

車載カメラを利用した移動ロボットのフォーメーション制御

M2016SC004 林俊貴

指導教員：大石泰章

1 はじめに

近年、自律型の移動ロボットの研究が進められており、物資の運搬や危険な現場での作業などへの応用に期待が高まっている。単純なシステムのロボットであっても、複数台を協調して動作させることによって、複雑な動作を実現することができる。

本研究では移動ロボットの協調動作の一環としてフォーメーション制御を行う。フォーメーション制御とは、複数のロボットがそれぞれ得た情報をもとに自律的に走行し、フォーメーションを形成、またそれを維持したまま走行することを目標とした制御である。従来の移動ロボットのフォーメーション制御では多くの場合、移動ロボットを外部カメラ等を用いて第三者の視点から認識し、測定したロボットの位置座標をもとに制御を行っている [1]。しかし、屋外などでは第三者の視点からすべてのロボットを認識するには難しい場合もある。そうした場合は、車両視点である車載センサを用いて制御する方が、より現実的なものだといえる [2]。本研究では第三者視点のセンサではなく、車両視点である車載のカメラのみを使用し、取得した画像をもとに他のロボットの位置と姿勢の情報を抽出して、フォーメーション制御をすることを考える。今回使用する実験機は、マイクロコンピュータ Arduino とカメラ PixyCMUcam-5 を搭載した 2 輪駆動の自動走行車両 ZumoRobot であり、車載カメラから得られる情報をもとにフォーメーションを形成し、フォーメーションを崩すことなく走行することを目標とする。

2 問題設定

2.1 フォーメーション制御の目標

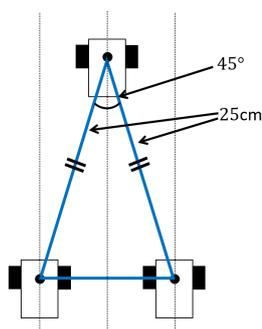


図 1 指定するフォーメーション

本研究の目標は、3 台の ZumoRobot を指定したフォーメーションを維持したまま走行させることであり、指定するフォーメーションは図 1 に示すような頂角の大きさが 45° 、等辺の長さが $25[\text{cm}]$ の二等辺三角形であるとする。二等辺三角形の頂点に位置するのがリーダー車両、他の 2 台がフォロワー車両であり、これらは次の条件を満

たすとする。

- リーダー車両には左右の車輪に入力値 130 を与え (速度 $17[\text{cm/s}]$ で直進させることに相当)、フォロワー車両のみを制御する。
- フォロワー車両は常にリーダー車両をカメラで認識し、指定したフォーメーションを作るよう走行する。フォロワー車両の適切な制御の方法を見つけることが本研究の課題である。

2.2 制御対象

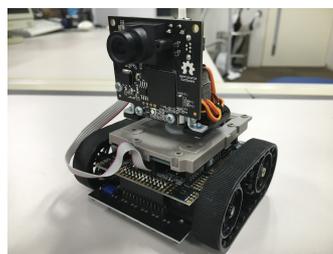


図 2 フォロワー車両



図 3 リーダー車両

本研究で使用するフォロワー車両とリーダー車両を図 2 と図 3 に示す。フォロワー車両は、Pololu 社製の ZumoRobot に Adafruit 社製のカメラ PixyCMUcam-5 とマイクロコンピュータ Arduino を搭載したものである。カメラは常にフォロワー車両の正面を向くように固定する。PixyCMUcam-5 はソフトウェア PixyMon を使用することで色を識別することができる。リーダー車両は ZumoRobot に Arduino と赤色のボールと緑色の円柱型のブロックを搭載したものである。ZumoRobot の前輪には左右それぞれモータが搭載されており、Arduino のプログラムに従って、モータが駆動し車両を走行させている。

PixyMon では図 4 に示すように、認識した色を長方形で囲う。本研究では、図 3 のように赤色のボールと緑色のブロックをリーダー車両に搭載しフォロワー車両はそれらの色を認識することで、リーダー車両までの距離と方角を測定できるようにする。また赤色のボールと緑色のブロックのそれぞれの距離と方角に基づいて、フォロワー



