

# 知能制御PBL

## 最終報告書(個人レポート)

2018年8月7日

### 西田研究室

報告者：17104311 横田篤紀

共同実験者：13104042 烏谷崇大

14104055 佐々木秀将

15104021 長田駿二郎

15104026 川崎雄太朗

15104050 坂元勇太

15104081 徳野将士

15104113 前田修一

15104117 右田明花

15104134 山福佳

## 目次

1	目的	2
2	RCR (Robot Car Race) 2018	2
2.1	競技概要 . . . . .	2
2.2	コース . . . . .	2
2.3	競技ルール . . . . .	2
3	ロボカー	3
3.1	機体概要 . . . . .	3
3.2	ToF センサ . . . . .	4
3.3	ロータリーエンコーダ . . . . .	5
3.4	フォトリフレクタ . . . . .	6
4	回路設計	6
4.1	全体の回路構成 . . . . .	8
4.2	駆動部の回路 . . . . .	8
4.2.1	後輪駆動部の回路 . . . . .	8
4.2.2	ステアリング回路 . . . . .	9
5	ROS (Robot Operating System)	10
5.1	ROS とは . . . . .	10
5.2	ROS ノードとトピックの構成 . . . . .	11
6	制御則	12
6.1	RC サーボモータ . . . . .	12
6.1.1	構造 . . . . .	12
6.1.2	目標値生成 . . . . .	12
6.2	DC モータ . . . . .	14
6.2.1	PWM 信号と DC モータの角速度 . . . . .	14
6.2.2	目標値生成 . . . . .	15
6.2.3	モデリング . . . . .	16
6.2.4	制御系 . . . . .	17
7	結果	22
8	考察	22
8.1	壁に衝突した原因 . . . . .	22
8.2	コントロールラインを検出し損ねた原因 . . . . .	23
8.3	ステアリング制御が振動を起こした原因 . . . . .	23
9	感想と次年度への提言	23
10	物品一覧	24

## 1 目的

学部3年までに学習した制御理論や電気回路・情報工学の知識を使って、競技場内を自律的に走行するロボットの製作を行う。研究室で一丸となってプロジェクトを進行し、共同で課題を達成することの難しさや楽しさを学び、エンジニアとして仕事を進めるための素養を身に付ける。

## 2 RCR (Robot Car Race) 2018

### 2.1 競技概要

ウレタンパネルを用いてレイアウトされる周回コースにおいて、格子模様のコントロールライン手前から走行開始してコントロールラインを3回通過後に停止するまでの時間を競うロボットカー（以下、ロボカーと称する）を製作する。

### 2.2 コース

一辺50 [cm] の正方形及び扇形の黒色ウレタンパネルと白黒格子模様のコントロールライン付ウレタンパネルを組み合わせ、コースを構成する。なお、競技会当日までコースは公表されない。また、コースフェンスの高さが低いため、コースフェンスのコース側に高さ10 [cm] の壁を設置する。

### 2.3 競技ルール

- (1) コントロールライン手前からの走行開始からコントロールラインを3回通過後に停止するまでの時間を競う。
- (2) 各チームあたり10分以内に最大3回走行し、最短時間の走行を評価する。
- (3) コース2周以上走行すること。
- (4) 競技会当日のコース試走は認めない。
- (5) ロボカーがコース周囲の壁に接触した場合は失格とする。
- (6) コース及び壁に物を設置したり、手を加えてはいけない。
- (7) コース内に足を踏み入れないこと。

### 3 口ボカー

#### 3.1 機体概要

図1に配布された口ボカーのベース部を示す。本体の前方には前輪を駆動させ口ボカーを旋回させるためのサーボモータを設置した。そして、口ボカーの後方には後輪を駆動させ機体を動かすためのDCモータと角速度を計測するためのロータリーエンコーダを設置した。

ベース部の上部に他の部品を設置するために、加工と絶縁が容易な点を考慮し、ユニバーサルプレートを二層に設置した。図2、図3に搭載する部品のレイアウトを示す。図2より中央にはDCモータを制御するためのモータドライバ、後方には各部品に電力を供給するための7.2Vバッテリ、前方にはRaspberryPi3 Model Bに電力を供給するための5Vバッテリを設置した。図3より、一番上にはRaspberryPi3 Model BとDC/DCコンバータを含めた電気回路を設置し、その後方に電源用のスイッチと走りだすためのスイッチを設置した。口ボカーの前と左右に壁との距離を測るためのToF(Time-of-Flight)センサを設置した。最後に図4に口ボカーの背面部を示す。口ボカーの背面にはコントロールラインを読み取るためのフォトリフレクタ(1RC Reflectance Sensor)を取り付けた。

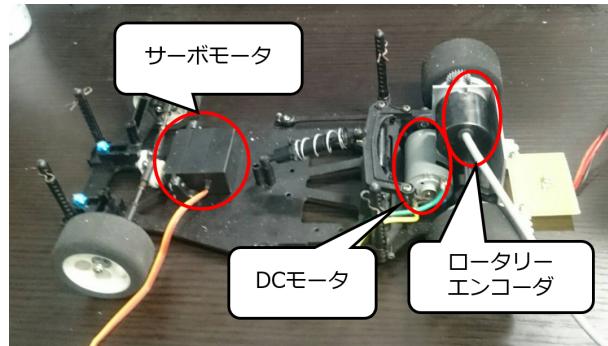


図1: 口ボカーベース部

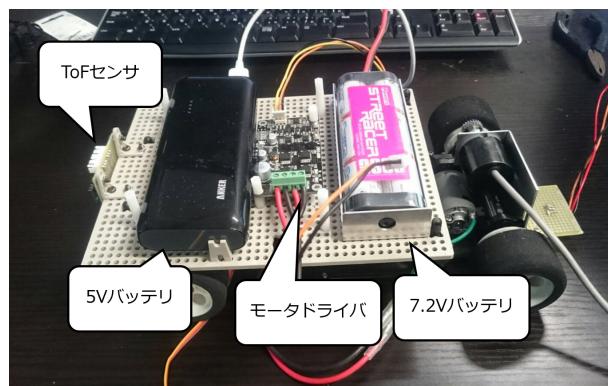


図2: 口ボカーベース部

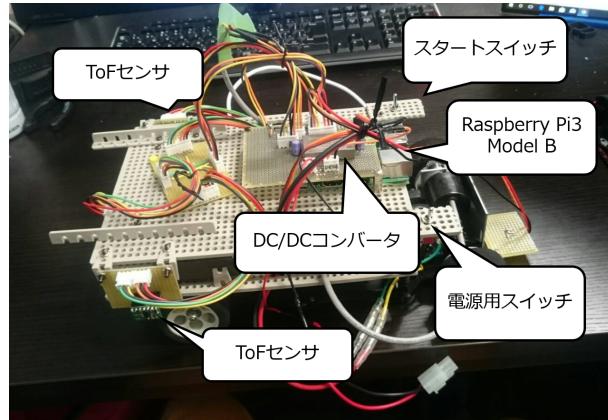


図3: 口ボカ- 2段目部

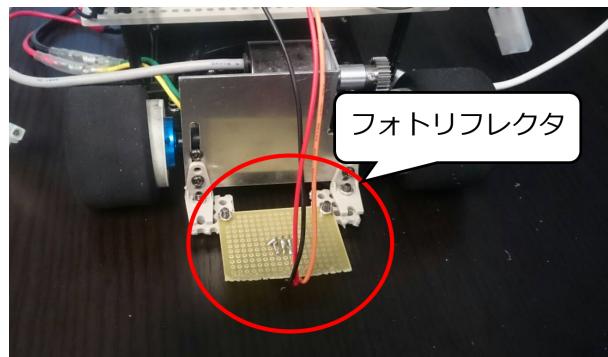


図4: 口ボカ- 背面部

### 3.2 ToF センサ

今回使用する ToF センサモジュールはデジタル I<sup>2</sup>C インターフェイスを介して距離を測定しており、2.8V のリニア・レギュレータと、入力電圧 2.6 [V] から 5.5 [V] までに対応する変圧回路を備えている。また、この ToF センサモジュールでは赤外線を使用しており、最大 2 [m] を距離分解能は 1 [mm] で測定できる。以下にその仕様を記す [1] 。

