径 20 mm ，深さ 12 mm の穴をあける必要があったため，加工には強力直立ボール盤を使用し作業を行った．

加工後のハブを車輪に組み直し，出力軸にハブと摩擦締結具を嵌めて摩擦締結具についているボルトをレンチで締結する．摩擦締結具で締結されたものを図 5 - 5 に示す．摩擦締結具は図中の矢印で示す．



図 5 - 5 摩擦締結具で締結した車輪

### 5 . 3 . 3 ノーバックラッシギヤの調整

ギヤボックス内で減速機として使用されているノーバックラッシギヤの調整を行った．バックラッシは，歯車を噛み合わせた時に歯面間にできる「遊び」のことである．この「遊び」を2枚1組で構成されたギヤで，1枚は正回転方向，もう1枚は逆回転方向のバックラッシを打ち消し合うように組み合わせて，六角ボルトで締結する．これによって，ギヤで発生するバックラッシはなくなり，ほとんどがモータで発生するバックラッシのみとなった．ノーバックラッシギヤの噛み合いのモデル図を図5-6に，調整を行ったノーバックラッシギヤを図5-7に示す．

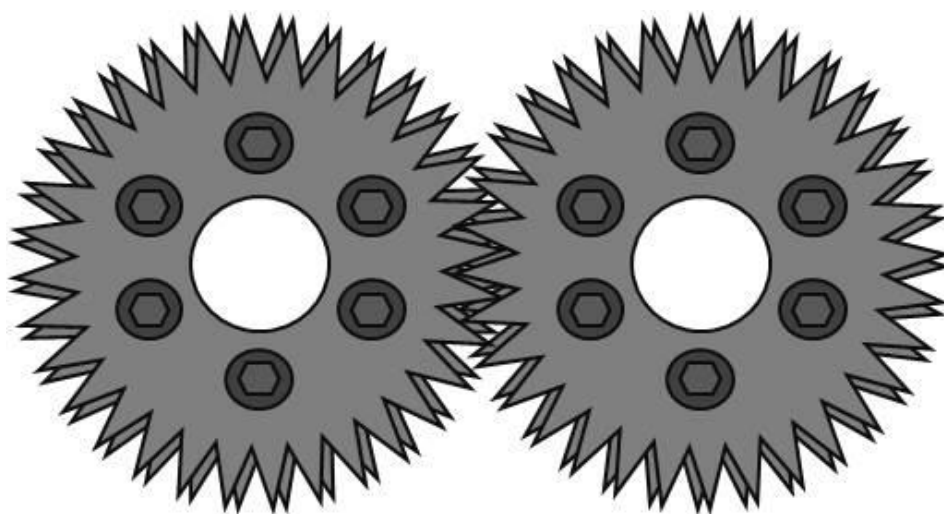


図 5 - 6      噛み合い



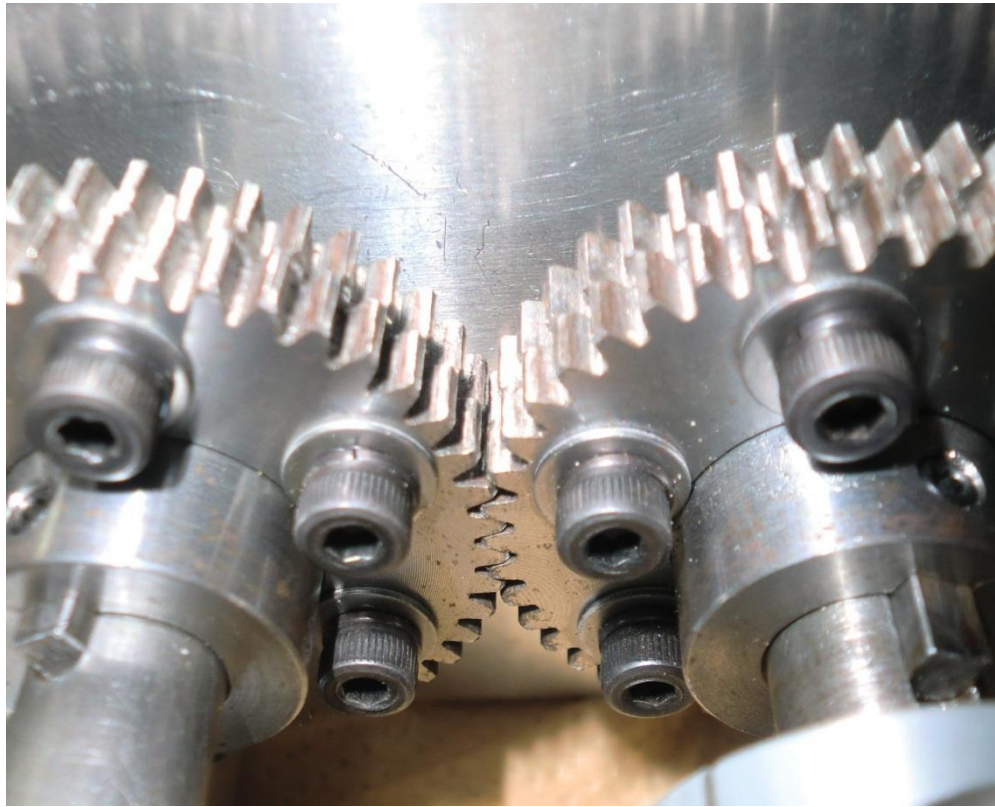


図 5 - 7 ノーバックラッシギヤの噛み合い部分



## 第 6 章 ジャイロセンサのドリフトと補正

我々のロボットに搭載されているジャイロセンサには，ドリフト現象と呼ばれるノイズの累積が発生する．この章では，ドリフト現象の説明，ドリフト現象が自己位置推定に与える影響，そしてドリフト現象を補正する方法について述べる．また，ドリフトと温度の関係性について実験を行ったため，これについても述べる．

### 6. 1 ドリフト現象と自己位置推定

この節では，ジャイロセンサに発生するドリフト現象の説明と，ドリフト現象がジャイロオドメトリによる自己位置推定に及ぼす影響について述べる．

#### 6. 1. 1 ジャイロセンサのドリフト現象

ジャイロセンサのドリフト現象は，センサの温度変化や内部の機械的摩擦，振動・衝撃や電気ノイズなどによって出力電圧が変化することによって発生する．また，これら各々の要素は複雑に関係しており，センサ個体差による違いもある．

ジャイロセンサはこのドリフト現象によって，実際に発生していない角速度をも誤って検出する．このため，ジャイロセンサを静止させた状態であっても，ジャイロセンサは角速度を検出する．また，その角速度を積分して角度を算出した際には，誤検出された角速度が累積することによって角度の変化が発生する．

我々のロボットに搭載しているジャイロセンサを長時間静止させた状態で，その角度変化を観測したものを図 6-1 に示す．なお，本実験で使用したジャイロセンサの角度出力が

