

# 目次

第 1 章 緒 言	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	5
1.3 論文の構成	5
第 2 章 つくばチャレンジについて	6
2.1 つくばチャレンジの概要	6
2.2 今年の課題	7
第 3 章 ハードウェアの概要	10
3.1 台車開発の狙い	10
3.2 サスペンションの概要	10
3.3 台車の概要	11
3.4 サスペンションの配置	12
3.5 ばねのストロークの算出	12
3.6 ばね定数の算出	14
3.7 ロボットの構成	16
3.8 ロボットの外観	17
3.9 システムの構成	17
3.10 使用したライブラリ	19
3.11 低重心化の実現	19
3.12 超堤・超壕能力	19

第 4 章	単眼カメラによる三次元測量	21
4.1	カメラの幾何学	21
4.2	三角測量の原理	21
4.3	単眼カメラによる三角測量	22
4.4	射影変換行列の算出	22
4.5	移動量の取得	23
第 5 章	マップ生成	25
5.1	マップ生成環境	25
5.2	マップ生成	26
5.3	移動量のばらつき	26
第 6 章	結言	28
6.1	本研究のまとめ	28
6.2	今後の課題	28
参 考 文 献		30
謝 辞		31

# 第 1 章

## 緒言

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 安定性の改善

前年度,つくばチャレンジで使用したロボットの重心が高かったため,凸凹道やコンクリートなどでロボットが傾きそのまま転倒する恐れがあった.そのため,前年度の問題点を元に転倒しても走行可能なロボットの開発を試みた.だが,今年度のつくばチャレンジに参加するにあたり,ロボットの高さ制限を満たし,転倒しても走行可能な機構の開発ができなかった.よって今回はロボットの走破性を高めることで,転倒しにくいロボットの開発を行った.

#### 1.1.2 自己位置の推定

ロボットが自律走行を行うためには,自身の位置を推定する必要がある.その手段としてローカルマップをグローバルマップに変換する方法が主流である.これはロボットが何らかの方法で周辺の情報を得る必要があり,一般的に測域センサや地磁気センサが用いられることが多い.また,近年はカメラを用いた信号認識など視覚情報を用いた研究が活発である.そこで今回は低コストで省スペース化が期待できる単眼カメラを用いることにした.

### 1.1.3 三角測量とカメラの移動量

ローカルマップを生成するために周囲との位置関係を求める必要がある。カメラでは対象物を写した2枚の画像とそれらの画像間距離から三角測量の原理を用いることで対象物からカメラまでの距離を計測することができる。以下にその原理を図??として示す。図のように三角測量を行う際には2つのカメラを用いるのが一般的だ。だが今回はカメラを移動させ過去の位置で取得した画像を利用することで単眼カメラで三角測量を行えるようにした。この原理を図 1.2 に示す。図 1.2 より、カメラ間の距離はカメラの移動量に等しい。これらからカメラの移動量を設定し、三角測量によって学校の廊下を復元したものを図??に示す。図??より廊下の形状ほぼ再現出来ているため、カメラの移動量を取得することができれば対象物との位置関係が分かる。