- 動作電圧: 2.6 [V] ~ 5.5 [V]
- 消費電力: 10 [mA] (通常動作時の平均値)
- 検出範囲: 3 [cm] ~ 200 [cm]
- 重量: 0.5 [g] (ピンヘッダを除く)
- 出力フォーマット I<sup>2</sup>C: 16 ビット読み込み (ミリメートル)
- ピンピッチ: 2.54 [mm]

5 [cm] ~ 70 [cm] まで 5 [cm] ずつ ToF センサで測距を 5 回ずつ行ってそれらの平均をとって ToF センサの特性実験を行った。横軸に距離の真値、縦軸に距離センサで計測して出力された値とし、距離センサの特性を図 5 のグラフに示す。

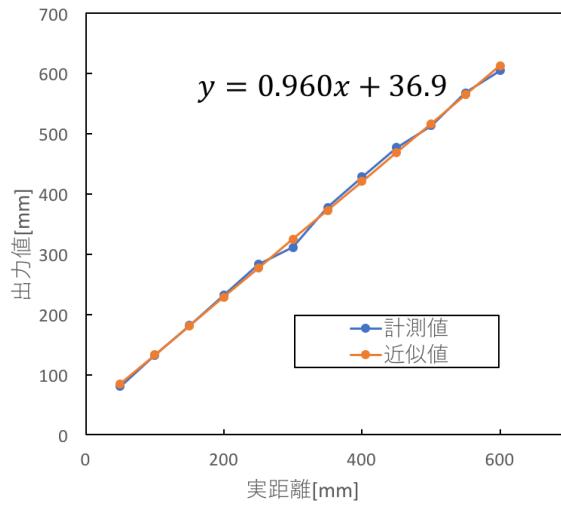


図 5: ToF センサの特性

この距離センサを最小二乗法により近似した式は次式となる。なお、 $x$  は実距離 [mm],  $y$  は出力値 [mm] である。

$$y = 0.960x + 36.9 \quad (3.1)$$

式 (3.1) より、この式の逆関数を取ることによって計測した距離から実際の距離を導出することができる。 $x$  を計測して出力された距離 [mm],  $d(x)$  を実際の距離 [mm] とするとき次の式となる。

$$d(x) = 1.04x - 38.4 \quad (3.2)$$

故に、実際に距離センサでセンシングする際には、式 (3.2) によって計測値を実距離へ変換して用いることになる。また今回は 40 [mm] ~ 1100 [mm] の間でセンシングするため、センシングによって得た値が 40 [mm] 以下の場合には 40 [mm] と、1100 [mm] 以上の場合には、1100 [mm] となるような外れ値処理を行った。さらにセンシングで得た値を [0.0, 1.0] の範囲で出力するために、センシングで得た値をセンシングの最大値 1100 [mm] で割るという正規化処理を施した。

ここで距離センサモジュールの中で使われている I<sup>2</sup>C(Inter-Integrated Circuit)について説明する。I<sup>2</sup>C はフィリップス社で開発されたシリアルバスである。I<sup>2</sup>C の特徴としては、バス・ラインがシリアル・データ・ライン (SDA) とシリアル・クロック・ライン (SCL) の 2 本のみという簡単な構造の双方向性バスとなっていること、バスの静電容量が 400 [pF] 以下であれば、1 つのバス上に IC をいくつでも接続させることができることなどが挙げられる。また、今回の RCRにおいては I<sup>2</sup>C インターフェイスを介して値を受け渡すので A/D 変換を行わずに測定した距離の値を受け渡すことができるという利点がある [2]。

### 3.3 ロータリーエンコーダ

今回使用するロータリーエンコーダ (RE30E-500-213-1) は A 相, B 相, Z 相 (ゼロ信号) の 3 相インクリメンタル型である。また、今回製作するロボカーは後退しない。つまり、回転方向は考慮しなくても良いため、ロータリーエンコーダの A 相のパルスのみをカウントする。

$k$  時点のタイヤの角速度  $\omega(k)$  [rad/s] は、エンコーダのロータリーエンコーダの一周期あたりの出力パルス数 (500 パルス), サンプリング周期 (0.005 [s]), ロータリーエンコーダの軸に取り付け

たピニオンギアとドライブシャフトに取り付けたギア間のギア比 (2.74) より次式のように算出する。また、ノイズ対策として算出した角速度を式 (3.3) で表される Low Pass Filter に相当デジタルフィルタに通した結果を Publish するようにしている。ただし、 $\alpha$  は [0.0, 1.0] の範囲で定める定数である。

$$\omega(k) = \alpha\omega(k) + (1 - \alpha)\omega(k - 1) \quad (3.3)$$

### 3.4 フォトリフレクタ

今回使用するフォトリフレクタ (1RC Reflectance Sensor) は出力がアナログ値でなく 2 値出力のパルスである。この出力パルスのパルス幅を計測することによって光の反射率、すなわち床面の色を計測することが出来る。

## 4 回路設計

今回設計した駆動部、距離センサ部、マイコン周辺部の回路図を図 6, 図 7, 図 8 にそれぞれ示す。また回路制作に使用した主要な部品の一覧を表 4.1 に示す。さらに駆動系の回路に関してその詳細な仕様や構成について以下で述べる。