時計方向をプラスとしているため，本論文で示す図中の角度値も時計方向をプラス，反時計方向をマイナスとする．

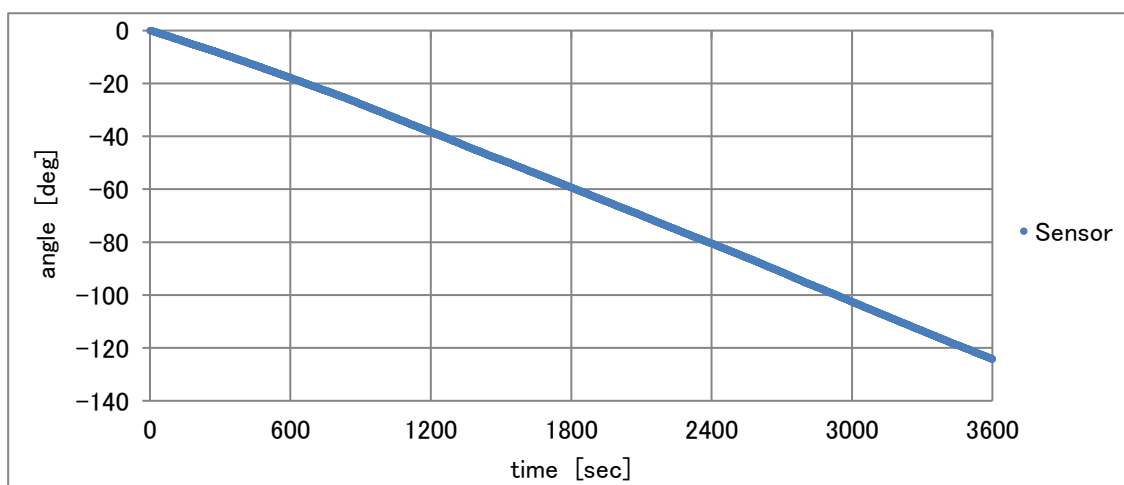


図 6 - 1 静止時における角度変化

図 6 - 1 から，ドリフト現象によって，マイナス方向（反時計方向）に角度変化が発生しているのが分かる．また，ドリフト現象による角度変化を複数回計測した結果，角度の変化量は一定でなく，毎回異なることが分かった．例として図 6 - 2 に角度変化を比較したものを示す．

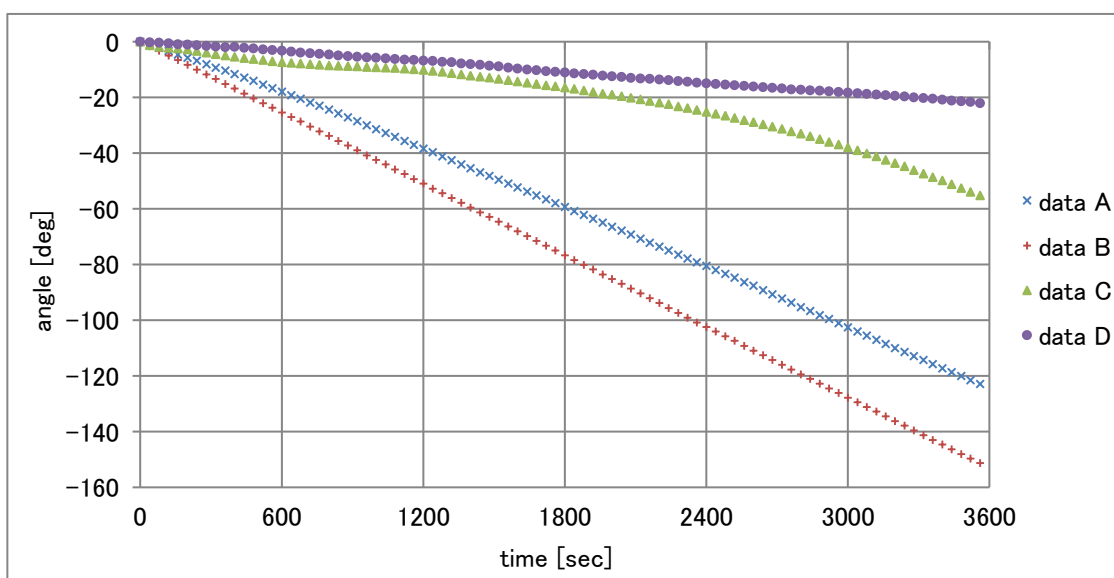


図 6 - 2 角度変化の比較

以後，ドリフト現象による角度の変化量をドリフト量という．

## 6. 1. 2 ジャイロオドメトリへの影響

ジャイロオドメトリによる自己位置推定では，自己角度をジャイロセンサから出力される角速度を積分することによって推定している．このため，推定される自己角度にもドリフト現象によって誤差累積が発生する．このような自己角度の誤差は，ジャイロオドメトリで移動量を算出する際

（4-8式，4-9式）に誤差の要因となり，自己位置推定に悪影響を与える．

## 6. 2 ジャイロドリフトの補正

我々は，ジャイロセンサに発生しているドリフト量の近似数式モデルを作成し，今後発生するドリフト量の予測と補正を行った．数式モデルは時間を変数とする2次関数として，ロボットを静止させた状態でドリフト量を100秒間サンプリングし，最小二乗法を用いて算出する．