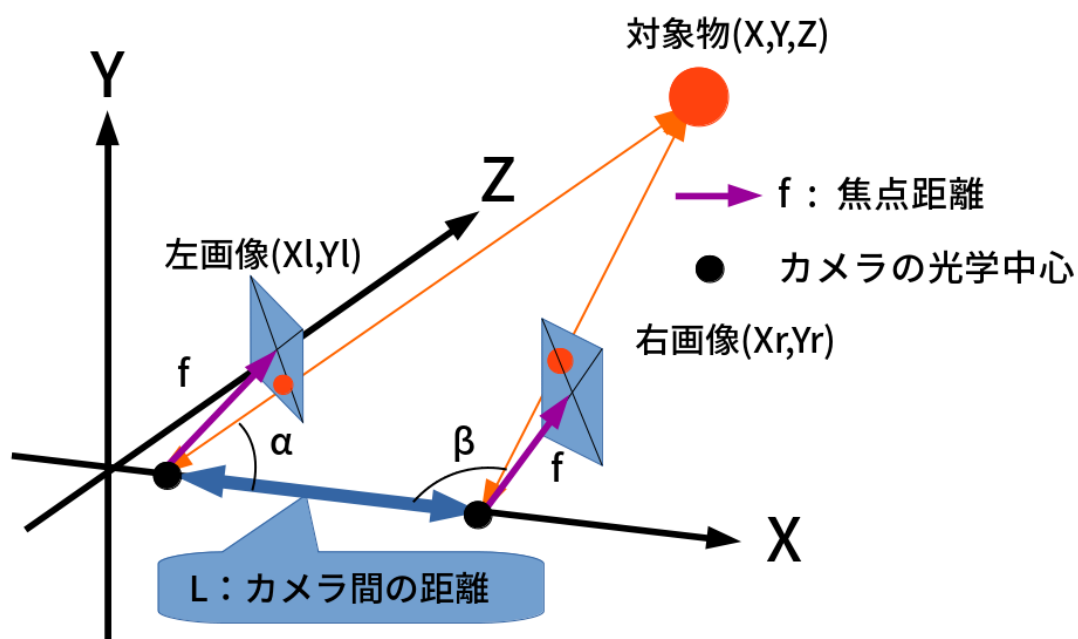


図 1.1 三角測量の原理

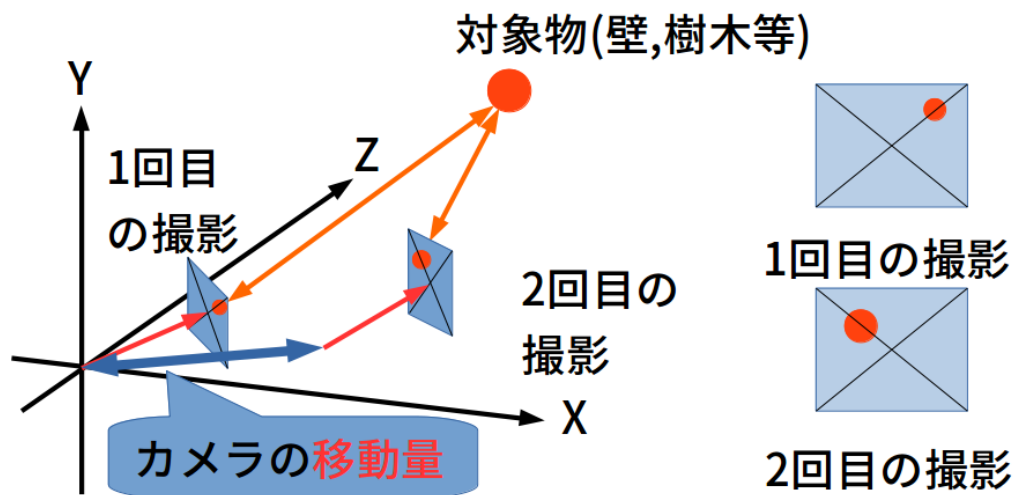


図 1.2 単眼カメラでの三角測量

## 1.2 研究の目的

今年度は走破性の向上を考え、前年度の改善案として低重心化とそれを補佐する懸架装置に注目し、“超低重心6輪独立懸架ローバー”を開発する。またカメラの移動量をモーションセンサから得られる位置情報によって取得し、三角測量を行う。これを複数回行い、得られたデータをマップとする。

## 1.3 論文の構成

## 第2章

# つくばチャレンジについて

### 2.1 つくばチャレンジの概要

今年度参加したつくばチャレンジについて説明する。つくばチャレンジとは茨城県南部に位置するつくば市の屋外で行こなわれるロボット実験である。これは人間とロボットの共存する社会の実現のための先端技術への挑戦が狙いである。人間とロボットの共存を目的とするため、ロボットには以下のことが求められる。

- 1) そこにいる人間が安全であること
- 2) そこにいる人間に危害を加えないこと。またそのように取られる不安感を与えないこと
- 3) 環境内に存在するものに手を加えないこと。また環境景観を損なわない外観であること
- 4) 環境内に存在するものの邪魔にならないこと。また、環境内の運動を妨害しないこと

これらの項目が満たされていなければつくばチャレンジでは走行を行うことができない。また、つくばチャレンジではその走行に対して課題が与えられる。以下につくばチャレンジのコースを図2.1として示す(つくばチャレンジ2016の課題より参照)。



### 2.2.1 全体のコース

本コースのスタート地点は図 2.1 の右下に位置するつくば市大清水公園東側の歩道をスタート点とし、公園内を反時計回りに周回する。コースは大清水公園から遊歩道へと進み、更に北上してつくばセンター広場へと出る。この広場の東側を探索エリアと呼ぶ。センター広場から北上し、途中左折して中央公園に入り、公園内を反時計回りに周回する。中央公園内の周回途中で、一旦右折して信号機付の横断歩道を渡る。そして北 1 駐車場脇で折り返し、再度横断歩道を渡り中央公園に戻る。中央公園を周回したあと、再度つくば公園通りの遊歩道に戻り、つくばセンター広場に向かって南下する。センター広場では、西側にある BiVi つくば（つくばバスターミナルビル）の 2 階の自動扉を通り、その中を通り抜ける。そのまま遊歩道を南下大清水公園に戻る。大清水公園入口のつくばカピオ前がゴールである。

### 2.2.2 コース環境

本大会のコースはつくば市民が日頃生活をしている生活環境である。したがって日常のように人や自転車が通行している。つくばチャレンジでは危険防止のため安全責任者を各チーム内から定め、ロボットの走行時には通行人や見物人に注意を呼びかける。

ロボットの走行エリアと市民の歩く領域は区別されない。天候は当日の天候状況によるが、小雨程度であれば滞り無く開催される。また路面や環境の状況（落ち葉、水たまりなど）も前日やそれ以前の天候、または社会的条件（お祭りなど）に大きく影響を受ける。

ロボットは環境内にもともと存在する街路樹や縁石柵あるいは建物を走行のガイドとして用いるのは自由であるが、ロボットの走行の為に新しくガイドとなるものを設置することや、環境を改変することは許されない。



### 2.2.3 ロボットに必要な機能

つくばチャレンジは人間が暮らす環境である。人間は多少の凸凹や路面のひび割れ、フレーチングの溝などの障害は問題なく歩行できる。だが、ロボットは人間のようにフレキシブルではない、段差で転んだり溝にハマることが大いに考えられる。よって走行の際に必要なロボットの機能として悪路が走行できる、溝に嵌っても自力で這い上がることができる等路面走行に対してフレキシブルに対応することが求められる。

## 第3章

# ハードウェアの概要

### 3.1 台車開発の狙い

サスペンションを内蔵する台車を制作する. つくばチャレンジ2016では走破性向上を目的として低重心を目標としているため, 台車の全高を小さく設計することでその目標に尽くす. また今回のロボットの超低重心を実現するための数値を表3.1に示す

表 3.1 目標数値

横幅	600mm 以内
長さ	1000mm 以内
高さ	150mm 以内
乗り越える段差	およそ 30mm

### 3.2 サスペンションの概要

製作するロボットはある程度の段差を超えるための上下できる機構が必要である. よって近年最も身近な上下機構を持つ機械として, 車に利用されるサスペンションを参考にした. 図3.1に示すダブルウィッシュボーン式サスペンションは上下のアームとショックアブソーバ, バネからなるもので, レーシングカーに多く使用されている. 図3.2に示すストラット式サスペンションと呼ばれるものはショックアブソーバ

とサスペンションを一体化したものをアップーアームにしたもので、近年の車やミニ四駆などに使用されている。両方とも独立懸架で安定性や利便性に置いてはストラット式が大きく優るが、今回はコンパクトに構成することも必要なため、もともと上下アームで囲われているスペースを活かせることができそうなダブルウィッシュボーン式サスペンションを基礎として開発する。