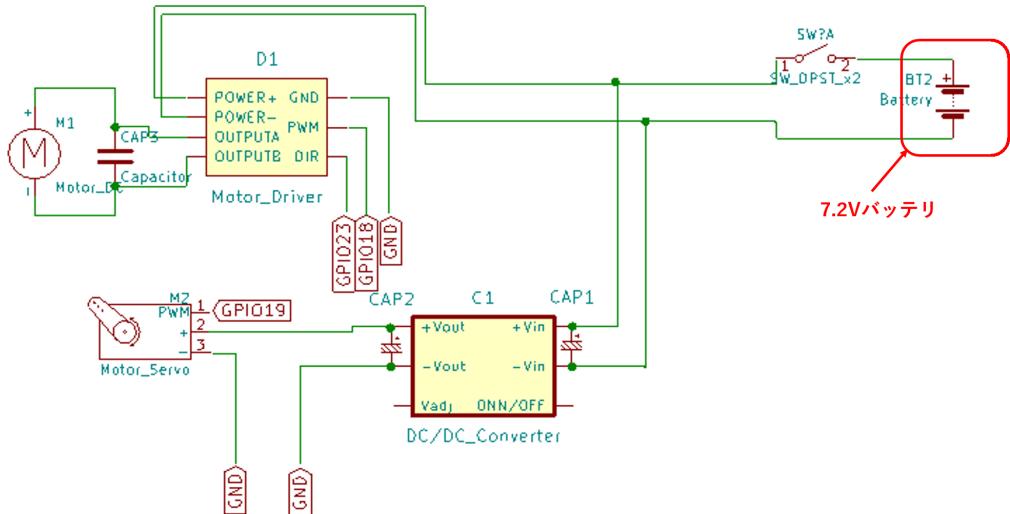


図 6: 駆動部

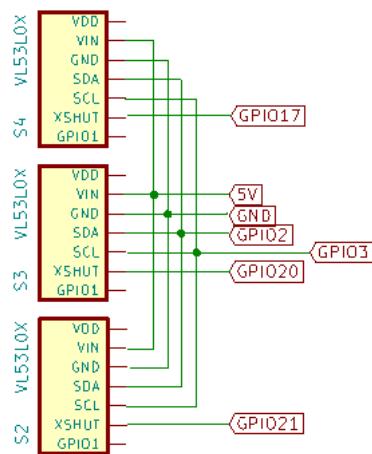


図 7: 距離センサ部

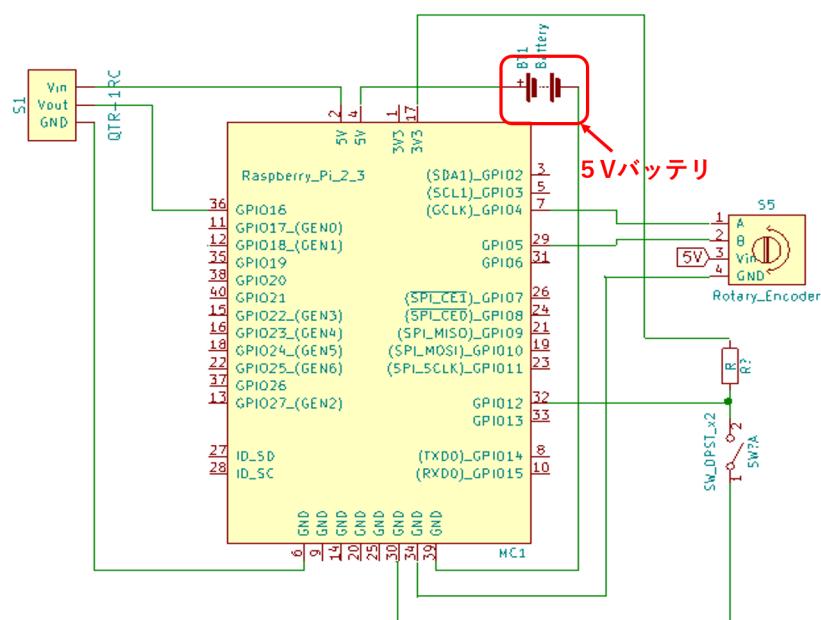


図 8: マイコン周辺部

表 4.1: 電気回路用部品

タイプ	部品名	数	用途
マイコン	Raspberry Pi3 Model B	1	制御用
DC モータ	RP380	1	後輪モータ駆動用
モータドライバ	MD10C R3	1	後輪モータ制御用
距離センサ	VL53L0X Time-of-Flight	3	距離計測用
フォトリフレクタ	QTR-1RC フォトリフレクタ・モジュール	3	ゴールライン計測用
DC-DC コンバータ	BTD05-05S200D	1	降圧用
コンデンサ	セラミックコンデンサ 1000 [pF]50 [V]	1	後輪モータのノイズ除去用
	OS コンデンサ 10 [V]47 [ $\mu$ F]	2	DC-DC コンバータのノイズ除去用
ロータリーエンコーダ	RE30E-500-213-1	1	ロボカーの速度計測用
バッテリ	Powers Max 4000 Ni-MH 7.2 [V]	1	DC モータ, サーボモータ用の電源
	4000 [mAh] 6CELL ニッケル水素バッテリ	1	Raspberry Pi3 ModelB 用の電源
サーボモータ	GWS03T/2BBMG	1	ステアリング用

#### 4.1 全体の回路構成

今回設計した回路では 7.2 [V] バッテリと 5 [V] バッテリの 2 つを用いており、7.2 [V] バッテリはまず分流を行い一方を DC-DC コンバータを用いて 7.2 [V] から 5 [V] に降圧してサーボモータに供給し、もう一方を DC モータドライバに供給している。5 [V] バッテリは RaspberryPi3 Model B にのみ電源を供給している。このような回路構成をとることで、RaspberryPi3 Model B への電源供給に対してフィルタを用いたノイズ対策を行う必要がなく安定した動作を行うことができるというメリットがある [5]。

#### 4.2 駆動部の回路

図 6 は車体駆動部回路を示している。駆動部回路は後輪駆動部回路とステアリング回路から構成されている。以下で詳細について説明する。

##### 4.2.1 後輪駆動部の回路

後輪駆動部の回路は主にモータドライバと DC モータから構成されている。以下にその仕様を示す。DC モータには、ノイズを軽減するためにセラミックコンデンサを取り付けた [5]。

モータドライバ<MD10CR3(Cytron technologies 社製)>[6]

- 対応モータ電圧: DC 5 [V] – 25 [V]
- 最大電流 : 13 [A]
- ロジック入力電圧: 3.3 [V] – 5 [V]

DC モータ< RP380(マブチモーター社製)>[7]

- 適正電圧: 7.2 [V]
- 適正電圧・負荷時の消費電流: 2.9 [A]

#### 4.2.2 ステアリング回路

ステアリング用の回路ではサーボモータと降圧を行うための DC-DC コンバータから構成されている。以下にその仕様を示す。ここで、サーボモータの GND は RaspberryPi3 ModelB のそれと共通である。DC-DC コンバータは内部でディジタルスイッチングを行っているため、ノイズが生じてしまう [9]。本回路ではこのようなノイズ成分を平滑化するために電解コンデンサ (OS コンデンサ 10 [V] 47  $\mu\text{F}$ ) を用いた図 9 の回路を作成した [8]。

DC-DC コンバータ (Bellnix 社製) <BTD05-05S200D>[8]

- 入力電圧: DC 4.5 [V] – 9 [V]
- 出力電圧: 0 [mA] – 2000 [mA]
- 出力電流: 3.3 [V] – 5 [V]
- 効率: 84 %

サーボモータ <GWS03T/2BBMG>

- 駆動電圧: DC 4.8 [V] – 6 [V]

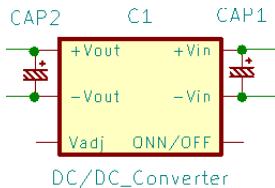


図 9: DC-DC コンバータの回路図

## 5 ROS (Robot Operating System)

### 5.1 ROS とは

ROS(Robot Operating System) とは Open Source Robotics Foundation によって管理されているソフトウェア開発者のロボット・アプリケーション作成を支援するフレームワークである。具体的には、ハードウェア抽象化、デバイスドライバ、ライブラリ、視覚化ツール、メッセージ通信、パッケージ管理などが提供されている。<sup>[3]</sup>

図 10 に示すように ROS ではプロセス(実行プログラム)はノードという単位で扱い、ノード間の通信はトピックと呼ばれる“Publisher/Subscriber”モデルで実現される<sup>[4]</sup>。

これにより、プログラミング言語や通信相手さえ意識することなく簡単にプロセス間通信を実現できる。つまり、並列分散処理が簡単に実現できるのである。これは各ノード間のインターフェース、すなわちトピックの名前と型さえ決定すればノードごとに独立して開発を行うことができるという利点である。

以上の利点を考慮し、本研究室では ROS がインストール可能なマイコンボードである Raspberry Pi3 Model B 上に ROS をインストールして開発を進めていくこととした。