図6-3に，数式モデルによって予測したドリフト量と，実際に発生しているドリフト量を比較した様子を示す．

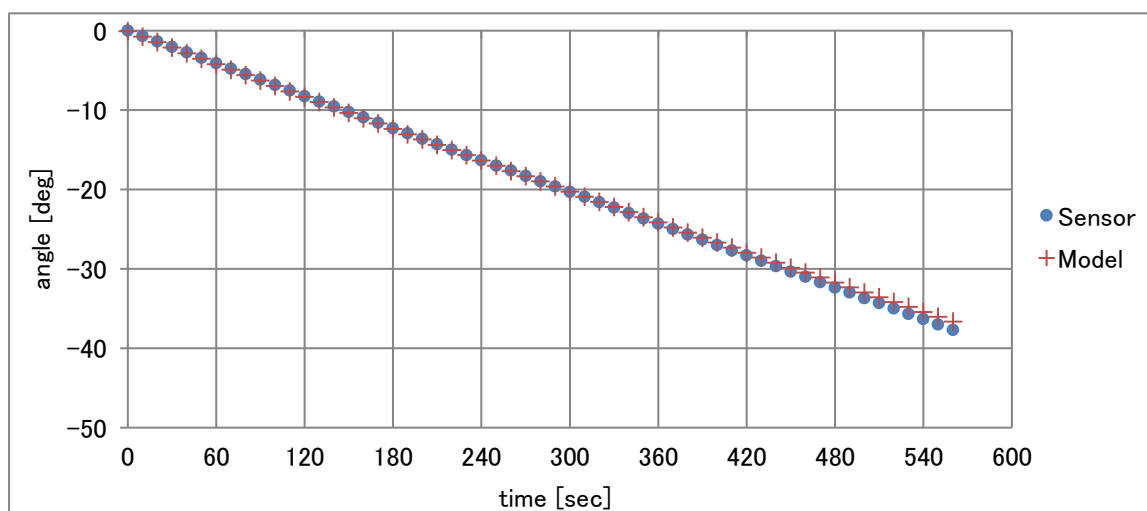


図 6 - 3 ドリフト量の予測

図6-3から，数式モデルは発生するドリフト量を上手く予測できていることが分かる．

しかし，数式モデルがドリフト量を正しく予測できないこともある．図 6 - 4 にドリフト量の予測が失敗した例を示す．

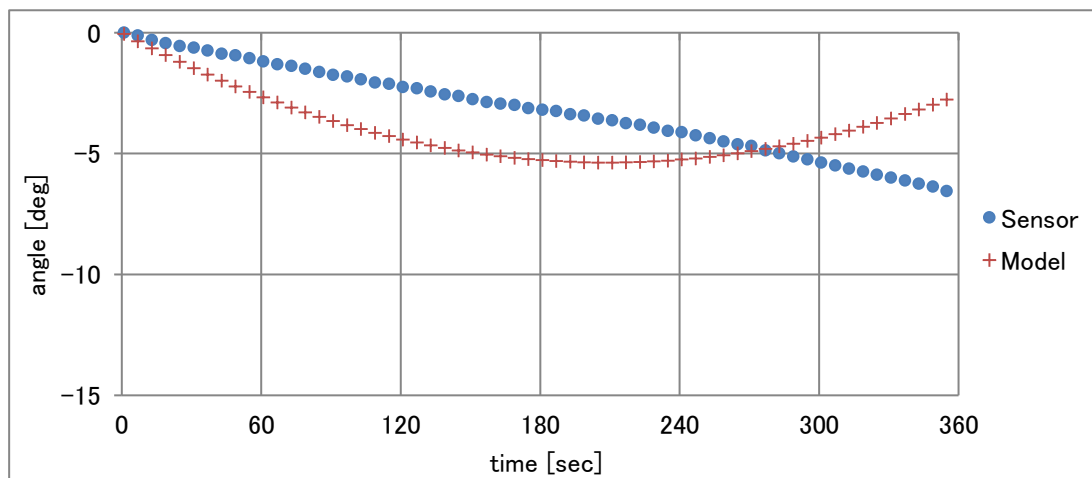


図 6 - 4 ドリフト予測の失敗

図 6 - 4 の例では，数式モデルが予測するドリフト量が，途中からプラス方向（時計方向）に転じるなど，明らかな数式モデルの不適合が見られる．このような，算出した数式モデルが実際のドリフト量を近似できない原因を調べた．

図 6 - 5 は，ドリフトのサンプリング時に発生していたドリフト量と，その後発生したドリフト量を連続したデータとしてつなぎ合わせたものである．

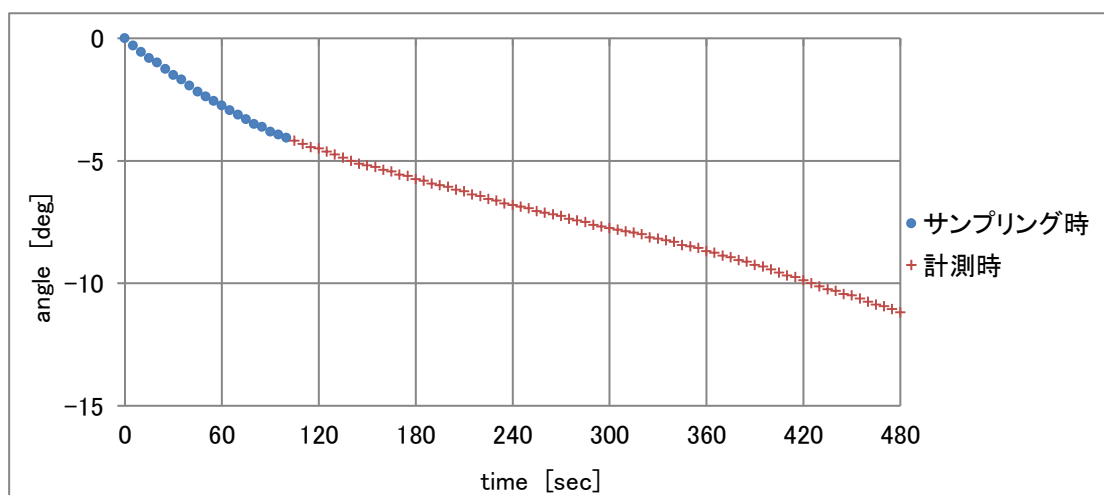


図 6 - 5 ドリフト量の発生傾向

図 6 - 5 から，サンプリング時のドリフト量の発生傾向と，その後の計測時でのドリフト量の発生傾向が異なっている

ように見える．（以後，ドリフト量の発生傾向のことをドリフト傾向とする）このようなドリフト傾向の変化が発生すると，傾向変化前に算出した数式モデルが，傾向変化後のドリフト傾向に適応できなくなり，数式モデルによるドリフトの予測と補正が破綻する．

### 6. 3 ドリフトと温度

6. 2 で述べたようなドリフト傾向の変化は，温度変化によるものだと考えられた<sup>[5]</sup>．このため，ドリフト傾向と温度の関係性について確認を行った．

#### 6. 3. 1 ドリフト傾向とセンサ温度

まず，ドリフト傾向とセンサ温度との間に関係性があるかどうかを確認した．ジャイロセンサに温度変化がない状態で一定時間放置した後，ヒートガンによりセンサを加熱，その後空冷によって冷却した．結果は図 6 - 6 のようになった．