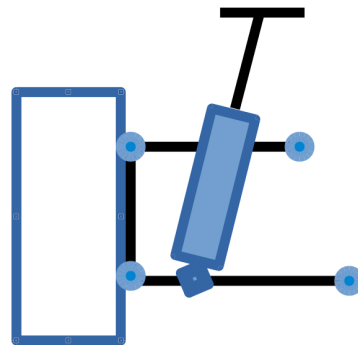


図 3.1 ダブルウィッシュボーン式サスペンション

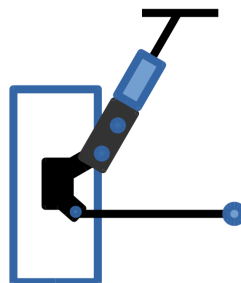


図 3.2 ストラット式サスペンション

### 3.3 台車の概要

製作する ”超低重心6輪独立懸架ローバー”(以下6輪ローバ)は図 3.3 に示すとおり低重心であるがゆえにロボットそのものが平たく大きい物になる。そのままではメンテナンス性にかける他、運搬時に非常に不便なため、モータを持つドライブモジュール(以下Dモジュール)と指示

塔であるコントロールモジュール(以下Cモジュール)に分解できるように台車を設計し,分解から組み立てを容易とするようにした.つまり2つのDモジュールと1つのCモジュールからなる1つの台車である.

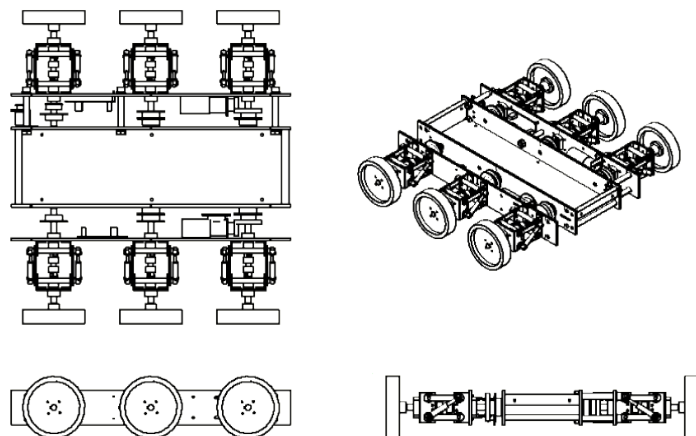


図 3.3 6輪ローバ

### 3.4 サスペンションの配置

台車の全高は小さくなるため,サスペンションの配置は小スペースに収めることが必要になる.そこで図 3.4 のように軸棒,ユニバーサルジョイント,車輪を上下のリンクと板を用いて1つの平行リンクをつくり,その平行リンクの両斜辺に2つ直接斜めに振動吸収となるばねを設置すれば車輪の径に左右されるものの従来のものよりスペースが小さく上下機構が得られるのではないかと考えた.

### 3.5 ばねのストロークの算出

図 3.5 に平行リンクの簡易図を示す.また平行リンクが移動した際の図を図 3.6 示す.これらの数値よりサスペンションのストロークの長さを求める.サスペンションの全体長さは斜辺に設置するため余弦定理より

$$AC = b^2 = a_1^2 + c^2 - 2a_1 \cdot c \cdot \cos \angle B \quad (3.1)$$

$$b = \sqrt{38^2 + 60^2 - 2 \cdot 38 \cdot 60 \cdot \cos 90} \quad (3.2)$$

$$= 71.022 \quad 71.0[mm] \quad (3.3)$$

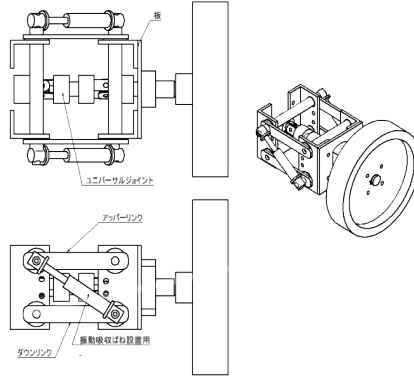


図 3.4 平行リンク

となる. また今回は 30[mm] 程度の障害物を乗り越える想定しているため, この平行リンクが点 A,B を回転軸として点 C,D が 30[mm] 上昇した際の平行四辺形の斜辺 AC' を求める必要がある. 平行リンクが移動してできる AC'E の斜辺 AC' は AD'E の辺 d' に等しい. よって AC' の式は余弦定理と代入法より

$$AE = d' = \sqrt{a_2^2 + e_1^2 - 2a_2 \cdot e_1 \cdot \cos \angle D} \quad (3.4)$$

$$d' = c' \quad (3.5)$$

$$AC' = e_2 = \sqrt{c'^2 + a_3^2 - 2 \cdot c' \cdot a_3 \cdot \cos \angle E} \quad (3.6)$$

となる. また AD'E の

$$\angle A$$

は 30[mm] 上がった際に 30[deg] になることから, 斜辺 AC' は

$$d' = \sqrt{30^2 + 60^2 - 2 \cdot 30 \cdot 60 \cdot \cos \angle 60} \quad (3.7)$$

$$d' = 30\sqrt{3} = c' \quad (3.8)$$

$$AC' = e_2 = \sqrt{c'^2 + a_3^2 - 2 \cdot c' \cdot a_3 \cdot \cos \angle E} \quad (3.9)$$

$$AC' = \sqrt{(30\sqrt{3})^2 + 8^2 - 2 \cdot 30\sqrt{3} \cdot 8 \cdot \cos 90} \quad (3.10)$$

$$= 52.574 \quad 52.6[\text{mm}] \quad (3.11)$$

となる.

サスペンションは伸縮するものであり, それはこれらの辺 AC と辺 AC' の差分だけ変化することになる. 今回の値から変化値 x 18[mm] 程度の変

化があることが確認された. 以上の  $AC, AC', x$  を用いてサスペンションの細かい設計を行う.

