

つくばチャレンジにおいて画像情報からの自律走行

畠中 和久, 佐々井 翔也, 戸澗 健, 伊藤 恒平 (金沢工業高等専門学校)

Autonomous travel from the image information for Tsukuba Challenge

Kazuhisa HATAKENAKA, Shoya SASAI and Takeru TOMA

Abstract : 自律走行するロボットには安定した走りや悪路での振動の小ささ, そしてコンパクトである事が大切になる. しかし車輪を大きくすると安定性はあるがコンパクトでない. 今回参加するつくばチャレンジでは市街の走行であり, 信号を渡る際のスロープや路上のコンクリート, タイルなどの凸凹道を転倒せずに安定して走行できるロボットの開発が必要である. そこで今年は重心を低くすることで走行に安定性を持たせることを目的として独立懸架の 6 輪のローバー型ロボットを製作する. また, 自動車などを中心に自動運転技術が発展してきている. それに伴い画像処理によって自身の位置を認識する技術の需要が高まっている. そこで, 今回は OpenCV (正式名称: Open Source Computer Vision Library) という画像や動画を処理することに適しているオープンソースのコンピューター・ビジョン・ライブラリを用いて自身の位置を特定する仕組みを作成, ルート上の自己位置を認識しズレを修正しながら走行することでつくばチャレンジ完走を目的とする.

1. はじめに

前年度つくばチャレンジ 2015 では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に傾きが発生しそのまま転倒しかける様子が見られた. そこで, 今回は地域住民に怪我や事故が発生しないようなロボットの走行方法と低重心の安定性に注目し, "超低重心 6 輪独立懸架ローバー" を制作する. また, 自律走行を実現するために自身の位置を認識する手段が必要である. その手段としてカメラを用いることにした. カメラである利点として, 安価である点, 周りの状況がわかる点などが挙げられる. 特に, 周りの状況がわかることで障害物を回避し, その場でマッピングするなど幅広く活用できる.

2. ハードウェアの構成

ハードウェアの構成を Table.1 に示す.

Table. 1: 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. 超低重心 6 輪独立懸架ローバー

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 では安全のための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 Table.2 に示す

Table. 2: 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で行け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. Fig.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, ばねからなるもので, レーシングカーに多く使用されている. Fig.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パ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

ことも必要のため、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。

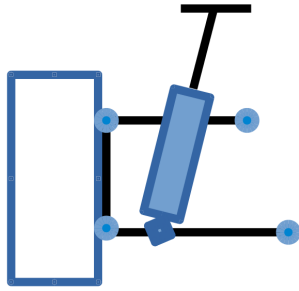


Fig. 1: ダブルウィッシュボーン式サスペンション

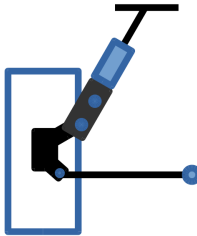


Fig. 2: ストラット式サスペンション

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 Fig.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。

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 Fig.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。

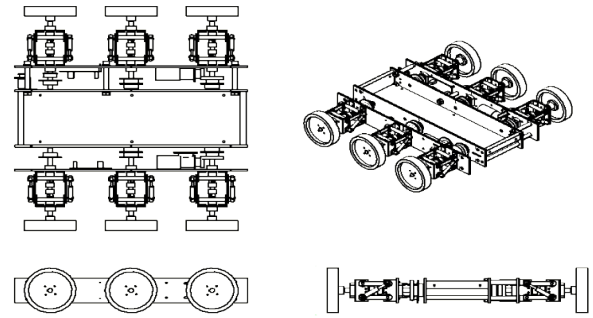


Fig. 3: 6 輪ローバ

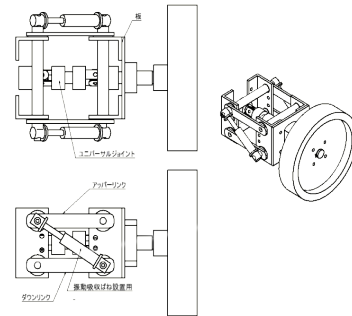


Fig. 4: 平行リンク

3.5 ばねのストロークの算出

Fig.5 に平行リンクの簡易 Fig を示す。また平行リンクが移動した際の Fig を Fig.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

$$AC = b^2 = a_1^2 + c^2 - 2a_1 \cdot c \cdot \cos \angle B \quad (1)$$

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

$$= 71.022 \quad 71.0[mm] \quad (3)$$

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

$$AE = d' = \sqrt{a_2^2 + e_1^2 - 2a_2 \cdot e \cdot \cos \angle D} \quad (4)$$

$$d' = c' \quad (5)$$

$$AC' = e_2 = \sqrt{c'^2 + a_3^2 - 2 \cdot c' \cdot a_3 \cdot \cos \angle E} \quad (6)$$