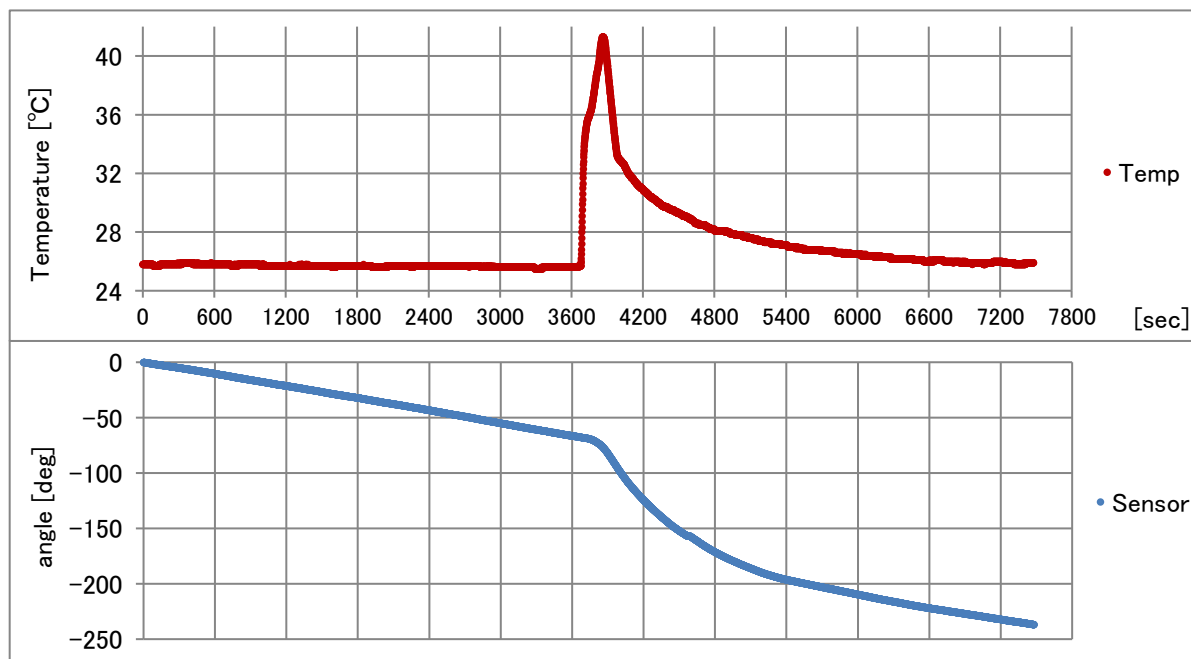


図 6 - 6 ドリフト傾向とセンサ温度

図 6 - 6 から，センサ温度が上昇すると単位時間当たりに発

生するドリフト量が多くなる（以後，ドリフト傾向が大きいと表現する）ことが分かる．逆に，センサ温度が低下した場合は，ドリフト傾向が小さくなる．また，急激な温度変化が発生した場合には，ドリフト傾向にも急激な変化が見られ，逆に，緩やかに温度が変化した場合には，ドリフト傾向の変化も緩やかに発生する．このことから，ドリフト傾向とセンサ温度の間には，相関関係があることが確認できた．

### 6. 3. 2 ジャイロセンサの自己発熱

ドリフト傾向に関する実験を行った後に，センサに触れると温かいことがあった．実験は外部からの加熱を行っていなかったため，センサ自体の発熱が考えられた．

このため，ジャイロセンサの自己発熱を確認するための実験を行った．実験は，ジャイロセンサを無稼働状態で長時間放置した後起動させ，その後の温度変化を観測した．

実験結果を図 6 - 7 に示す．

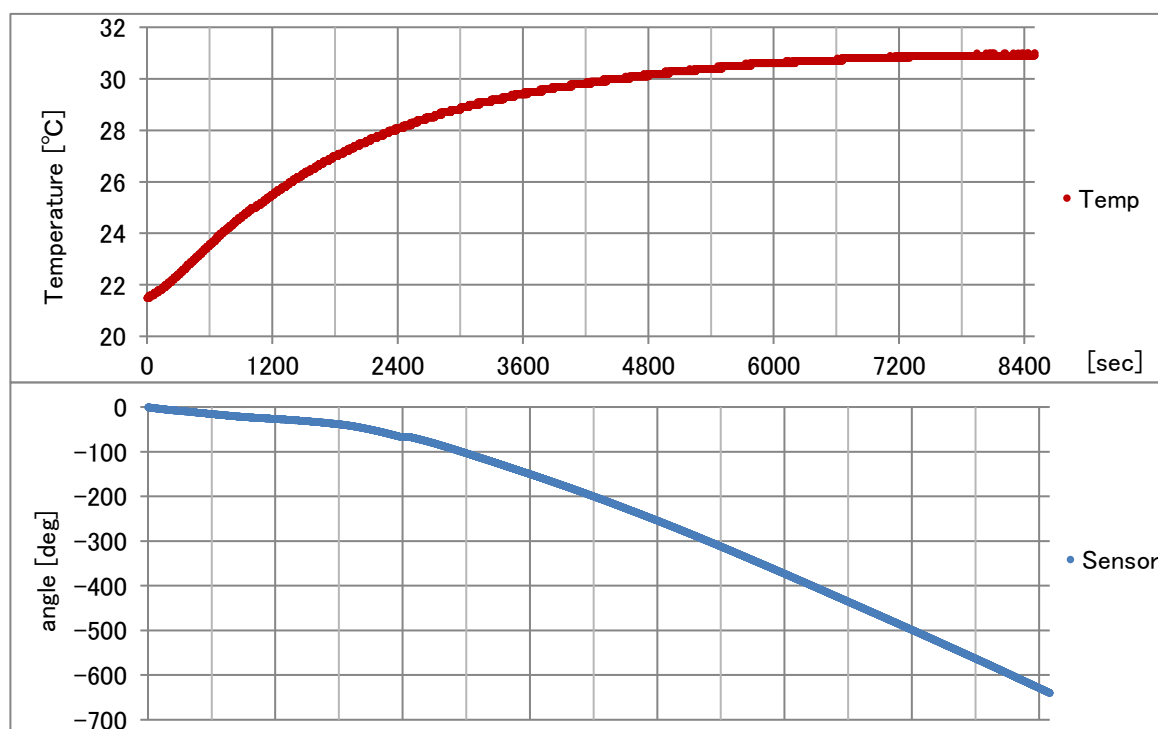


図 6 - 7 ジャイロセンサの自己発熱

結果から，センサの温度が緩やかに上昇する自己発熱が確認できた．また，センサ温度が平衡状態になるまで非常に長い時間を要することが分かる．温度が平衡状態に達するまでの期間は，ジャイロセンサは自己発熱によって温度が上昇し続ける．この温度上昇によってドリフト傾向も緩やかに大きくなっており，このドリフト傾向が変化し続けている領域で数式モデルのサンプリングを行ったことが，頻繁に発生するドリフト予測の失敗につながったものだと考えられる．

なお，カタログ上のジャイロセンサの動作温度範囲は $-10\sim 55^{\circ}\text{C}$ である．

## 第 7 章 自己位置推定の実験

5. 2 で述べた駆動部の改良と，6. 2 で述べたジャイロドリフトの補正を行った状態で屋外環境を走行させ，ジャイロオドメトリによる自己位置推定精度を確認した．

### 7. 1 実験概要

実験は金沢工業高等専門学校の敷地内にある駐車場で行った．スタート地点でドリフトのサンプリングを行って数式モデルを算出した後，数式モデルによる補正を加えながらロボットを走行させ，真のゴール地点と，ジャイロオドメトリの推定値との差を実測で測定した．ロボットの速度は  $0.5\text{m/s}$  で，走行回数は 100 回とした．スタート地点とゴール地点との直線距離は 85m である．



図 7 - 1 実験経路

### 7. 2 実験結果

7 - 1 を基に実験を行った結果，図 7 - 2 のようになった．



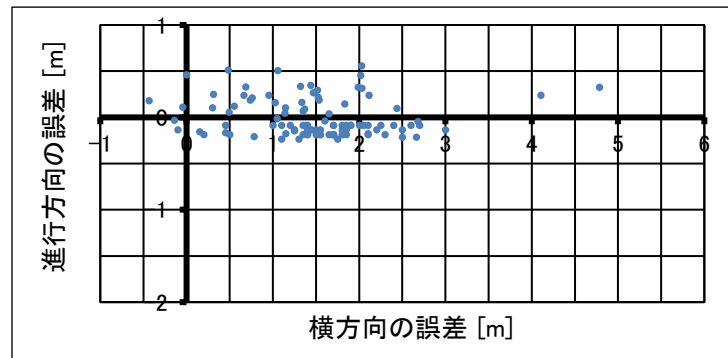


図 7 - 2 自己位置推定精度

実験により得られた値をまとめる．進行方向に発生する誤差の平均値はほぼ 0 で，標準偏差は 0.2m，誤差の最大値は 0.6m，最小値は -0.2m であった．横方向に発生する誤差の平均は 1.5m で，標準偏差が 0.8m，誤差の最大値が 4.8m，最小値が -0.4m となった．走行に要した時間は，どの走行でも約 190 秒であった．