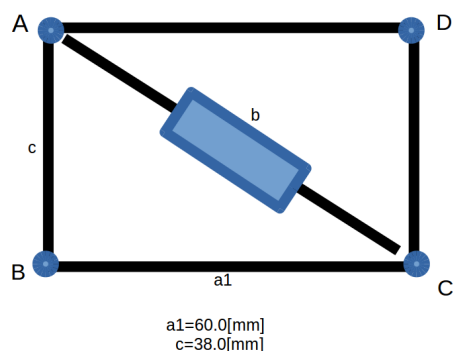


図 3.5 平行リンク簡易図

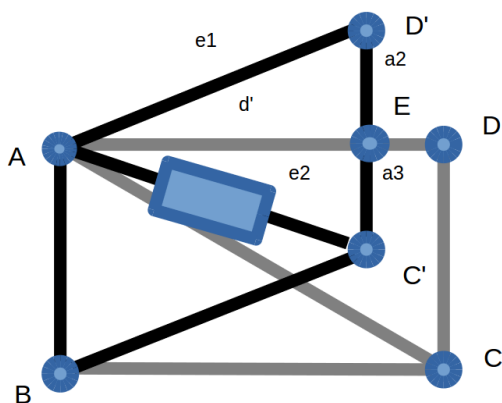


図 3.6 平行リンクの移動量変化

### 3.6 バネ定数の算出

サスペンションには路面の凹凸を車体に伝えない緩衝装置としての機能としてばねが必要であるため,フックの法則よりばねを選定する. 平行リンクの点 A,B をそれぞれ固定支点と考えて計算を行う. 図 3.7 に Free Body Diagram(FBD) を示す. 図 3.7 よりスラスト方向荷重  $x$ , ラジアル方向荷重  $y$ , モーメント  $M$  の式はそれぞれ

$$x = R_A X + R_B X = 0 \quad (3.12)$$

$$y = R_A Y + R_B Y + F = 0 \quad (3.13)$$

$$M = BC \cdot F - AB \cdot R_A X = 0 \quad (3.14)$$

となる. 更に点 A,B,C それぞれの力は以下のようになる.

### 3.6.1 点 A での力学計算

点 A では図 3.8 より以下のように計算できる.

$$R_A X + FAC \cdot \cos \theta = 0 \quad (3.15)$$

$$R_A Y = FAC \cdot \sin \theta \quad (3.16)$$

### 3.6.2 点 B での力学計算

点 B は図 3.8 より以下のように計算できる.

$$R_B X + FBC = 0 \quad (3.17)$$

$$R_B Y = 0 \quad (3.18)$$

### 3.6.3 点 C での力学計算

点 C は図 3.8 より以下のように計算できる.

$$FAC \cdot \cos \theta + FBC = 0 \quad (3.19)$$

$$F + FAC \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.20)$$

### 3.6.4 力学計算まとめ

上記で求めた式より, AC にかかる力 FAC の式を計算する. FAC は式 (14) と式 (18) より

$$R_A Y + F = 0 \quad (3.21)$$

$$F = -R_A Y \quad (3.22)$$

$$R_A Y = FAC \cdot \sin \theta \quad (3.23)$$

$$FAC = \frac{F}{\sin \theta} [N] \quad (3.24)$$

$$F + FAD \cdot \sin = 0 \quad (3.25)$$

$$FAC = \frac{F}{\sin} [N] \quad (3.26)$$

となることを確認できる.

力 FAC[N] はばね全体に掛る力なので,これをばね1個辺りに加わる力に除算する必要がある.今回作成する6輪ローバは1輪に2つのばねを持つため,ばねを合計で12個保有する.よってばね1個にかかる力 FAC[N] は

$$FAC = \frac{F}{\sin} \cdot \frac{1}{12} [N] \quad (3.27)$$

となる.今回は重量が15kgになると想定して,ばね定数を求めると

$$FAC = \frac{F}{\sin} \cdot \frac{1}{12} \quad (3.28)$$

$$FAC = \frac{15 \cdot 9.81}{\sin 30} \cdot \frac{1}{12} [N] \quad (3.29)$$

$$= 24.525 [N] \quad (3.30)$$

これより

$$k = \frac{F}{x} \quad (3.31)$$

$$k = \frac{24.525}{18} \quad (3.32)$$

$$= 1.3625 [N/mm] \quad (3.33)$$

となる.よってばね定数は1.0[N/mm]の物を採用する.

### 3.6.5 使用したばね定数

上記でばね定数を求めたが,実際に使用した際に車体が沈むのが確認された.想定していた15kgを超えたせいだと考えられる.車体を沈ませないこと,また段差を超えるため車体を浮かせるために2,3N/mmの物を用意し,使用した.結果的に2N/mmは沈まなかったがばねが反発しなかったため,3N/mmのばねを使用することとなった.

## 3.7 ロボットの構成

今年度のロボットに搭載したセンサを以下の表3.4に示す.



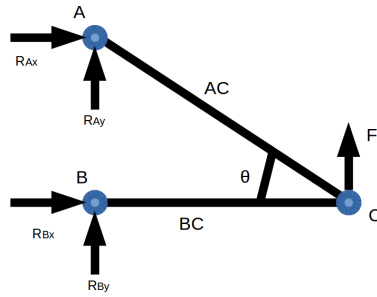


図 3.7 FBD

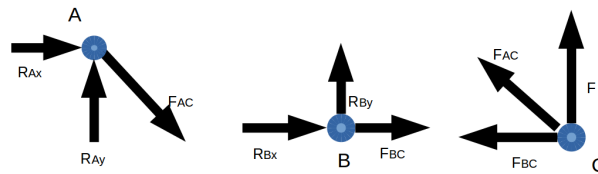


図 3.8 各点にかかる力

表 3.2 ハードウェアの構成

構成要素	メーカー・型番・スペックなど
Mian PC	NVIDIA JETSON TK1
OS	Ubuntu 14.04 LTS
camera	Panasonic HX-A1H
Buttery	KyPOM KT5100 4S 35C
Motor	MABUCHI MOTOR RS-555VC-5524
Motion Sensor	東京航空計器株式会社 CSM-MG100