図4 カメラの映像

車両の姿勢角を基準としたリーダー車両の相対的な姿勢角を計算できるようにする。フォロワー車両のカメラから得られる赤色のボールと緑色のブロックのパラメータを図5に示す。図5は図4をパラメータで表したもので

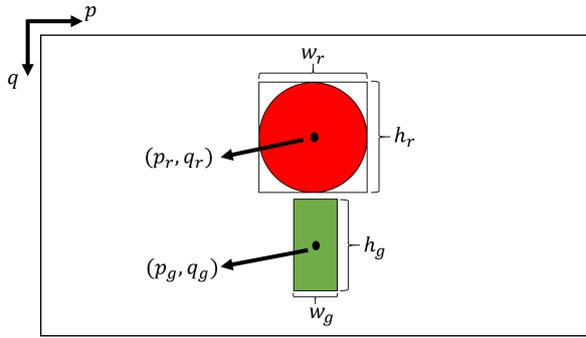


図5 カメラ画像から得られるパラメータ

ある。原点を画像面の左上とし、 p 軸は原点から右向きを正、 q 軸は原点から下向きを正とする。画素を単位とするときの赤色のボールを囲む長方形の重心座標を (p_r, q_r) 、緑色のブロックを囲む長方形の重心座標を (p_g, q_g) とする。赤色のボールと緑色のブロックを囲うそれぞれの長方形の縦幅を同じく画素を単位として h_r 、 h_g 、横幅を w_r 、 w_g とする。

3 フォロワー車両を基準としたリーダー車両の位置と姿勢

図6はフォロワー車両を原点としフォロワー車両の正面方向に y 軸を、それとは直交する方向に x 軸をとったときのリーダー車両の位置と姿勢を表している。フォロワー車両から赤色のボールと緑色のブロックまでのそれぞれの距離を d_r [cm]、 d_g [cm]、 y 軸を基準として時計回りを正としたときの方角を θ_r [deg]、 θ_g [deg]、位置座標を (x_r, y_r) 、 (x_g, y_g) 、 y 軸を基準として時計回りを正としたときのフォロワー車両を基準としたリーダー車両の姿勢角を ϕ [deg]とする。以下ではこれらの数値をフォロワー車両のカメラ画像から求める方法について考察する。

3.1 カメラの画像とリーダー車両までの距離・方角の関係式

カメラの画像に基づいて、フォロワー車両からリーダー車両に搭載した赤色のボールと緑色のブロックまでのそ

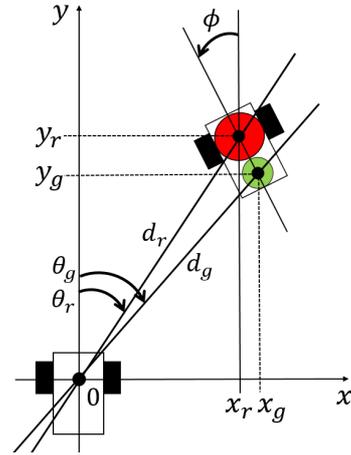


図6 フォロワー車両を基準としたリーダー車両の位置と姿勢

れぞれの距離 d_r 、 d_g を導出する。リーダー車両に搭載した赤色のボールとフォロワー車両の距離は、カメラ画像における赤色のボールの縦幅 h_r を用いて判断する。今回緑色のブロックを赤色のボールより手前かつ下に設置しているため、フォロワー車両とリーダー車両が13.2[cm]より接近するとカメラ画像上では緑色のブロックの全体が見えなくなる。そこで、リーダー車両に搭載した緑色のブロックとフォロワー車両の距離は、緑色のブロックの全体が見えるときは縦幅 h_g で、距離が近くなり緑色のブロックの一部が見えなくなったときは横幅 w_g でというように、場合分けをして判断する。実際にそれぞれの画素数と距離のデータを取ったところ、 h_r 、 h_g 、 w_g と実際の距離 d_r 、 d_g の関係は反比例となる。最小二乗法を使ったところ、赤色のボールと緑色のブロックのそれぞれの画素数 h_r 、 h_g 、 w_g と距離 d_r 、 d_g の関係は次のようになった：

$$d_r = \frac{1100}{h_r + 1.5} + 2.5, \quad (1)$$

$$d_g = \begin{cases} \frac{900}{h_g + 3.6} - 1.5 & (w_g < 32), \\ \frac{500}{w_g + 2.5} - 0.8 & (w_g \geq 32). \end{cases} \quad (2a) \quad (2b)$$