### 7 . 3 考 察

実験結果から，ジャイロオドメトリによる自己位置推定は進行方向に誤差が少なく，横方向に大きな誤差が発生することが分かる．施設内などでの走行では 1 m 以下の自己位置推定精度が要求されることもあり，ジャイロオドメトリを唯一の自己位置推定方法とするには信頼性に欠ける．このため，実用的な自己位置推定のためには，ジャイロオドメトリや G P S 測位，外観環境による推定値などを融合した複合的な自己位置推定方法<sup>[6]</sup>が必要であると考えられる．

発生した推定誤差について考察する．横方向に大きな誤差が生じるのは，走行中にジャイロセンサの自己発熱によるドリフト傾向の変化が発生し，ジャイロドリフトの補正が失敗したためだと考えられる．進行方向には誤差が少ないが，これはエンコーダのパルス数から走行距離を算出（4 - 7 式）

する際の係数が適当なためである。この係数は、タイヤの空気圧低下や路面状態などにより変化する値であるため、常に同じ値にはならない。このため、進行方向の精度を維持するためには、適度な係数の調整が必要になる。

## 第 8 章 画 像 処 理

8 章では，白線で停止させるためのハフ変換<sup>[7]</sup>を用いた画像処理方法について説明する．

### 8 . 1    ハフ変換の概要

ハフ変換とは画像処理方法である特徴抽出法の一つで，主に画像内にある直線を検出するためのものである．応用したものとして，円のハフ変換という円を検出するものもある．

今回は白線を見つけるということで，直線を検出するハフ変換を使用する．

### 8 . 2    ハフ変換の原理

ハフ変換は画像を点の集まりとして見て，その点の色成分等の要素で方程式を立て計算することで直線を検出する．この点の事をピクセル（画素）という．ここではハフ変換の原理について説明し，その方程式について述べる．

## 8 . 2 . 1 画 像 空 間

画 像 空 間 と は ， 図 8 - 1 の よ う な 一 つ の 画 像 の 左 上 を 原 点 と し ， 横 方 向 を  $x$  ， 縦 方 向  $y$  と し た 平 面 空 間 で あ る ． こ こ で ，  $x$  軸 は 右 方 向 が 正 ，  $y$  軸 は 下 方 向 が 正 で あ る ．

直 線 の 傾 き を  $a$  ， 切 片 を  $b$  と す る と ， 画 像 空 間 内 に あ る 直 線 は 全 て 以 下 の 式 で 表 す 事 が で き る

$$y = ax + b \quad \cdot \cdot \cdot ( 8 - 1 )$$

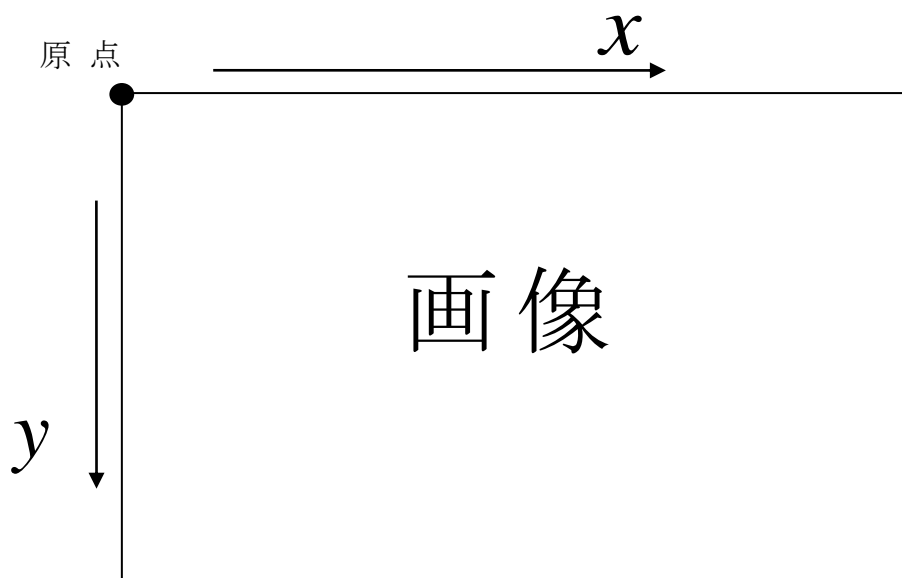


図 8 - 1 画 像 空 間

実 際 の 画 像 空 間 は 前 述 の 通 り 左 上 が 原 点 だ が ， 説 明 を 分 か り や す く す る た め に ， 以 後 原 点 を 左 下 と し て  $x$  軸 は 右 方 向 が 正 ，  $y$  軸 は 上 方 向 が 正 と し た も の を 使 う ．

## 8 . 2 . 2 $ab$ パラメータ空間

$ab$ パラメータ空間とは，前述した 8 - 1 式における直線の傾き成分  $a$ を横軸にとり，切片  $b$ を縦軸とした仮想空間の事である．ここで  $a$ ， $b$ は定数であるため，画像空間内に存在する全ての直線は，図 8 - 2 のように  $ab$ パラメータ空間で点に置き換えることができる．逆に式 ( 8 - 1 ) を  $ab$ パラメータ空間で直線とする式に変換すると

$$b = -xa + y \quad \cdot \cdot \cdot ( 8 - 2 )$$

となる．これにより， $x$ と  $y$ も  $ab$ パラメータ空間内で定数になるため， $ab$ パラメータ空間内にある全ての直線は画像空間で点に置き換えることができる．