## 3.8 ロボットの外観

以下の図 3.9 にロボットの外観を示す. また, 車体の仕様を表 3.3 に示す

## 3.9 システムの構成

ロボットのシステム構成を図 3.10 に示す. Nvidia TK1 jetson を USB ハブに接続し, そこから各センサ類に接続する. 得られたデータは USB ハブを介

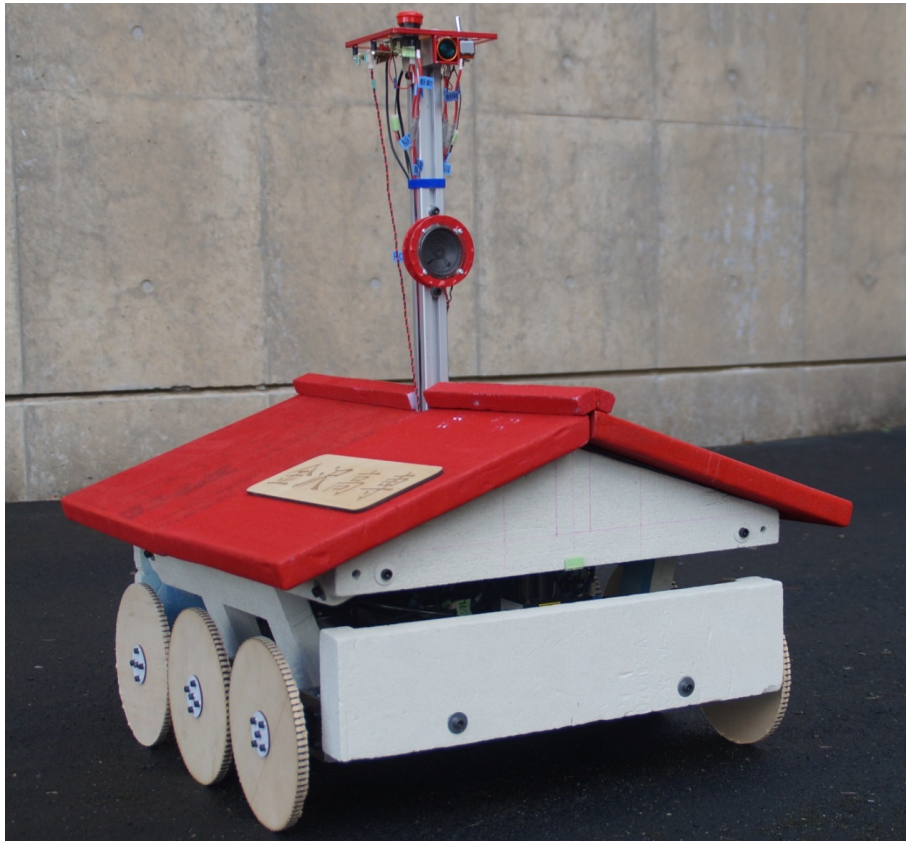


図 3.9 ロボットの外観図

表 3.3 車体の仕様

全高	72[cm]
全長	58[cm]
車幅	61[cm]
重量	20.6[kg]
駆動形式	6 車輪 2 輪駆動
タイヤ径	直径 19[cm]
使用モータ	MABUCHI MOTOR RS-555VC-5524
最大速度	4[km/h]

して Nvidia TK1 jetson に送信され, モータ類に指令を与える.

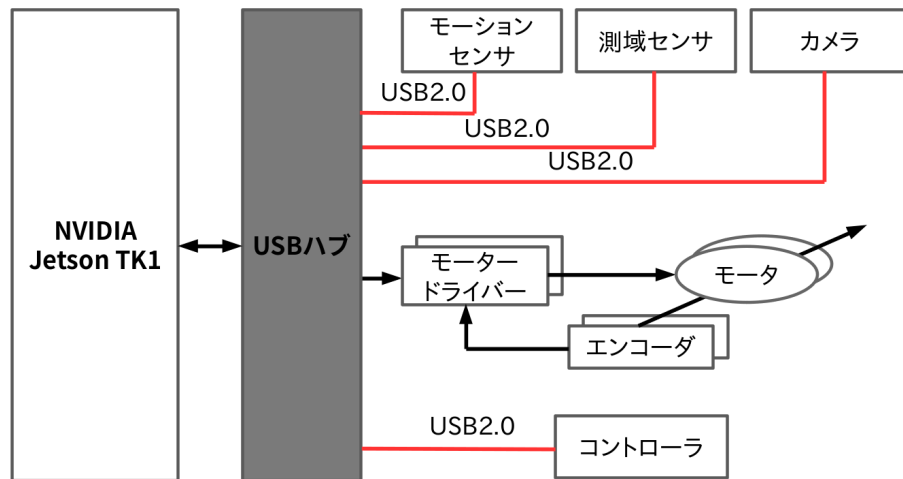


図 3.10 システム構成

表 3.4 使用したライブラリ

ライブラリ	使用用途
OpenCV 3.00	画像処理
Point Cloud Library 1.7	点群管理
urg library 1.2.0	障害物回避

### 3.10 使用したライブラリ

### 3.11 低重心化の実現

設計した走行モジュールのCADを図3.11に示す。図から確認できるように全高がタイヤ直径である190mm内に収まっているため低重心化が達成された。また6輪に付属している懸架装置を図3.12に示す。ばねを2本設置することでサスペンションとし、またそれらの取り付け位置を斜めにする事でさらに低重心が可能となった。