ただし $w_g = 32$ はフォロワー車両とリーダー車両が13.2cmの距離にあるときに対応し、この値を境に h_g と w_g の使い分けを行っている。計測したデータと導出した式(1)、(2a)、(2b)の関係をそれぞれ図7、図8、図9に示す。

フォロワー車両のカメラは常に正面を向いているので、画像の中心が正面方向であり、中心から左右に何画素離れているかを見ることによって赤色のボールの方角 θ_r と緑色のブロックの方角 θ_g を求めることができる。本研究では、中心から1画素離れるときの角度の増加は画像上の位置によらず一定であると仮定する。カメラの x 方向の画角は 75° 、画像の x 方向の画素数は320、画像の中心は $p = 159$ である。以上より、赤色のボールと緑色のブ

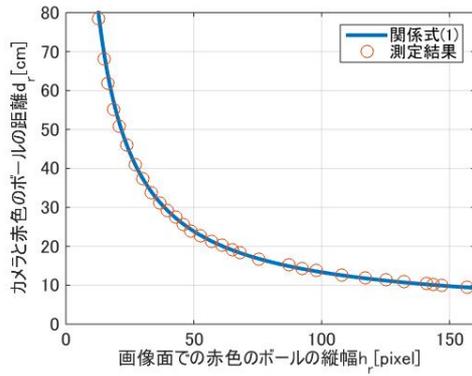


図7 赤色のボールの画像面での縦幅 h_r と実際の距離 d_r の関係

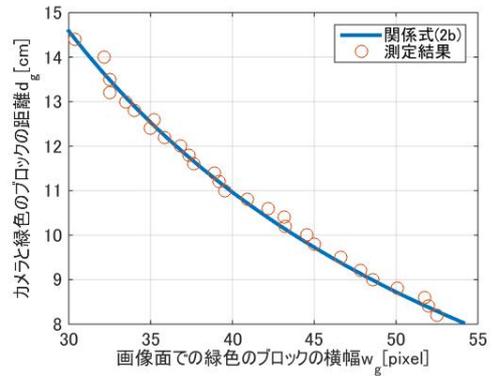


図9 緑色のブロックの画像面での横幅 w_g と実際の距離 d_g の関係

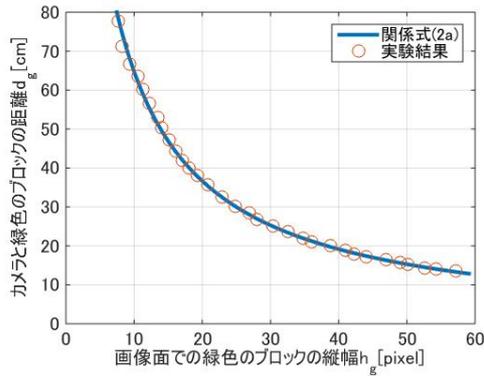


図8 緑色のブロックの画像面での縦幅 h_g と実際の距離 d_g の関係

ブロックの方角 θ_r , θ_g は次のように求めることができる：

$$\theta_r = \frac{75}{320}(p_r - 159), \quad (3)$$

$$\theta_g = \frac{75}{320}(p_g - 159). \quad (4)$$

3.2 フォロワー車両を基準としたリーダー車両の姿勢角

フォロワー車両に対するリーダー車両の姿勢角 ϕ は、図10のような赤色のボールの重心 R と緑色のブロックの重心 G をつなぐ直線を斜辺にもつ直角三角形から導出することができる。まず、前節で求めた距離と方角から、図10の赤色のボールの重心 R の位置座標 (x_r, y_r) と緑色のブロックの重心 G の位置座標 (x_g, y_g) は次のように求めることができる(図6参照)：