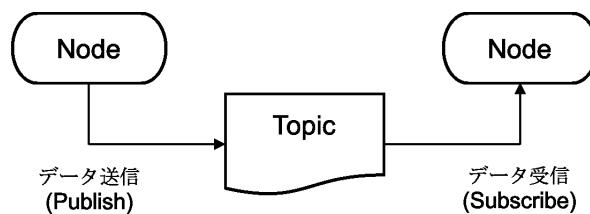


図 10: ROS ノードとトピックの概念

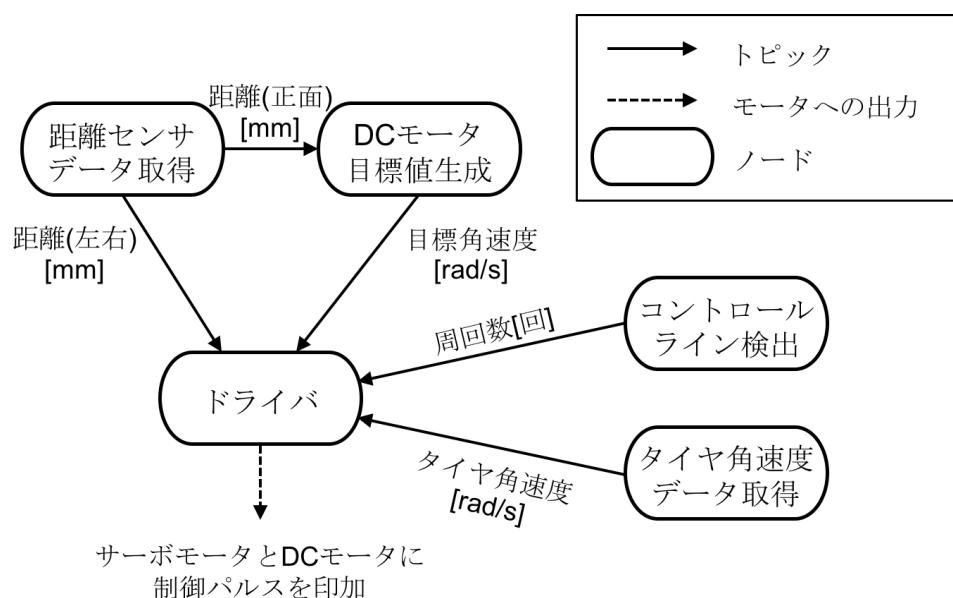


図 11: ROS ノードとトピックの構成

## 5.2 ROS ノードとトピックの構成

図 11 に開発する ROS ノードとトピックの構成を示す。各ノードの役割は次の通りである。

### 距離センサデータ取得

ロボカーの前方及び両側面に設置した距離センサからシリアルバス規格の一つである I<sup>2</sup>C を介して距離データを mm 単位で取得し、外れ値処理や正規化を施した後に Publish する。

### コントロールライン検出

ロボカーの後方下部に設置したフォトリフレクタによってコントロールラインを通過した回数をカウントし Publish する。

### タイヤ角速度データ取得

ロボカーの後方に設置したロータリーエンコーダによって計測したタイヤの回転角を基に、タイヤの回転角速度を算出して Publish する。

### DC モータ目標値生成

ロボカーの前方方向の距離データを Subscribe し、それをもとに DC モータに与える目標値を生成して Publish する。

### ドライバ

DC モータに与える目標値、ロボカーの両側面の壁との距離、タイヤの角速度、周回数を Subscribe し、サーボモータの目標値を生成して、サーボモータを駆動させる。また、DC モータを目標値に追従するような PI 制御系によって駆動する。さらに、規定の周回数になるとロボカーを停止させる。

## 6 制御則

ロボカーがコースを走る際，直進コースではロボカーを安定させ可能な限り速く走らせ，カーブに差しかかったときにはステアリングとステアリングのための減速が必要である．特に，カーブを曲がりきるためにどれだけのステアリング角と速度にすべきか，またその目標角度に追従させるためにはどのような制御系を構成する必要があるのかを考えなければならない．ここでは，ステアリング角と速度の目標値生成および制御方法について説明する．

### 6.1 RC サーボモータ

ロボカーのステアリング角は RC サーボモータの角度により決められる．すなわち，RC サーボモータへの目標角度生成則について考える必要がある．

#### 6.1.1 構造

RC サーボモータは内部でフィードバック制御が行われている．その構造は図 12 に示すとおりである [11]．目標角度に対応する PWM 信号を入力すると内部で目標値に追従するように制御が行われる．

#### 6.1.2 目標値生成

本レースで走行させるロボカーは左右側面に設置された距離センサにより左右のコースの壁との距離をそれぞれ検出し，その距離の差によりステアリング角を変化させる．右側の壁との距離が左側の壁との距離より大きければステアリング角を時計回り方向に，小さければステアリング角を反時計回りに回転させる．ロボカーが直進コースを走行するときに比べ，カーブに差しかかったときとでは図 13 のように左右の壁との距離の差が大きくなる．すなわち，直進コースのように距離の差が小さくなるときには RC サーボモータの角度を小さくしてロボカーが前方を向くようになり，大きくなるときには RC サーボモータの角度を大きくすることでカーブに差しかかった場合に必要なステアリング角を実現することができる．また，直進コースではロボカーをコースの中央に位置させるようにステアリングを行わせることができる．

RC サーボモータでの PWM 信号の周期は 16 ~ 23 [msec] であり，その周期中のパルス幅の大きさに比例して RC サーボモータの角度が決まる．周期 20 [msec] の PWM 信号のパルス幅を 0.9 [msec] から 2.1 [msec] まで変化させると，RC サーボモータの角度は図 14 に示すように変化する．この特性より PWM 信号のパルス幅  $W$  [msec] に対して RC サーボモータの角度  $\theta = f(W)$  [deg] とおく．距離センサの値の定義域は正規化により [0.0, 1.0] となるので，左右の距離センサの値の差は [-1.0, 1.0] の範囲で値をとる．この範囲で左右の距離の差の大きさに応じてステアリング角を大きくし，最大角度を超えないようにする必要がある．そのためシグモイド関数  $\sigma_{as}(x_s)$  を用いた次式で目標角度  $\theta_r$  を生成することにした．

$$\theta_r = f(W) = f(1.5 - 2 \cdot 0.6 (\sigma_{as}(x_s) - 0.5)) \quad (6.4)$$

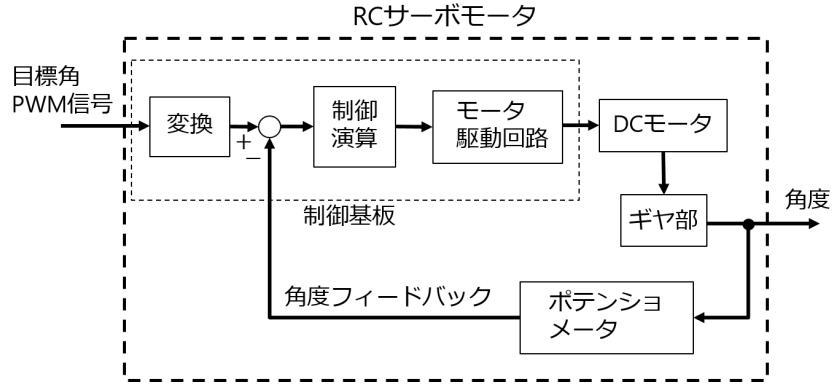


図 12: RC サーボモータの制御系

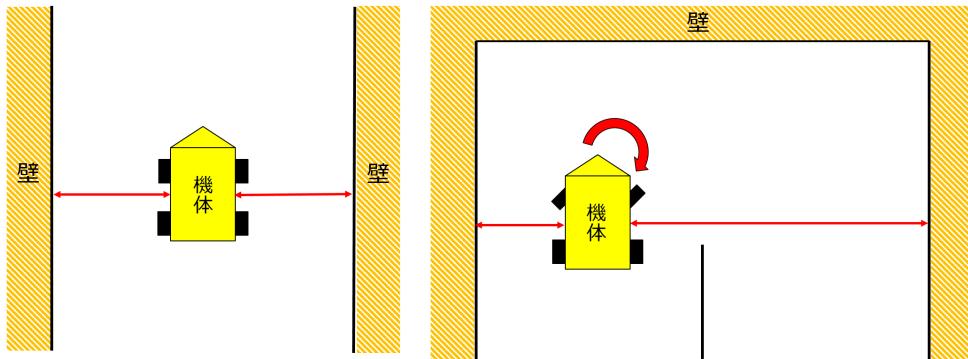


図 13: 直進コースとカーブとでの左右の壁との距離の差

ここで  $a_s$  は正の定数であり ,  $x_s$  はロボカーの左右のセンサの値の差である . この式ではシグモイド関数  $\sigma_{a_s}(x_s)$  を  $y$  軸方向に  $-0.5$  だけ平行移動させ , その全体を 2 倍することで  $(-\infty, \infty)$  の定義域において  $(-1.0, 1.0)$  の値域で変化するようにしている . さらに , 0.6 をかけることで値域を  $(-0.6, 0.6)$  としている . 式中の 1.5 は図 14 で RC サーボモータの角度が  $0 [deg]$  となるときの PWM 信号のパルス幅である . この式では左右のセンサの値の差により PWM 信号のパルス幅を変えることで目標角度  $\theta_r$  を決定している . 図 14 に示したように , 左右のセンサの値の差がなければ  $x_s = 0 [deg]$  となりパルス幅は  $1.5 [msec]$  となって目標角度  $\theta_r$  は  $0 [deg]$  となる . 右のセンサの値が左のセンサの値より大きい場合を正とすれば , RC サーボモータの角度は右の壁との距離の方が大きくなると時計回りに大きくなり , 左の壁との距離のほうが大きくなると反時計回りに大きくなる . 定数  $a_s$  はシグモイド関数の変化の速さにかかわり , 試走実験によって ,  $a_s = 5$  と設定した .