### 3.12 超堤・超壕能力

今回作成したロボットの性能を調査するため、超堤・超壕実験を行った結果、超堤:110[mm]、超壕 220[mm] が得られた。

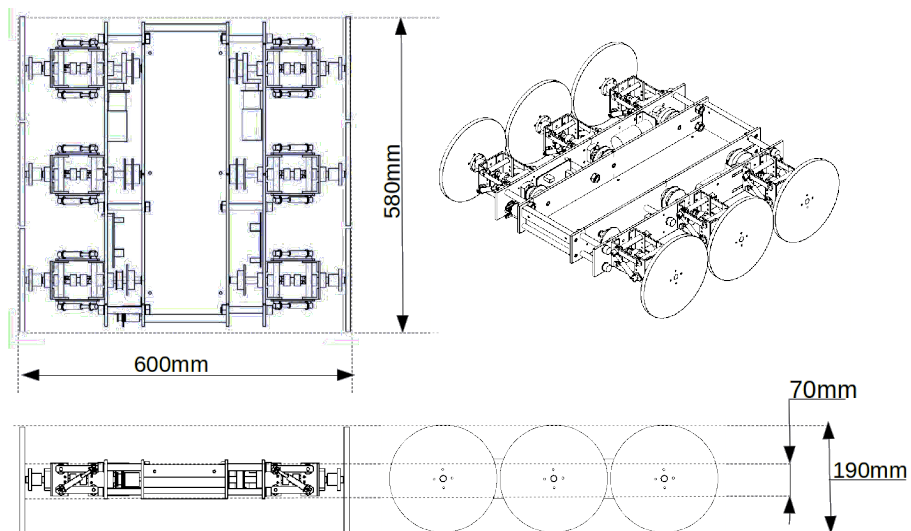


図 3.11 走行モジュール

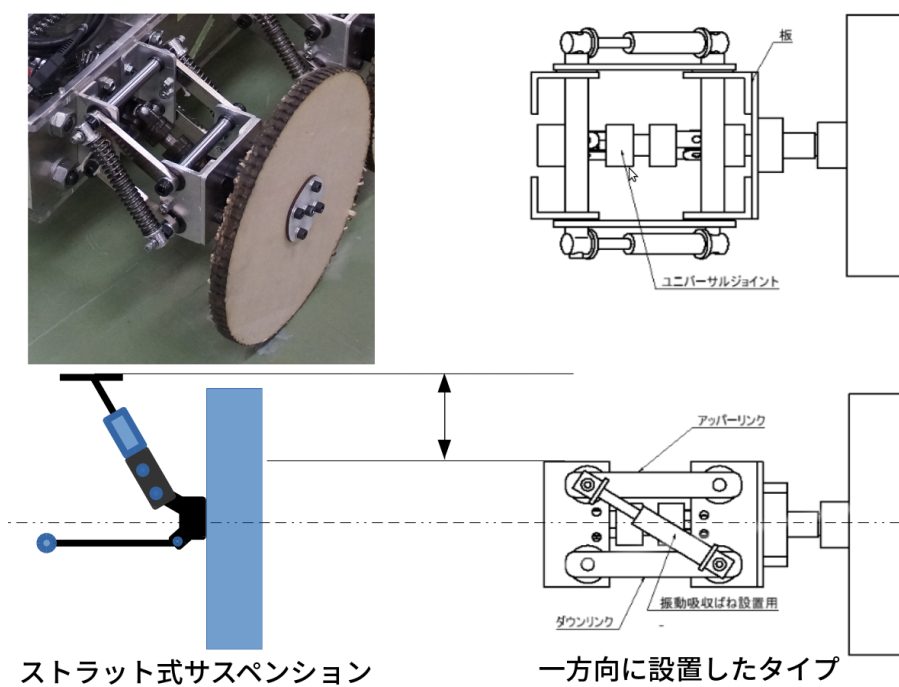


図 3.12 懸架装置

## 第 4 章

# 単眼カメラによる三次元測量

### 4.1 カメラの幾何学

カメラの姿勢を並進・回転行列で表したものを外部パラメータ行列という。また、カメラの焦点距離や

### 4.2 三角測量の原理

三角測量とは座標が既知の 2 点とそれらの点間距離、それぞれの点と対象物との角度から正弦定理を用いて対象物の座標を得るものである。カメラでは対象物を写した 2 枚の画像と射影変換行列から三角測量を行うことができる。以下にその原理を図??として示す。図より三角測量の原理を用いて対象物の座標は以下の式で求めることができる。