$$(x_r, y_r) = (d_r \sin \theta_r, d_r \cos \theta_r), \quad (5)$$

$$(x_g, y_g) = (d_g \sin \theta_g, d_g \cos \theta_g). \quad (6)$$

式(5), (6)より、図10の辺 a , b はそれぞれ $a = y_r - y_g$, $b = x_r - x_g$ と表すことができる。直角三角形の性質より、姿勢角 ϕ は辺 a , b を用いて以下のように表すことができる：

$$\phi = \arctan \frac{b}{a}. \quad (7)$$

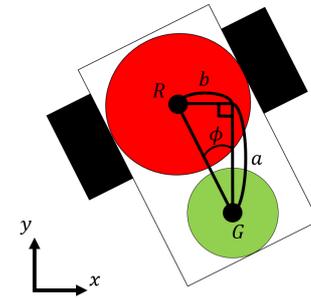


図10 フォロワー車両に対するリーダー車両の姿勢角

4 フォロワー車両の制御

本章では、前章の方法で得たリーダー車両の相対的な位置と姿勢に基づいて、リーダー車両とフォロワー車両の車間距離を目標値に収束させる制御、リーダー車両の方角を目標値に収束させるステアリング制御、フォロワー車両の姿勢角をリーダー車両の姿勢角と同じにするステアリング制御について考える。

以下では左後方のフォロワー車両の制御を想定して車間距離と方角の目標値はそれぞれ $d_L = 25[\text{cm}]$, $\theta_L = 22.5[\text{deg}]$ であるとして議論する。右後方のフォロワー車両の制御の場合は、目標値を $d_R = 25[\text{cm}]$, $\theta_R = -22.5[\text{deg}]$ として同様に考えればよい。

4.1 車間距離制御

車間距離制御にはPI制御を用いる。P制御では赤色のボールまでの距離 d_r とその目標値 d_L の間に定常偏差が発生するためである。時刻 t におけるフォロワー車両の左右モータへの入力 $u(t)$ の平均を $u(t)$ 、赤色のボールまでの距離を $d_r(t)$ 、赤色のボールまでの目標距離を $d_L = 25$ 、比例ゲインを $K_{p1} = 18$ 、積分ゲインを $K_i = 0.02$ とするとき、左右のモータへの入力 $u(t)$ は次のように定める：

$$u(t) = 130 + K_{p1}(d_r(t) - d_L) + K_i \int_0^t (d_r(t) - d_L) dt. \quad (8)$$

ただし130は基準の入力で、リーダー車両の速度と同じ速度を与えるように定めている。

4.2 ステアリング制御

P 制御を用いてフォロワー車両の進行方向を調節するステアリング制御を行う。時刻 t における左右のモータへの入力差を $c_1(t)$ 、赤色のボールの方角を $\theta_r(t)$ 、赤色のボールの目標の方角を $\theta_L = 22.5$ 、比例ゲインを $K_{p2} = 2.7$ とするとき、入力への差 $c(t)$ は次のように定める：

$$c_1(t) = K_{p2}(\theta_r(t) - \theta_L). \quad (9)$$

4.3 リーダー車両の姿勢角に合わせる制御

リーダー車両の姿勢角を考慮して追従走行するため、P 制御を用いてリーダー車両とフォロワー車両の姿勢角を等しくするようステアリングを調整する。時刻 t における左右のモータへの入力差を $c_2(t)$ 、フォロワー車両を基準としたリーダー車両の姿勢角を $\phi(t)$ 、比例ゲインを $K_{p3} = -0.1$ としたとき、以下のように表すことができる：

$$c_2(t) = K_{p3}\phi(t). \quad (10)$$

4.4 フォロワー車両の左右のモータに与える入力

フォロワー車両の左右のモータに与える入力は、車間距離制御の入力にステアリング制御の入力とリーダー車両の姿勢角に合わせる制御の入力を加えたものとなる。左のモータへの入力を $\omega_L(t)$ 、右のモータへの入力を $\omega_R(t)$ として以下のように定める：