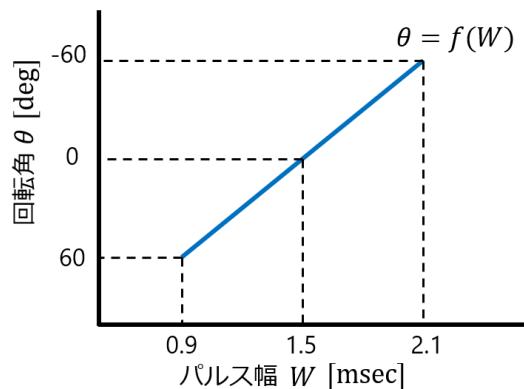


図 14: PWM 信号のパルス幅と RC サーボモータの角度の関係

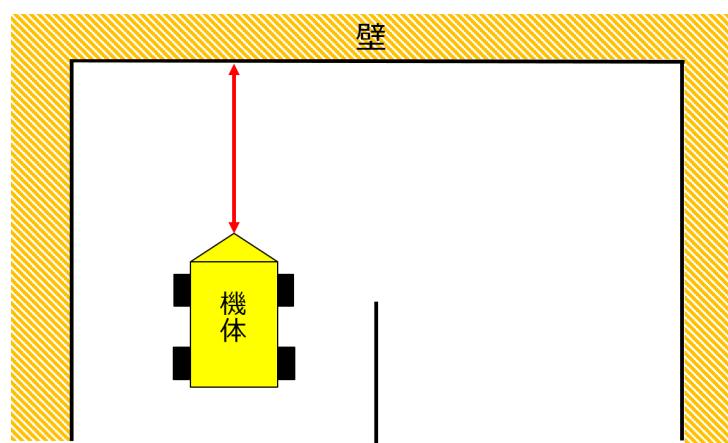


図 15: 前方の壁との距離に対する速度

## 6.2 DC モータ

ロボカーの速度は DC モータの角速度により決められる。すなわち、DC モータへの目標角速度生成と、その目標値に追従させるための制御方法を考える必要がある。

### 6.2.1 PWM 信号と DC モータの角速度

以下のようにして、PWM 信号と DC モータの角速度との関係式を導いた。

- (1) DC モータに Duty 比 0.05 の PWM 信号を与え、定常となったときの DC モータの角速度の値を記録した。この値は定常時での DC モータの角速度の値を平均化して求めた。なお、与える Duty 比はプログラムの関係上、実際の Duty 比を  $10^6$  倍して与えている。
- (2) DC モータに与える PWM 信号の Duty 比を 0.05 刻みで 0.5 まで増加させ、各 Duty 比の場合ごとに (1) と同様の操作を行った。

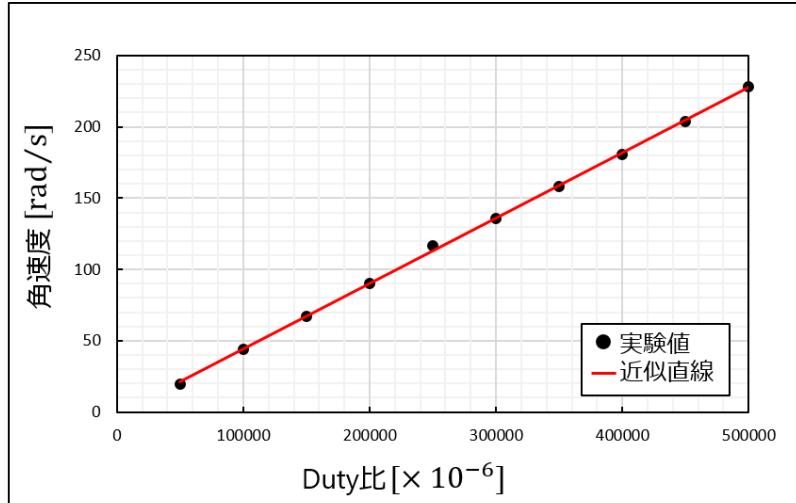


図 16: PWM 信号の Duty 比と DC モータの角速度との関係

- (3) 各 Duty 比の PWM 信号に対する DC モータの角速度は図 16 に示すようになった。これに対し近似直線を引けば、PWM 信号の Duty 比を  $d[\times 10^{-6}]$  , DC モータの角速度を  $\omega [\text{rad/s}]$  とおいたときその式は

$$\omega = 0.0005 \times d - 1.861 \quad (6.5)$$

と表せた。この式より、DC モータの角速度から PWM 信号の Duty 比を求める式は

$$d = 2178 \times \omega - 4176 \quad (6.6)$$

と表せた。

式 (6.5) より PWM 信号の Duty 比が最大となったときの DC モータの角速度を求めることができ、式 (6.6) より任意の DC モータの角速度を与えるのに必要な PWM 信号の Duty 比を求めることができる。

### 6.2.2 目標値生成

カーブを曲がりきるためには、ステアリングに余裕をもたせるための減速が必要である。本レースで走行させるロボカーは、正面に設置された距離センサにより前方の壁との距離を検出し、その距離に応じて速度を変化させる。図 15 のようにカーブに差しかかれば正面のコースの壁との距離は小さくなる。すなわち、正面のコースの壁との距離が小さくなるほど DC モータの角速度を小さくすることでカーブでの減速を実現することができる。壁との距離に比例して目標角速度を生成すると、壁との距離が大きくなるほど DC モータの角速度が大きくなりモータの最大角速度まで大きくなってしまう。DC モータの角速度が最大の状態でロボカーを走らせると消費電力が大きくなり電源の消耗が速くなったり、ロボカーがモータの回転に耐えられないなどの問題が生じる。この問題を解消するためには最大角速度がある値までに抑え、前方の壁との距離が一定以上大きくなるとそれ以上角速度が大きくならないようにする必要がある。なおかつ、壁との距離が小さくなれば速度を落としたいので、DC モータの角速度の目標値生成には RC サーボモータと同様にシグモイド関数  $\sigma_{ad}(x_d)$  を用いることにした。指定最大角速度を  $\omega_{max} [\text{rad/s}]$  とすれば、DC

モータへの目標角速度  $\omega_r$  [rad/s] は次式で生成される .

$$\omega_r = \omega_{max} \sigma_{a_d} (x_d - b) \quad (6.7)$$

ここで ,  $a_d$  ,  $b$  は正の定数であり ,  $x_d$  は前方の距離センサの値である . 定数  $a_d$  はシグモイド関数の変化の速さに関わる . 距離センサの値は正規化されているので  $x_d$  の定義域は  $[0.0, 1.0]$  となる . シグモイド関数  $\sigma_a(x)$  は前方の壁との距離に対し増減し , 値域は  $(0.0, 1.0)$  である . センサの値が 0.0 のときにはシグモイド関数の値は 0.5 となる . これでは前方の壁との距離がどれだけ小さくなつても指定最大角速度の半分までしか減速できないため , 指定最大角速度が大きくなるほど最低角速度が大きくなりステアリングのための減速が十分に行えなくなってしまう . 正の定数  $b$  だけシグモイド関数を  $x$  軸方向に平行移動させることで , 最低角速度を指定最大角速度の半分より小さくできる . 以上より式 (6.7) を与えることで , 壁との距離がどれだけ離れても目標角速度  $\omega_r$  [rad/s] は指定最大角速度  $\omega_{max}$  [rad/s] に抑えられ電力消費を抑えることができ , 前方の壁との距離が小さくなるカーブにおいてステアリングのための減速を行うことができる . 正の定数  $a_d$  と  $b$  の値は試走実験によって ,  $a_d = 5$  と設定した .