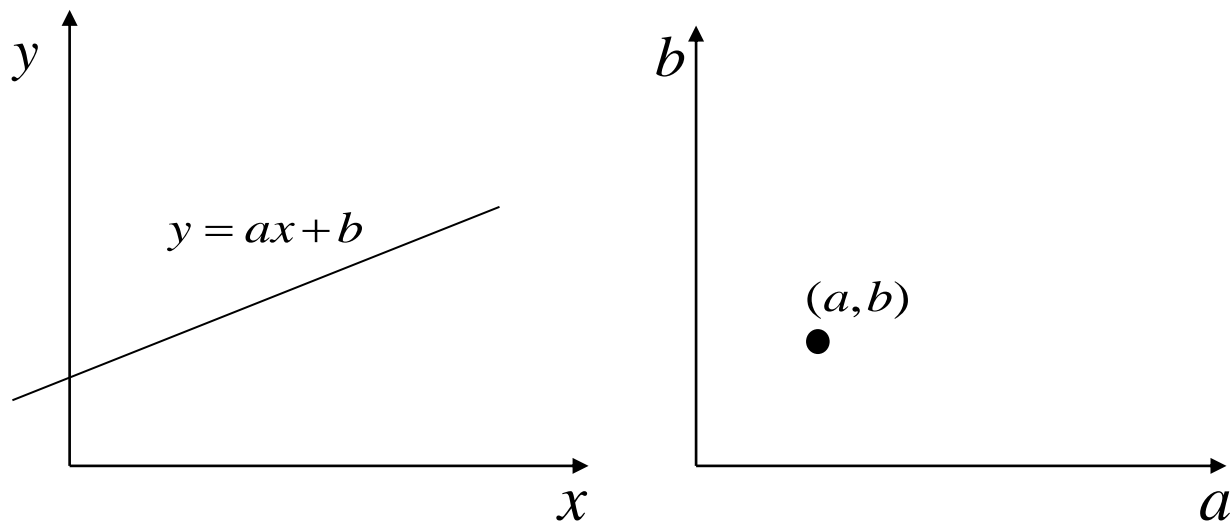


図 8 - 2 画像空間と  $ab$ パラメータ空間の関係

### 8 . 2 . 3 $\theta\rho$ パラメータ空間

$\theta\rho$ パラメータ空間とは，図 8 - 3 のように画像空間内にある直線から原点へ垂直に引いた線の長さを  $\rho$  とし，その線と横軸がなす角を  $\theta$  としたときの  $\rho$  を縦軸， $\theta$  を横軸とした仮想空間の事である．

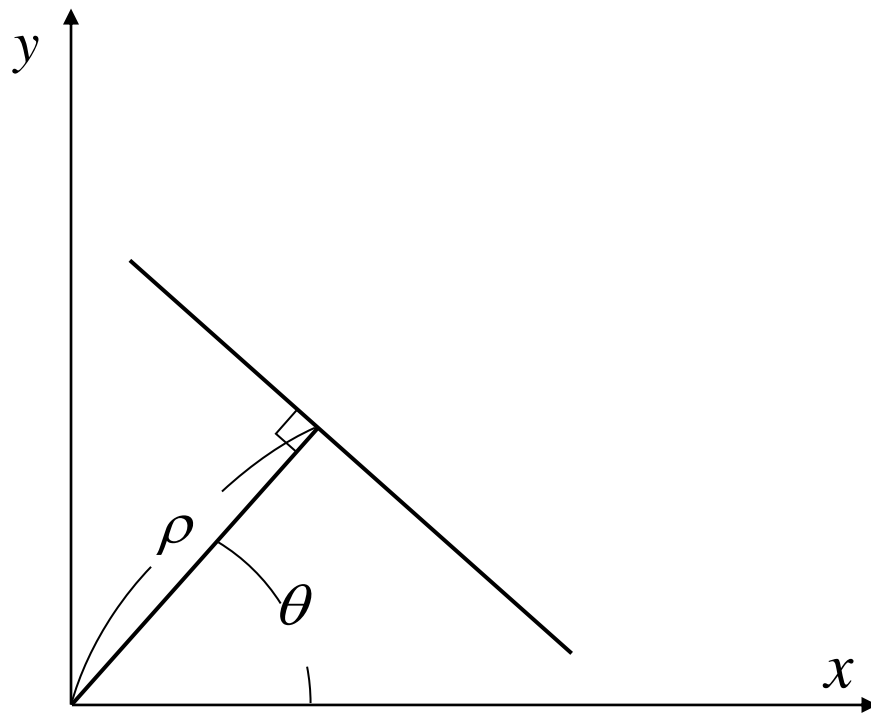


図 8 - 3  $\theta\rho$ で直線を表す

$ab$ パラメータ空間内にある直線は画像空間において点に置き換えることができるが，このときに直線の角度が横軸  $a$  に対して垂直になる場合， $x$ の値は無限となり，図 8 - 4 のように縦軸  $b$ には絶対に交差しなくなる．つまり切片  $y$ も無限になってしまい計算することができなくなる．よってハフ変換の計算をする場合に不具合が生じる．

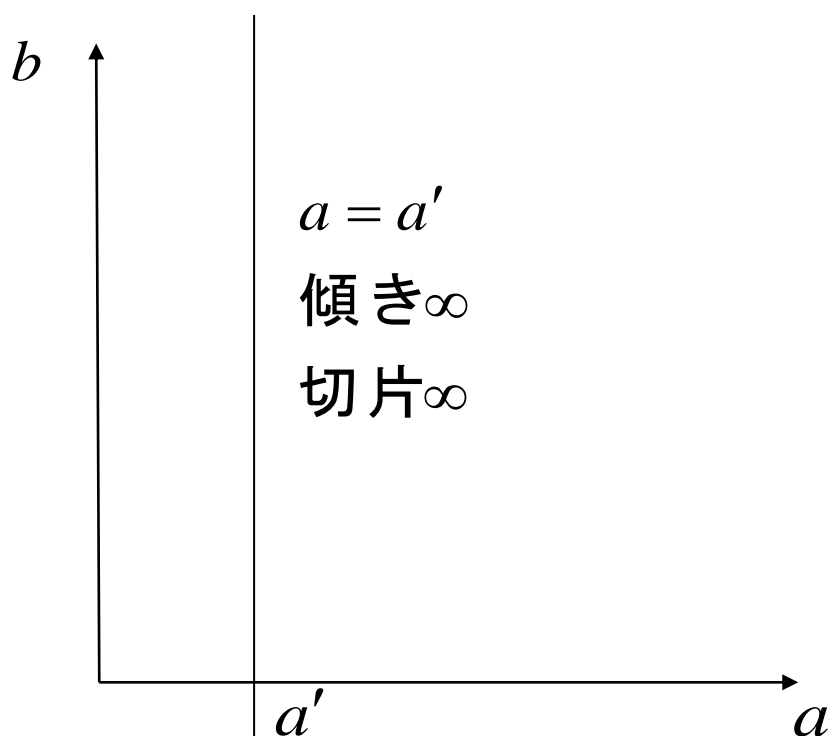
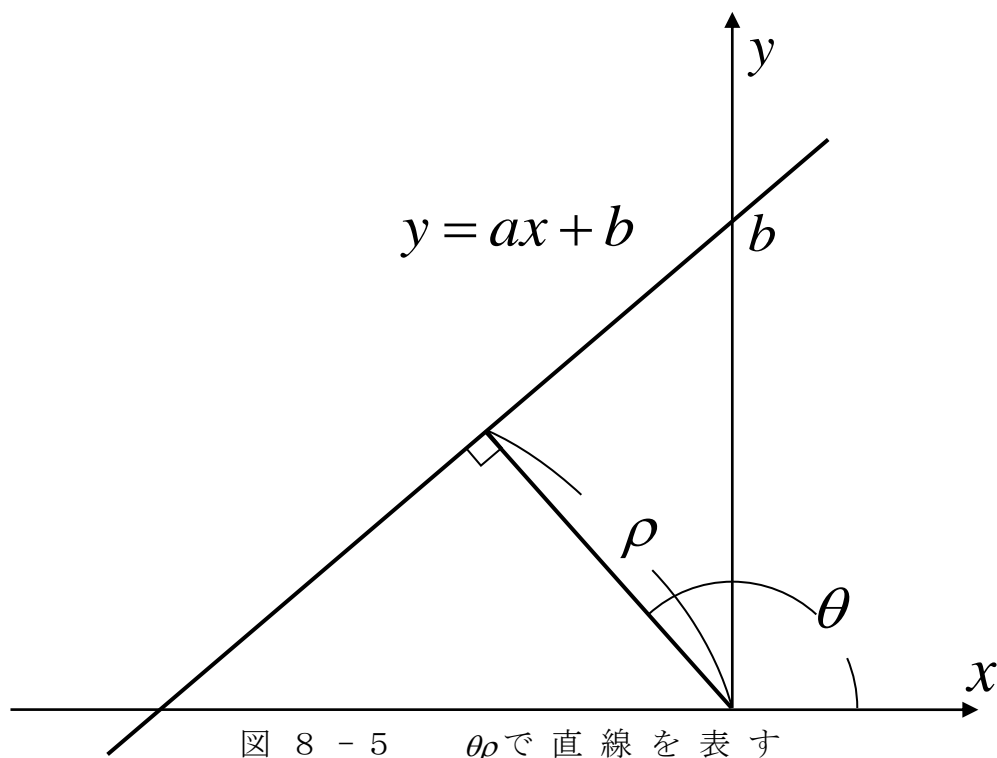