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

$$d' = \sqrt{30^2 + 60^2 - 2 \cdot 30 \cdot 60 \cdot \cos 60} \quad (7)$$

$$d' = 30\sqrt{3} = c' \quad (8)$$

$$AC' = e_2 = \sqrt{c'^2 + a_3^2 - 2 \cdot c' \cdot a_3 \cdot \cos \angle E} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} AC' &= \sqrt{(30\sqrt{3})^2 + 8^2 - 2 \cdot 30\sqrt{3} \cdot 8 \cdot \cos 90} \\ &= 52.574 \quad 52.6[\text{mm}] \end{aligned} \quad (11)$$

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 $x = 18[\text{mm}]$ 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.

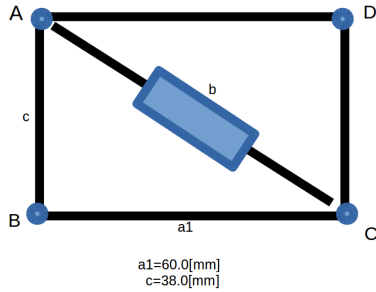


Fig. 5: 平行リンク簡易図

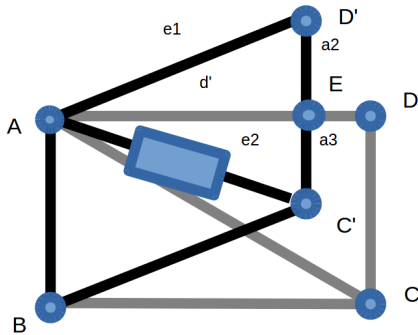


Fig. 6: 平行リンクの移動量変化

3.6 ばね定数の算出

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. Fig.7 に Free Body Diagram(FBD) を示す. Fig.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

$$x = R_A X + R_B X = 0 \quad (12)$$

$$y = R_A Y + R_B Y + F = 0 \quad (13)$$

$$M = BC \cdot F - AB \cdot R_A X = 0 \quad (14)$$

となる. 更に点 A,B,C それぞれの力は以下ようになる.

3.6.6 点 A での力学計算

点 A では Fig.8 より以下のように計算できる.

$$R_A X + FAC \cdot \cos = 0 \quad (15)$$

$$R_A Y = FAC \cdot \sin \quad (16)$$

3.6.6 点 B での力学計算

点 B は Fig.8 より以下のように計算できる.

$$R_B X + FBC = 0 \quad (17)$$

$$R_B Y = 0 \quad (18)$$

3.6.6 点 C での力学計算

点 C は Fig.8 より以下のように計算できる.