### 6.2.3 モデリング

DC モータの代表的な等価回路を図 17 に示す . [12] ただし , モータへの入力電圧を  $v$  [V] , 電機子電流を  $i_a$  [A] , 電機子抵抗を  $R_a$  [ $\Omega$ ] , 自己インダクタンスを  $L_a$  [H] , 誘起電圧定数を  $K_E$  [Vs/rad] , 電機子の回転角速度を  $\omega_m$  [rad/s] , 電機子に発生するトルクを  $T$  [Nm] , 負荷トルクを  $T_L$  [Nm] , 回転子と負荷の合成慣性モーメントを  $J$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ] とする . 以下ではこの等価回路に沿って DC モータの定式化を行う .

図 17 より , DC モータの支配方程式は次のように書ける .

$$v = K_E \omega_m + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (6.8)$$

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (6.9)$$

式 (6.8) , 式 (6.9) より図 18 のブロック線図を得る . ここで , 図中の  $J$  はモータ回転子の慣性モーメント  $J_M$  と負荷の慣性モーメント  $J_L$  の和を表し ,  $K_T$  [Nm/A] は DC モータのトルク定数である . 図 18 より負荷を含まない DC モータ単体の伝達関数  $G_M(s)$  を求めると以下のようになる .

$$\begin{aligned} G_M(s) &= \frac{\Omega_m(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_T}{(R_a + L_a s) J_M s}}{1 + \frac{K_T K_E}{(R_a + L_a s) J_M s}} \\ &= \frac{\frac{1}{K_E}}{1 + \frac{R_a J_M}{K_T K_E} s + \frac{L_a J_M}{K_T K_E} s^2} \end{aligned} \quad (6.10)$$

ただし ,  $\Omega_m(s) = \mathcal{L}\{\omega_m(t)\}$  ,  $V(s) = \mathcal{L}\{v(t)\}$  である .

式 (6.10) より , 電流の増加を遅らせるインダクタンスと回転角速度の上昇を遅らせる慣性モーメントという 2 つのエネルギー蓄積素子が二次のダイナミクスをつくっている事がわかる .

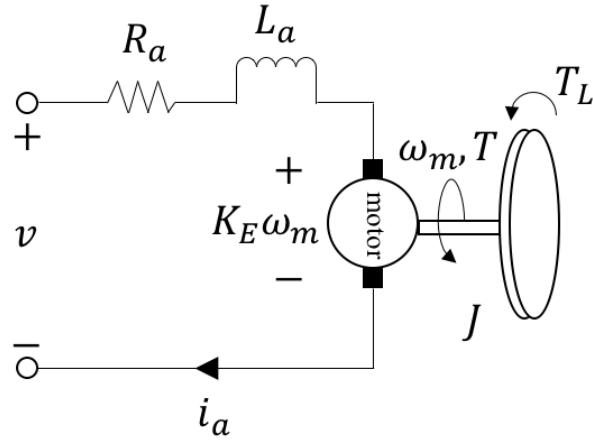


図 17: DC モータの等価回路

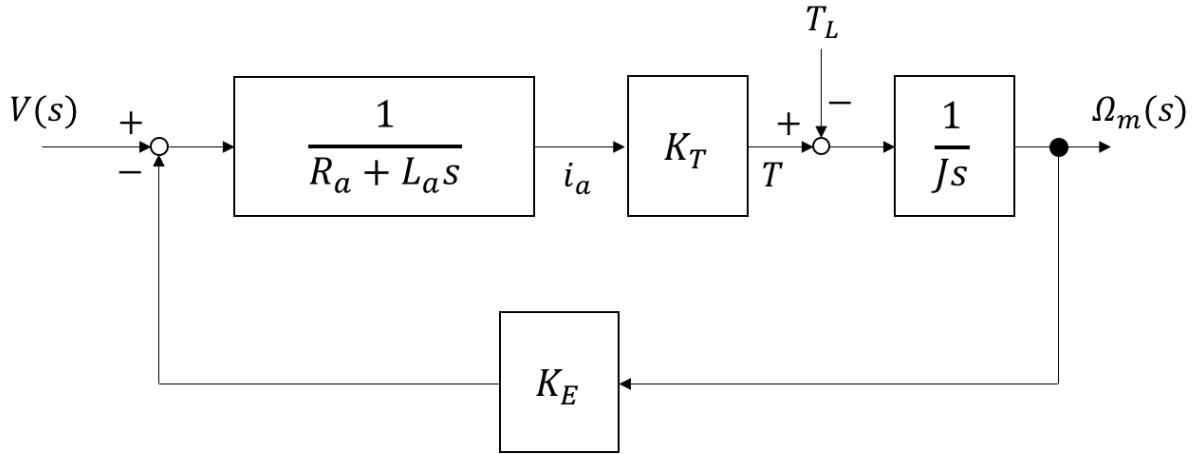


図 18: DC モータのブロック線図

#### 6.2.4 制御系

DC モータの入力電圧から出力角速度への伝達関数を  $G(s)$  をとおく。DC モータの入力電圧から出力角速度への伝達関数は式 (6.10) に示すように二次遅れ系となる。モデルを簡単にするためステップ応答法を用いて次式のように一次遅れ + むだ時間系に近似することにした。

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (6.11)$$

$K$  はゲイン,  $T$  は時定数,  $L$  はむだ時間である。ステップ応答法を用いて、以下のように DC モータの入力電圧から出力角速度への伝達関数を求め、同定を行った。

- (1) 電圧 7.2 [V], Duty 比 0.1 の PWM 信号を加え、DC モータの角速度が定常になるまでの応答を記録した。この応答を図 19 に示す。このとき入力電圧は電圧と Duty 比の積である 0.72 [V] に相当し、定常での角速度は 30.74 [rad/s] であるのでゲイン  $K$  は

$$K = \frac{30.74}{0.72} = 42.69 \quad (6.12)$$

となる。

- (2) (1) で得られた応答について、図 20 に示すように応答の変曲点で接線を引くことで時定数  $T$  とむだ時間  $L$  を求めた。 $T$ ,  $L$  は以下の値となった。