図 8 - 4  $x$ の値が無限になる場合



そこで，直線を傾き  $a$  と切片  $b$  で表現する代わりに，直線の原点からの距離  $\rho$  と，直線に直交する直線の角度  $\theta$  で表す．

図 8 - 5 に示す傾き  $a$  の直線  $y = ax + b$  において原点から直線に引いた垂線の長さがパラメータ  $\rho$  で，その角度が  $\theta$  である．



この  $\rho$  と  $\theta$  を用いてパラメータ  $ab$  を置き換える．図 8 - 5 より傾き  $a$  は以下の式により求められる．

$$a = -\frac{1}{\tan \theta} \quad \cdot \cdot \cdot (8-3)$$

また，切片  $b$  と  $\rho$  より

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{b} &= \cos(\theta - 90) \\ &= \sin \theta \end{aligned}$$

よって  $b$  は

$$b = \frac{\rho}{\sin \theta} \quad \cdot \cdot \cdot (8-4)$$

8-3 式と 8-4 式を 8-1 式に代入すると

$$y = -\frac{1}{\tan \theta} x + \frac{\rho}{\sin \theta} \quad \cdot \cdot \cdot (8-5)$$

が得られる．

8-5 式より，法線  $\rho$  は以下の式により表せる．

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad \cdot \cdot \cdot (8-6)$$

8-6 式の  $\theta$  の範囲は  $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$  になり，これで全ての直線を表すことができるので，数値が有限となり計算することが可能となる．

8-6 式は図 8-6 のような  $\theta\rho$  パラメータ空間内の正弦波の式である．これは， $ab$  パラメータ空間内の直線と同様に，画像空間上では点に置き換えることができる．また，逆に画像空間上の直線は  $\theta\rho$  パラメータ空間では点となる．

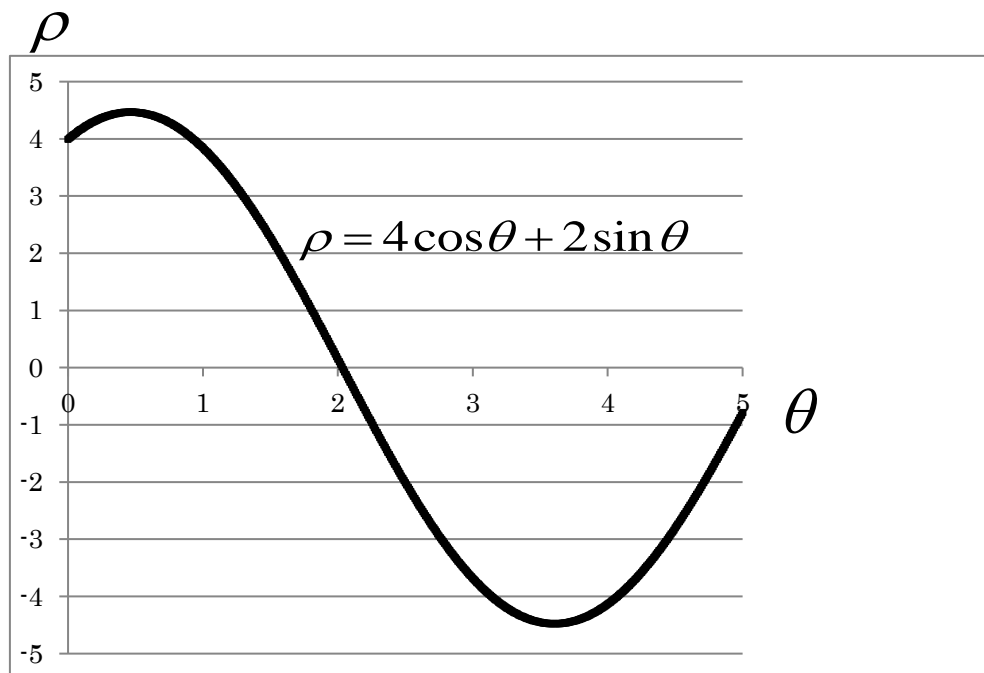


図 8-6  $\theta\rho$  パラメータ空間

## 8 . 2 . 4    ハフ変換の式

ハフ変換で使用する式は前述の 8 - 6 式である．この式を使用するには画像空間上から直線となっている点の集まりを見つけなければならない．そこで，画像の各ピクセルの色を赤成分，青成分，緑成分の各色成分の値に変換し，画像を数値化する．その中から特定の色成分だけを検出することによって，任意の色だけを認識することができる．今回は白線を検出するので，検出する色成分の値は 2 5 5（白の値）とする．

この，検出した白色成分は全て画像空間内の点であるため，この座標から  $x$  と  $y$  を求める．求めた  $x$  と  $y$  を 8 - 6 式に代入し，計算を行うことで， $\theta\rho$  パラメータ空間上で正弦波に変換する．この処理を検出した全ての点で行う．

全ての点を正弦波に変換すると，図 8 - 7 のように  $\theta\rho$  パラメータ空間内で正弦波が交差している点が出てくる．この点の座標から  $\theta$  と  $\rho$  を求める．この正弦波が交差した点を画像空間上で直線に変換すると，交差した正弦波の元となる画像空間上の点は，全てこの直線上に位置する．このときの点の数により直線だと判断する．この直線上に存在する点の数が多い方がより直線に近いものとなる．