$$X = \frac{L(X_l + X_r)}{2(X_l - X_r)} \quad (4.1)$$

$$Y = \frac{L(Y_l + Y_r)}{2(X_l - X_r)} \quad (4.2)$$

$$Z = \frac{fL}{X_l - X_r} \quad (4.3)$$

よって射影変換行列とカメラ間の距離を求めることで対象物の座標がわかる。

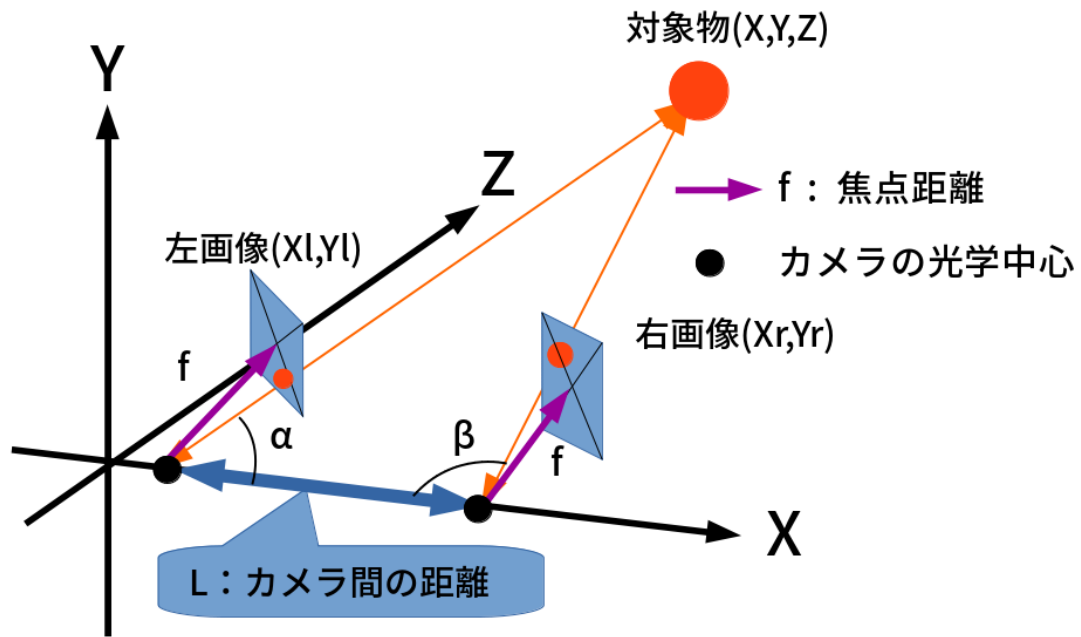


図 4.1 三角測量の原理

### 4.3 単眼カメラによる三角測量

図??のように三角測量を行う際には2つのカメラを用いるのが一般的だ。だが今回はカメラを移動させ過去の位置で取得した画像を利用することで単眼カメラで三角測量を行えるようにした。この原理を図1.2に示す。図1.2より、カメラ間の距離はカメラの移動量に等しい。また、カメラが定点でなく移動するため射影変換行列も変化する。

### 4.4 射影変換行列の算出

#### 4.4.1 内部パラメータ行列の算出

キャリブレーション

#### 4.4.2 外部パラメータ行列の算出

OpenCVでは外部パラメータ行列を求めることができる関数が用意されている。この関数は5点法[3]を用いており、内部パラメータ行列、2枚の

画像の対応付けられた点の座標を与えることによって外部パラメータ行列を算出することができる。

#### 4.4.3 特徴点抽出と対応付け

SURF と knnmatch

#### 4.4.4 射影変換行列の算出

### 4.5 移動量の取得

カメラの移動量を取得するため、東京航空計器社製のモーションセンサーから得られる位置情報を使用する。モーションセンサーを図 4.2 に示す。1 回目に取り得た位置と2回目に取り得た位置の差から移動量を算出する。



図 4.2 モーションセンサー

#### 4.5.1 座標変換

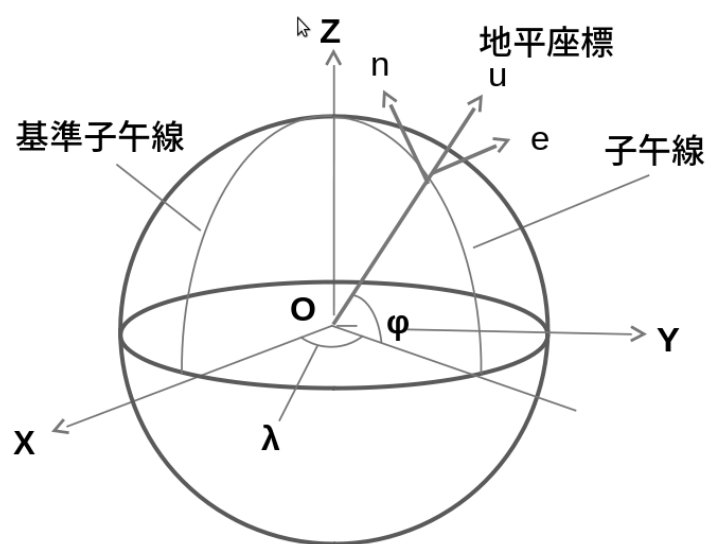


図 4.3 地平座標への変換



## 第 5 章

# マップ生成

### 5.1 マップ生成環境

マップの生成環境を図 5.1 に示す. 天候はカメラ画像に影響の少ないくもりの日, 画像間距離を 1.4[m] として金沢工業高等専門学校の駐車場付近でマップ生成を行った. ロボットは Start 地点から矢印の方向に進み, 2 回の旋回を経て Goal 地点まで走行する.

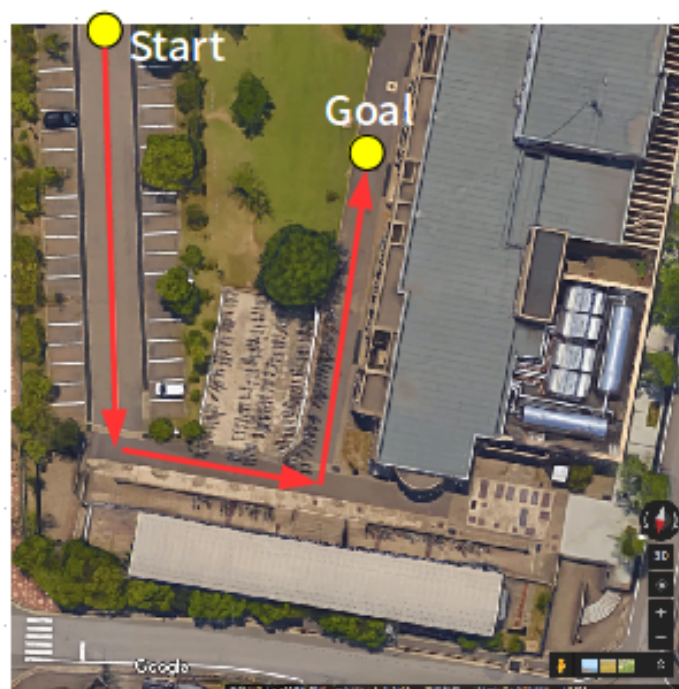


図 5.1 マップ生成環境

## 5.2 マップ生成

生成されたマップを図 5.2 に示す. 赤い点群はカメラ画像から三角測量によって得られた周囲の位置関係, 青い線はカメラ画像から得られたロボットの走行軌跡, 黄色い線を実際にロボットが走行した軌跡である. 図より, カメラ画像からマップを生成することができた. しかしカメラ画像から得られたロボットの走行軌跡は1回目の旋回時から, 実際にロボットが走行した軌跡と比べて大きく歪んでいることが確認できる.