$$T = 0.031 \quad (6.13)$$

$$L = 0.006 \quad (6.14)$$

- (3) (1), (2) より DC モータの入力電圧から角速度への伝達関数は次式のようになつた。

$$G(s) = \frac{42.69e^{-0.006s}}{1 + 0.031s} \quad (6.15)$$

この伝達関数より同定した曲線を図 21 に示す。

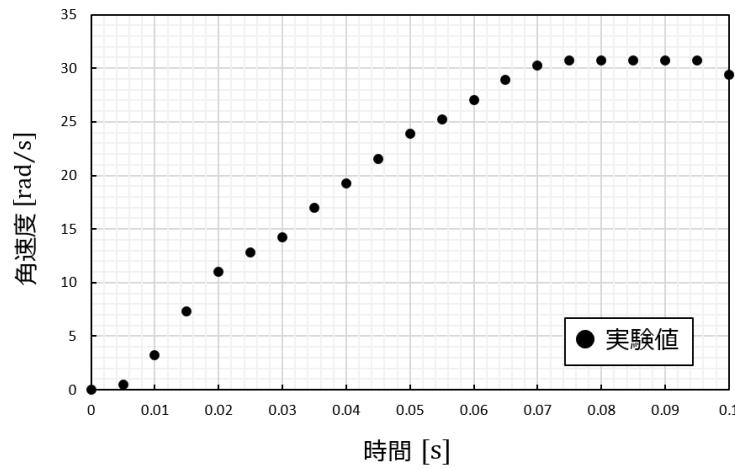


図 19: DC モータのステップ応答

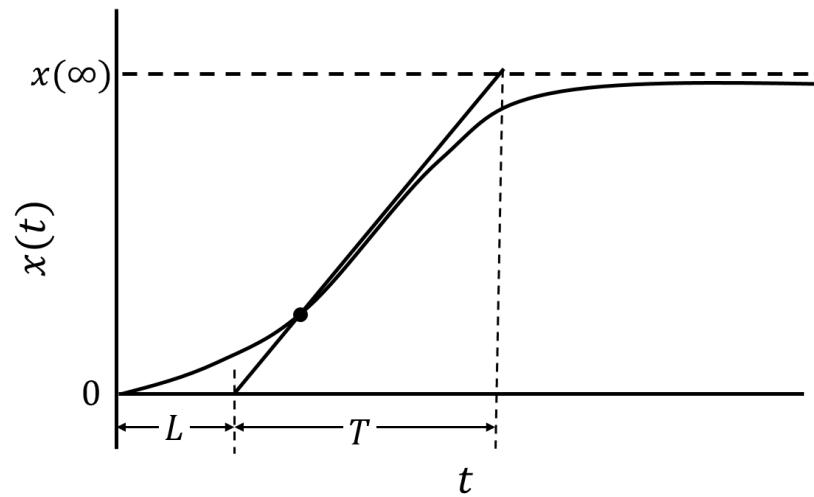


図 20: ステップ応答から  $T$  と  $L$  を求める方法

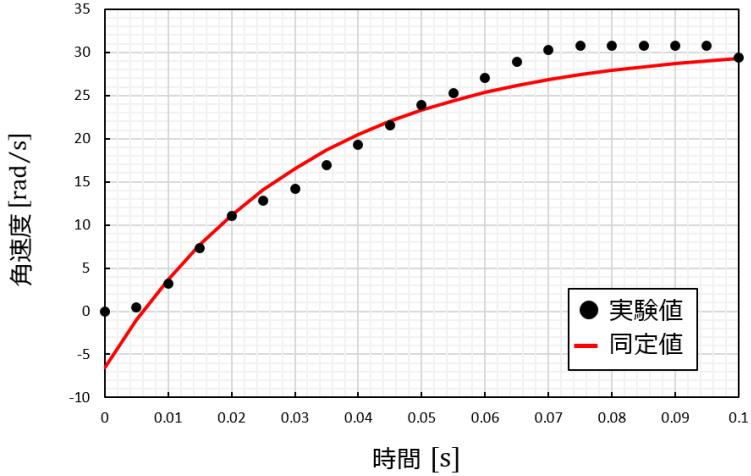


図 21: DC モータの同定結果

DC モータの制御系は、図 22 に示すように PI 制御器を用いた閉ループ系で構成する。PI 制御器を用いるのは、DC モータの角速度を目標角速度へ速やかに到達させるためである。PI 制御器中の  $K_p, K_i$  は順に比例ゲイン、積分ゲインである。これらのパラメータの値をボード線図を用いて以下に決定した。まず、伝達関数  $G(s)$  と PI 制御器のそれについてボード線図での折れ点周波数を求めた。 $G(s)$  の折れ点周波数を  $\omega_1$  とおくと、その値は

$$\omega_1 = \frac{1}{T} = 32.25 \text{ [rad/s]} \quad (6.16)$$

となった。一方、PI 制御器の折れ点周波数は PI 制御器の式を

$$K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left( 1 + \frac{\omega_{PI}}{s} \right) \quad (6.17)$$

と変形したときの  $\omega_{PI}$  である。ただし、

$$\omega_{PI} = \frac{K_i}{K_p} \quad (6.18)$$

である。

次に、伝達関数  $G(s)$  と PI 制御器のそれについてゲインと位相を求めた。伝達関数  $G(s)$ 、PI 制御器のゲインをそれぞれ  $g_s, g_{PI}$ 、位相をそれぞれ  $\phi_s, \phi_{PI}$  とおく。このとき  $s = j\omega$  とおけば、

$$g_s = 20 \log_{10} |G(j\omega)| = 20 \log_{10} \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \quad (6.19)$$

$$\phi_s = -\tan^{-1} \omega T - \omega L \quad (6.20)$$

$$g_{PI} = 20 \log_{10} \left| K_p + \frac{K_i}{j\omega} \right| = 20 \log_{10} \sqrt{K_p^2 + \left( \frac{K_i}{\omega} \right)^2} \quad (6.21)$$

$$\phi_{PI} = -\tan^{-1} \frac{K_i}{K_p \omega} \quad (6.22)$$

と各ゲイン、位相の式が求められた。ここで、PI制御器 + 伝達関数  $G(s)$  の開ループ伝達関数のゲイン、位相をそれぞれ  $g_c, \phi_c$  とおく。これらの式は伝達関数  $G(s)$  と PI制御器のゲイン、位相をそれぞれ足し合わせて表せるので  $g_c, \phi_c$  の式は

$$g_c = g_s + g_{PI} \quad (6.23)$$

$$\phi_c = \phi_s + \phi_{PI} \quad (6.24)$$

となった。これらの式より PI制御器 + 伝達関数  $G(s)$  のボード線図を描くことができる。

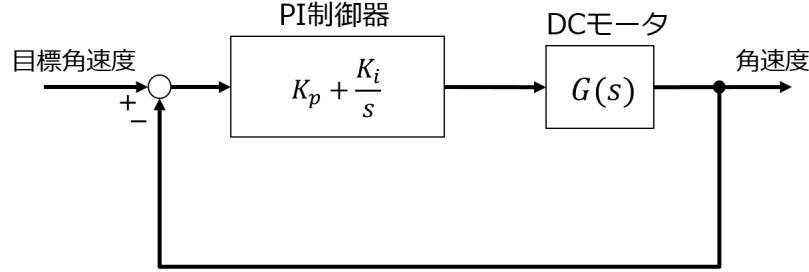


図 22: DC モータの制御系

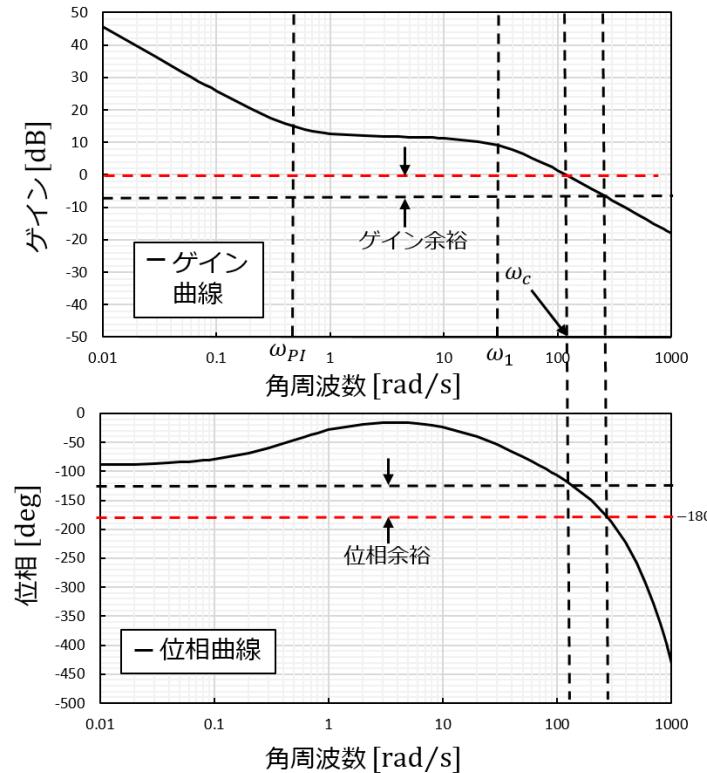


図 23: PI 制御器 + 伝達関数  $G(s)$  のボード線図

DC モータの角速度を目標値に追従させる制御を行うために以下のようにして PI 制御器 + 伝達関数  $G(s)$  のボード線図を描いた .