8 - 5 式に求められた  $\theta$  と  $\rho$  を代入し，傾きと切片を求めることにより画像内にある白線を検出することができる．

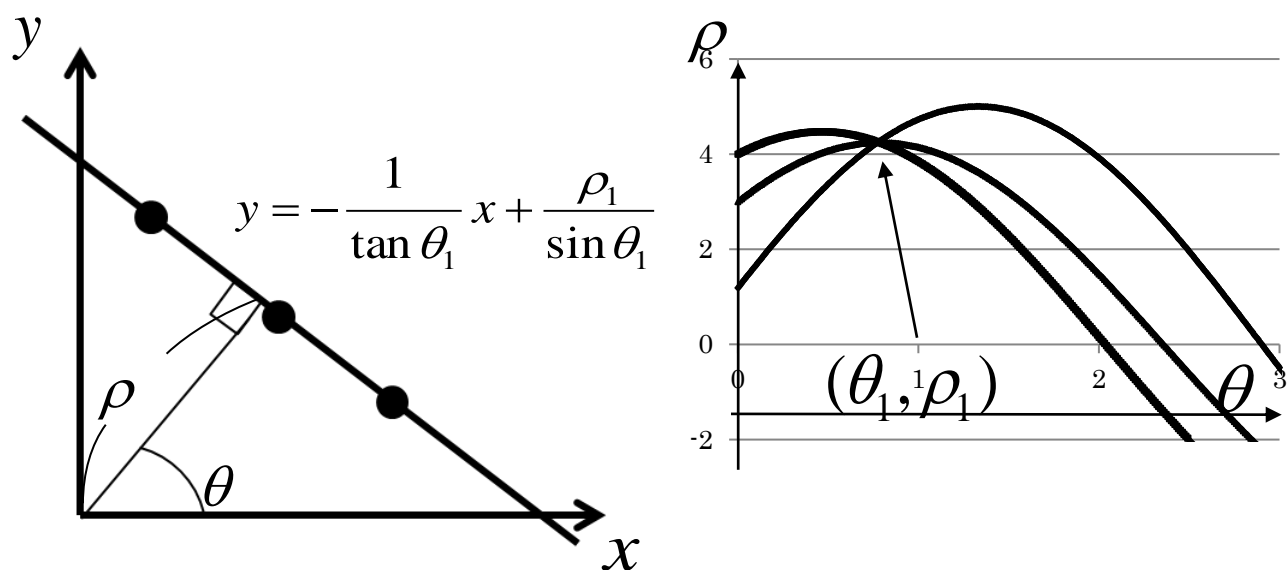


図 8 - 7 直線変換式

### 8 . 3 実験結果と考察

この方法を使用しハフ変換を行った結果，画像内にある直線の傾きと切片を得ることができた．しかし，この処理では直線の長さを得ることができない．点の数により，ある程度の長さはわかるのだが，その直線が途中で切れていた場合でも一つの線として見てしまうので，その直線の真の長さまではわからない．また，直線ではなく，単色の長方形のようなものがある場合，その直線上の点の数だけで判断するため，長方形の対角線のように同じ色が連続しているだけで直線と認識してしまう．これらの問題があるためハフ変換は単体ではなく，その補助となる処理を加えることが望ましいと考えられる．さらに，ハフ変換は処理に時間がかかるものなので，高速化するために画像を小さくすることが考えられる．

## 第 9 章 結 論

9 章では，本論文のまとめと実験からわかった課題を述べる．

### 9 . 1 自 己 位 置 推 定 の ま と め

本研究では，5 . 2 で述べた駆動部の改良で行った車輪の回転方向に生じるガタつきの解消とノーバックラッシングの調整，6 . 2 で述べたジャイロドリフトの補正を行った後，ジャイロオドメトリによる自己位置推定を行った．

しかし，現状のままのジャイロオドメトリによる自己位置推定だけでは 7 . 2 の実験結果から進行方向に誤差が少なく，横方向に大きな誤差が生じる結果となった．施設内などでの走行には 1 m 以下の自己位置推定精度が求められる場合もあり，ジャイロオドメトリを唯一の自己位置推定方法として採用するには推定精度の信頼性に欠ける．そのため，実用的な自己位置推定では，GPS 測位による推定値などを融合した複合的な自己位置推定方法が必要であると考える．

### 9 . 2 画 像 処 理 の ま と め

つくばチャレンジ 2011 には屋外のコース数か所に安全確認のための白色の一時停止線が設けられていた．この一時停止線を認識するために Web カメラと第 8 章で述べた画像処理全般を用いて白線検出を行った．まず，Web カメラを用いて白線の画像を取り込む．その画像にハフ変換処理を行い，地面に設置された白線を検出することができた．

### 9 . 3 今 後 の 課 題

自己位置推定で誤差の要因となるジャイロドリフトの発生傾向は図 6 - 6 のように温度との相関関係が確認された．そのため，恒温槽などを用いてセンサの温度管理を行うことで，更に精度の高いジャイロオドメトリが可能であると考えられる．

## 参考文献

- [1] 福島 荘之助, 理解するための GPS 測位計算プログラム入門, (参照: 平成 23 年 6 月)  
[http://www.enri.go.jp/~fks442/K\\_MUSEN/1st/1st021118.pdf](http://www.enri.go.jp/~fks442/K_MUSEN/1st/1st021118.pdf)
- [2] 村田 翔吾・小倉 宏典, 自律移動ロボットの誘導と回避アルゴリズムの統合に関する研究, 平成 20 年 2 月
- [3] オドメトリ, (参照: 平成 24 年 1 月)  
<http://sora-blue.net/~shogo82148/i/memo/tenchi jin/odometry.html>
- [4] 熊谷 正朗, 車輪移動ロボット, (参照: 平成 23 年 6 月)  
<http://www.mech.tohoku-gakuin.ac.jp/rde/contents/course/robotics/wheelrobot.html>
- [5] シリコンセンシングシステムズジャパン F A Q ”ゼロ点とゼロ点変動とは?” (参照: 平成 23 年 11 月)  
<http://www.sssj.co.jp/cgi-bin/ja/usr/index.cgi?c=faq>
- [6] Sebastian Thrun・Wolfram Burgard・Dieter Fox・上田 隆一 (訳), 確率ロボティクス, 2007 年 10 月
- [7] 井上 誠喜・八木 伸行・林 正樹・中須 英輔・三谷 公二・奥井 誠人, C 言語で学ぶ実践画像処理, 平成 20 年 11 月



## 謝 辞

本研究は伊藤 恒平教授のご指導のもと1年間の金沢工業高等専門学校伊藤研究室での学業の成果をまとめたものです。教授には在学間、終始変わらぬご指導ご鞭撻を賜りましたことを厚くお礼申し上げます。

また、研究室の仲間である伊藤研究室の瀧坂 駿一氏、石橋 俊明氏の皆様には適切なアドバイスをいただきました事を心より感謝いたします。

ご多忙中、貴重な時間を割いてまで今までの経験を元にしたアドバイスをしてくださいました金沢工業大学在籍の植草 健太郎氏には深く感謝いたします。

金沢工業高等専門学校機械工学科教職員の皆様には1年間にわたり、あたたかいご支援・ご援助を頂きました事をここに深く御礼申し上げます。

最後となってしまいましたが、研究費を助成して頂きました玉田工業株式会社代表取締役の玉田善明社長に深謝いたします。本研究は社長のご援助が無ければ立ちゆかぬものでした。有難う御座いました。