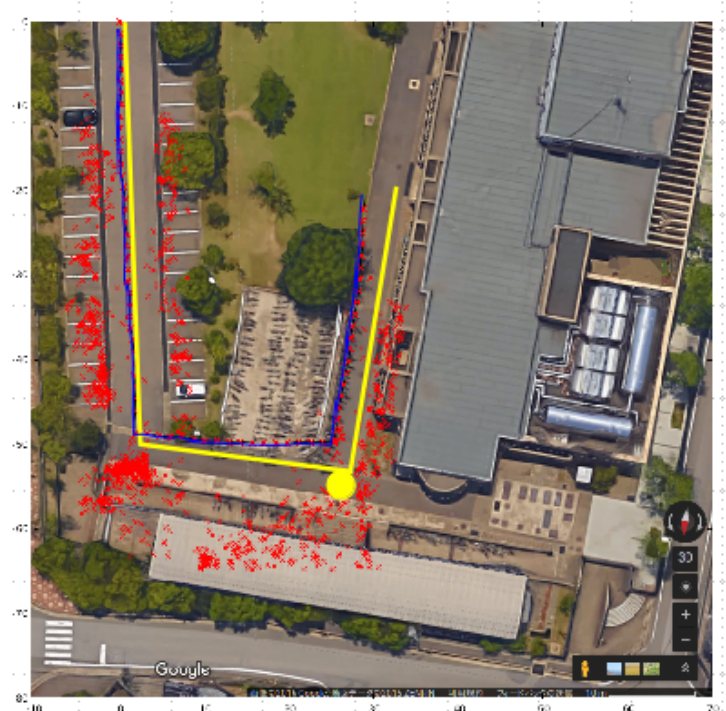


図 5.2 生成したマップ

## 5.3 移動量のばらつき

マップ生成を行った際にモーションセンサーから得られた移動量のばらつきを図 5.3 に示す.

図を見て分かるとおり, 駐車場側では取得した移動量が真値から増減しているためマップ生成をした際のズレが小さい. しかし建物側に近づくに連れて取得した移動量が真値よりも大きく増加してしまってい

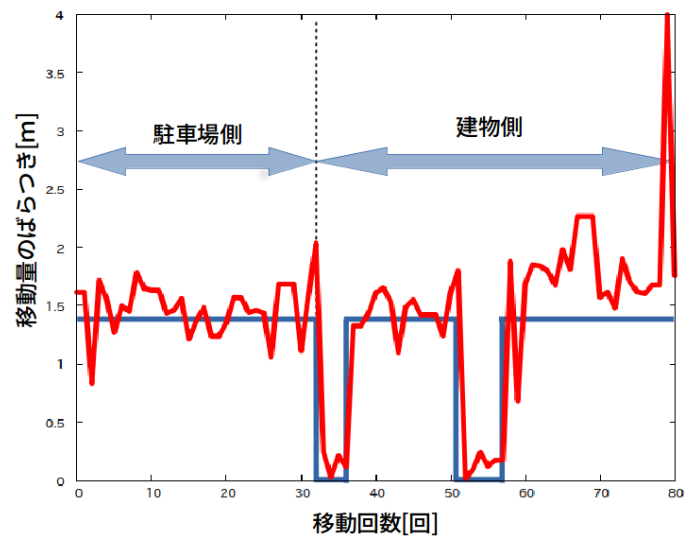


図 5.3 移動量のばらつき

る. また旋回時は移動を行っていないため移動量は 0[m] になっている必要があるのに対し, 取得した移動量は 0[m] になっておらず, これらの原因によってマップ生成の際にズレが発生してしまったと考えられる.

## 第 6 章

# 結言

### 6.1 本研究のまとめ

走破性の高いロボットの開発の実現にあたり,つくば市内での走行が問題なく行えたため,走破性の高いロボットの開発は達成したと考える.また移動量の取得とマップ生成の実現にあたり,生成したマップは旋回時に大きく歪むことが確認されたが直線時には問題がなかったため3次元復元技術の基礎は確立できたと考える.

### 6.2 今後の課題

#### 6.2.1 自己位置推定と自律走行

#### 6.2.2 タイヤ素材検討

ロボットのタイヤは木材で作成している.その理由は,ロボットに合うタイヤが見つからず,金沢高専に新しく導入されたレーザー加工機の試験的運用を兼ねて木材で作成した.しかし木材のタイヤでは路上を走行した際に削れる,滑るなどの問題が発生し,タイヤの交換が必要となってしまう.よって削れる,滑ることのないタイヤ素材の検討が必要である.

#### 6.2.3 屋内対応

今回我々は移動量を取得するためにGPSから得られる位置情報を使用しているため,GPSを取得することができない屋内などでは移動量を取得

することができない.そこで我々が使用したモーションセンサーは位置情報以外にも加速度や姿勢なども取得することができるため,これらのセンサー情報から屋内でも移動量を取得し屋内マップを生成する.

#### 6.2.4 全天候性の付与

現状では,カメラで周囲の環境を撮影した際に天候によっては周囲の環境を上手く写しだすことができない可能性がある.写り方によってはマップを生成できないため,写り方が天候によって作用されない手段を考える必要がある.

# 参考文献

- [1] Bradski,Kaehler:詳 解 OpenCV,433, 株 式 会 社 オ ラ イ リ ー ・ ジ ャ パ ン (2012)
- [2] 理 解 す る た め の GPS 測 位 計 算 プ ロ グ ラ ム 入 門,<http://www.enri.go.jp/fks442>
- [3] 初 期 値 推 定 付 非 線 形 最 小 二 乗 法 に よ る 5 点 法 の 解 法

# 謝辞

本論文作成にあたりテーマの決定, 研究の考え方, 方法のまとめ方など全てにおいて長期にわたって厳しくも熱意のあるご指導, ご鞭撻していただいた, 伊藤恒平教授に厚く御礼申し上げます.

特に分析においても論文の書き方においても論文を何度も読んでいただき, 指導していただいた伊藤恒平教授に大変ご苦勞をかけてしまいましたことにも心よりお詫び申し上げます.

同級生のメンバーには論文の作成, 修正にご協力いただき心より感謝しております. その他、助けていただいた多くの皆様に心から感謝しております. ありがとうございました.