$$FAC \cdot \cos + FBC = 0 \quad (19)$$

$$F + FAC \cdot \sin = 0 \quad (20)$$

3.6.6 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

$$R_A Y + F = 0 \quad (21)$$

$$F = -R_A Y \quad (22)$$

$$R_A Y = FAC \cdot \sin \quad (23)$$

$$FAC = \frac{F}{\sin} [N] \quad (24)$$

$$F + FAD \cdot \sin = 0 \quad (25)$$

$$FAC = \frac{F}{\sin} [N] \quad (26)$$

となることが確認できる。

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

$$FAC = \frac{F}{\sin} \cdot \frac{1}{12} [N] \quad (27)$$

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

$$FAC = \frac{F}{\sin} \cdot \frac{1}{12} \quad (28)$$

$$FAC = \frac{15 \cdot 9.81}{\sin 30} \cdot \frac{1}{12} [N] \quad (29)$$

$$= 24.525 [N] \quad (30)$$

これより

$$k = \frac{F}{x} \quad (31)$$

$$k = \frac{24.525}{18} \quad (32)$$

$$= 1.3625 [N/mm] \quad (33)$$

となる。よってばね定数は $1.0 [N/mm]$ の物を採用する。

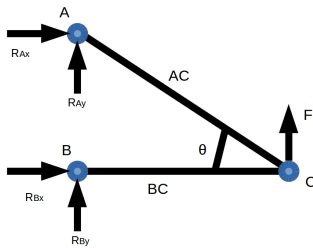


Fig. 7: FBD

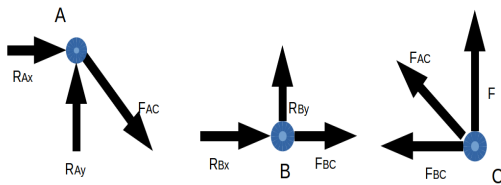


Fig. 8: 各点にかかる力

3.7 走行実験結果

今回作成したサスペンションを用いて台車を試走させたところばねによる衝撃緩和が確認された。しかし、速度の上昇加減によってばねによる振動が発生したのが確認された。

4. 3次元復元

3次元復元とは、画像上の2次元座標から3次元座標を得ることである。これは、カメラの焦点距離と画像のセンター座標を含む内部パラメータ行列を使用して行う。また、 M をカメラの内部パラメータ行列、 $[R | t]$ を並進・回転の同次変換行列としその関係式を下記に示す。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = M[R|t] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{pmatrix} \quad (34)$$

実際の3次元座標はXYZをそれぞれWで割ることにより求まる。

3次元復元の流れを下記に示す。

4.1 カメラの校正

4.1.1 カメラの校正

カメラの校正とはレンズによって生じる歪みやレンズの焦点距離などのパラメータを推定するものであり、OpenCVの校正アルゴリズムではピンホールカメラモデルを想定している。

4.1.1.1 ピンホールカメラモデル

ピンホールカメラとはピンホール（光学中心）を開けた箱の内側に外界の風景を上下左右反転して映ることを利用した初期のカメラである。そして、ピンホールを通る光線だけで投影面への結像をモデル化したのがピンホールカメラモデルであり、そのモデルを図1に示す。

fig9よりピンホールを通過した光線は画像面の1点と交わり、そこで像を結ぶ。この像は元の画像を逆転させたものになるため画像面を光学中心より前に移すと良い。また画像面を移すことを透視投影と呼ぶ。

4.1.1.1 透視変換

カメラの結像に関する座標系を Fig.10, カメラと画像の座標系を Fig.11 に示す。

光学中心 O_c から画像面までの距離（焦点距離）を f とすると、この座標系で (x,y,z) にある空間の点に対応する像は相似の関係 $(fx/z, fy/z, f)$ となる。画像面上の点 $(fx/z, fy/z)$ の透視変換は

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{f}{z} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (35)$$

となる。つまり、カメラに対する相対的な位置によって、結像される位置が決まる。

4.2 Essential Matrix を求める

Essential Matrix(E) とは 2 つのカメラを実空間で関連付ける、平行移動と回転に関する情報を含む行列である。また、Essential Matrix を下記に示す。

$$E = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{pmatrix} \quad (36)$$

OpenCV で Essential Matrix を求める際に利用されている手法は 8 点法 [1] もしくはその改良版の 5 点法である。カメラのパラメータが既知の場合、5 点法を用いることで Essential Matrix を求めることができる。

4.3 回転行列・並進行列を求める

回転行列 R は 3×3 、並進行列 t は 3×1 の行列で表される。式 3 より Essential Matrix は回転行列 R と並進

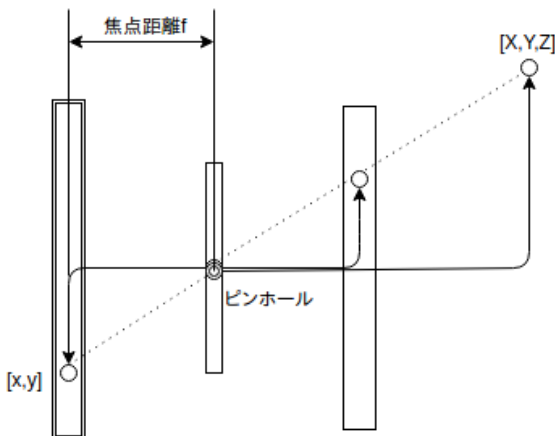


Fig. 9: ピンホールカメラモデル

列 t を 1 つにまとめた 4×4 の行列 $[R | t]$ で構成されていることが分かる。よって Essential Matrix を分解することにより、回転行列 R と並進行列 t を求めることができる。