$$\omega_L(t) = u(t) + c_1(t) + c_2(t), \quad (11)$$

$$\omega_R(t) = u(t) - c_1(t) - c_2(t). \quad (12)$$

実際には ω_L 、 ω_R の最大値を 400、最小値を -100 とし、この範囲に入らないときは打ち切って 400 または -100 とする。

4.5 実験結果

リーダー車両をフォロワー車両の姿勢に対して右斜めに向いている状態からリーダー車両を発進させる。実験結果を以下の図 11、図 12、図 13 に表す。

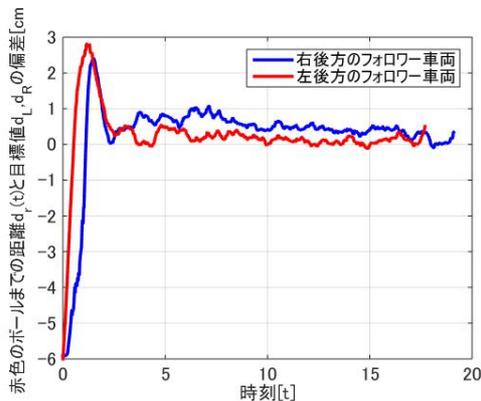


図 11 赤色のボールまでの距離 $d_r(t)$ の目標値 d_L 、 d_R からの偏差のグラフ

図 11 より、フォロワー車両と赤色のボールの距離 d_r の目標値 d_R 、 d_L との偏差が零に収束したため、フォロワー

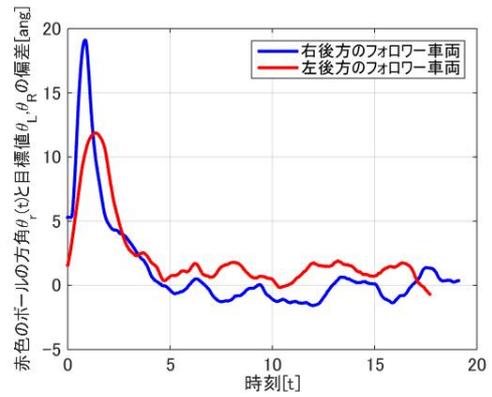


図 12 赤色のボールの方角 $\theta_r(t)$ の目標値 θ_L 、 θ_R からの偏差のグラフ

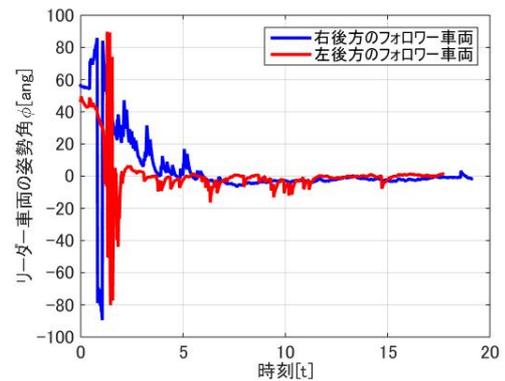


図 13 姿勢角 $\phi(t)$ のグラフ

車両がリーダー車両と指定した距離を維持しながら走行していることがわかる。同様に図 12 より赤色のボールの方角 θ_r の目標値 θ_R 、 θ_L との偏差が零に近くなっていることがわかり、図 13 よりリーダー車両の姿勢角 ϕ が零に近い値をとっていることが確認できる。以上をまとめて、フォロワー車両は指定したフォーメーションを維持したまま走行できていると確認できた。

5 おわりに

本研究では、カメラ画像からフォロワー車両を基準としたリーダー車両の距離、方角、姿勢角の 3 つのデータを導出した。またそれを基に制御系設計をしたことで、フォーメーションを崩さずフォロワー車両を走行させることができた。

6 参考文献

- [1] 池田 高志, Jurachart Jongusuk, 池田 貴幸, 美多 勉: ノンホロノミック車両のフォーメーション制御, 電気学会論文誌 D, 1248 号, pp.814-819, 2004.
- [2] Aveek K. Das, Rafael Fierro, Vijay Kumar, James P. Ostrowski and John Spletzer: A Vision-Based Formation Control Framework, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 18, no. 5, pp. 813-825, 2002.