4.4 三角測量

対応付けされた 2 点間の座標と並進、回転を求めることで Fig.12 のように二次元座標を三次元復元することができる。

左画像の中心 Q_L 、右画像の中心 Q_R 、特徴点 P をつなげることで三角形を作ると、特徴点 P の座標は式 4、式 5、式 6 のような関係が成り立つ。

$$x = \frac{R \cdot d \cdot x_L}{X_L - X_R} \quad (37)$$

$$y = \frac{R \cdot d \cdot y_L}{X_L - X_R} \quad (38)$$

$$z = \frac{R \cdot d \cdot f}{X_L - X_R} \quad (39)$$

式 4、式 5、式 6 より、特徴点 P の三次元座標を得ることができる。

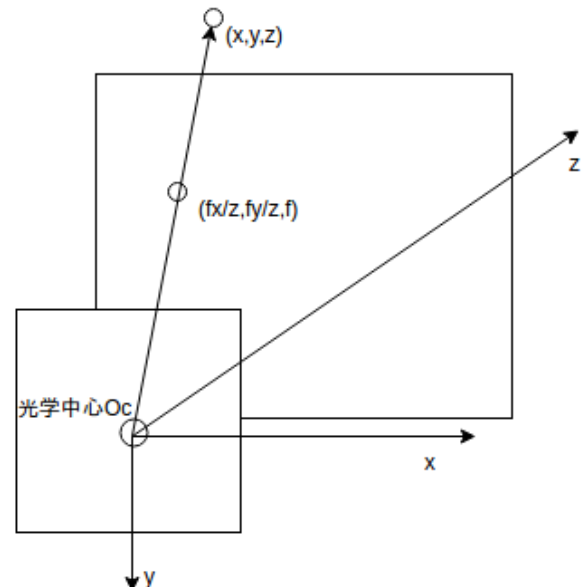


Fig. 10: カメラの結像に関する座標系

5. 考察

サスペンションが正常に機能するならば、つくば市街の道路を安定的に走行することが期待できる。更に今回の走行速度は $1\text{km/h}(0.28\text{m/s})$ という低速なため、ばねのみでもさほどの問題は感じられないと考える。また、カメラで3次元復元を行い得られた座標情報は、対応付けられた点情報とカメラの内部パラメータが正確であれば正しいといえる。さらに、座標情報が正確であれば地図データや現在の位置も正確に求まる。また、カメラの内部パラメータは校正により求まる。よって、対応付けられた点情報の正確性を高めることが最も重要であると言える。

6. おわりに

今回作成したダブルウィッシュボーン式サスペンションを基にしたサスペンションは小さい範囲に機能を積むことで本体の低位置を確立し、走行する上での障害物に対する振動を小さく抑えることができた。しかし今回はスペース

と加工工程の都合上ショックアブソーバの取り付けができなかったため、高速度での使用になるとばねが伸縮し続け、本体が弾むことが予想される。その問題を解消するため、ショックアブソーバの取り付けがこれからの課題となる。また、カメラによる3次元復元では地図を作成することに成功した。地図データと3次元復元で得た自己位置のデータを比較し、より正確な位置情報を得ることが今後の課題である。

7. 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)

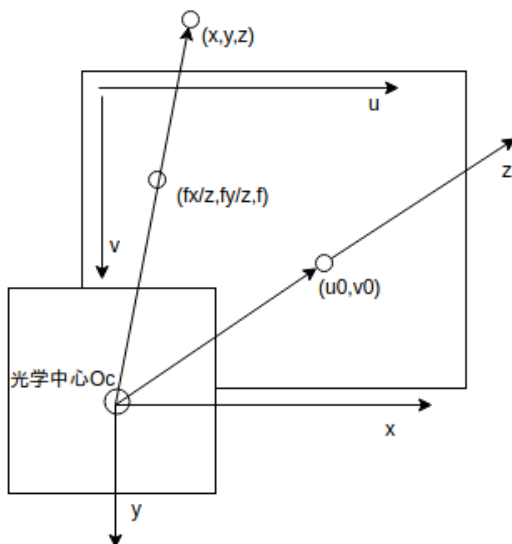


Fig. 11: カメラと画像の座標系

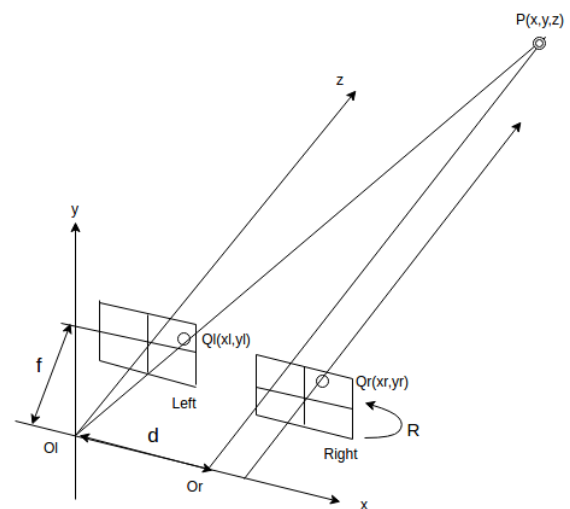


Fig. 12: 三角測量