- (1) PI 制御器 + 伝達関数  $G(s)$  のボード線図について , ゲイン交差周波数 (ゲインが 0 [dB] となるときの角周波数) を  $\omega_c$  とおく . このとき , 伝達関数  $G(s)$  の折れ点周波数  $\omega_1$  に対して , PI 制御器の折れ点周波数  $\omega_{PI}$  は  $\omega_1$  より数倍程度小さく ,  $\omega_c$  は数倍程度大きくなるように設定するようにした . 一般にサーボ系ではゲイン余裕を 12 ~ 20 [dB] , 位相余裕を 40 ~ 60 [deg] とするのがよいとされるので , これらの値を目安にして  $\omega_c$  ,  $\omega_{PI}$  の値を変えることでゲイン余裕 , 位相余裕の値を調整した . また ,  $\omega_c$  を大きくすれば速応性が大きくなるほど速くなるが , 負荷の共振現象が存在する場合に負荷の振動を助長してしまうため大きくし過ぎないように設定することにした . これらの条件より

$$\omega_{PI} = 0.5 \text{ [rad/s]} \quad (6.25)$$

$$\omega_c = 120 \text{ [rad/s]} \quad (6.26)$$

とした .

- (2) ゲイン交差周波数  $\omega_c$  付近ではゲインの傾きが  $-20 \text{ [dB/sec]}$  となるのが望ましく , 角周波数がゲイン交差周波数  $\omega_c$  のときには次の等式が成り立つ .

$$|G(j\omega_c) \cdot \left( K_p + \frac{K_i}{j\omega_c} \right)| = 1 \quad (6.27)$$

- (3) 式 (6.25) , 式 (6.26) の値を用いて , 式 (6.18) , 式 (6.27) を連立して解くと , 比例ゲイン  $K_p$  , 積分ゲイン  $K_i$  は以下のように求まった .

$$K_p = 0.090 \quad (6.28)$$

$$K_i = 0.045 \quad (6.29)$$

PI 制御器のゲインをこのように設定したとき , PI 制御器 + 伝達関数  $G(s)$  のボード線図は図 23 に示すとおりである . このときのゲイン余裕 , 位相余裕は以下のとおりであった .

$$\text{ゲイン余裕 : } 7.14 \text{ [dB]} \quad (6.30)$$

$$\text{位相余裕 : } 63.6 \text{ [deg]} \quad (6.31)$$

式 (6.28) , 式 (6.29) の値を用いた PI 制御器では , 一般にサーボ系で良いとされるゲイン余裕 , 位相余裕を得ることはできなかった . ゲイン交差周波数  $\omega_c$  付近でゲインの傾きを  $-20 \text{ [dB/sec]}$  にでき ,  $\omega_{PI}$  ,  $\omega_c$  ,  $\omega_1$  が互いに干渉しないようにボード線図を描けたのでこの PI 制御器を用いて図 22 のような閉ループ制御系を構成した .

構成した閉ループ制御系に対して , DC モータの角速度追従実験を行った . 目標角速度は 150 [rad/s] とした . このときの応答を図 24 に示す . 応答は目標角速度 150 [rad/s] に 0.3 [s] で到達して定常となった . これより , 目標角速度への追従が実現できたといえる .

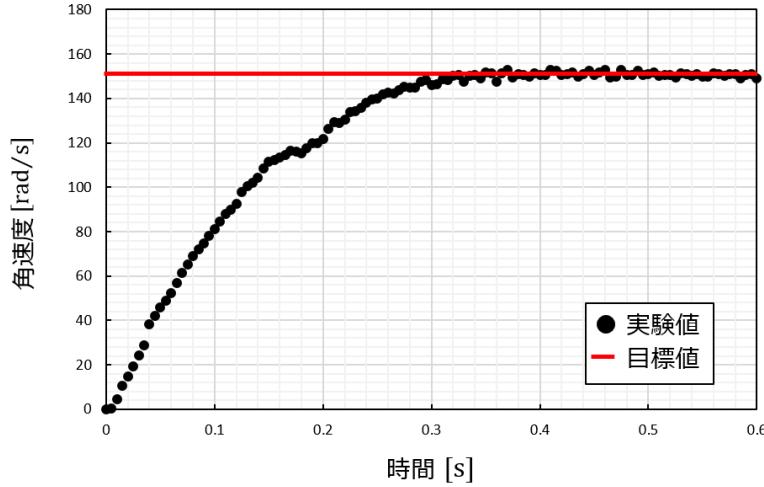


図 24: 閉ループ制御系の応答

## 7 結果

以下に、走行会における走行結果を示す。走行成功時の最速タイムは 48.5 秒であった。

### 1 回目

走行失敗。2 週目の終盤のカーブでセンサ異常により壁に衝突した。

### 2 回目

走行成功。

### 3 回目

走行成功。ただし、走行開始直後でコントロールラインの検出に失敗したため、3 周回った後に停止。また、2 回目の走行時よりもタイヤの目標角速度を高く設定したところ、コース周回中に一時的にステアリング制御が不安定になり、振動を起こしている場面があった。

## 8 考察

ここでは 1 回目の走行において壁に衝突した原因、3 回目の走行においてコントロールラインを一回検出し損ねた原因、またステアリング制御が振動を起こした原因の 3 点について考察していく。

### 8.1 壁に衝突した原因

1 回目の走行では、2 周目の終盤までは安定して走行していたが、終盤の U 字カーブでステアリングを切ることなく壁に衝突した。この時、一切ステアリング動作をしていなかったため、距離センサの異常により距離データの取得に失敗していたと考えられる。距離センサの異常原因として RaspberryPi3 Model B の CPU 負荷が大きくなりすぎてしまったことや、振動等により配線の接触不良が発生したこと等が考えられる。

## 8.2 コントロールラインを検出し損ねた原因

我々のロボカーは、フォトリフレクタを用いてコントロールラインを検出する際に、ロバスト性向上のためにフォトリフレクタから100回データを取得し、その平均がしきい値を超えたかどうかでコントロールラインの白色部を通過したかどうかを検出していた。そのため、コントロールラインを通過する速度、位置、タイミングによっては、100回計測している間に白色部を通過してしまい、コントロールラインの検出が正しく行えなかつた可能性があると考えられる。

## 8.3 ステアリング制御が振動を起こした原因

我々が使用した距離センサはセンサの仕様上、距離の測定に最速でも20 [ms]かかる。今回、ロボカーにはこの距離センサを3つ搭載し、それぞれのセンサで距離を測定した後にその距離データに応じて機体を制御していた。すなわち、制御周期は最速でも60 [ms]はかかることになる。さらに、実際には他の処理による遅延も含まれるため、より制御周期は遅くなっていたと考えられる。これにより、タイヤの目標角速度を高く設定した時に制御周期が追いつかなくなってしまい、振動を起こしてしまったと考えられる。

## 9 感想と次年度への提言

今回、私は主にロボカーのソフトウェア開発とチーム全体の統括を担当した。そこで最も痛感した点はプロジェクトマネジメントの大変さである。RCRはチームで進めるプロジェクトであり、円滑なプロジェクト進行には、各メンバ間での進捗状況や意見等の共有が不可欠である。しかし今回は、あるメンバの仕事が終わらないと他のメンバの仕事に着手できないという状況を生んでしまったり、一部のメンバに仕事が集中してしまい、他のメンバにその進捗状況がうまく伝わらなかった等といった様々な問題が生じてしまった。

主な原因として、例年に比べ10人と人数が多くチームが大きくなりすぎた点、時系列を意識した役割ないし仕事の分担が出来ていなかった点、大学院一般入試の有無や経験の差などによって全メンバに平等に仕事を割り振ることが難しくなった点、そしてミーティングでその差を十分に埋めきれず、各メンバ間で理解度に差が生じてしまった点等が挙げられる。

また今年度は、機体のベースが配布されたことにより例年よりも発表内容が少なくなったことに加え、人数が多かったため、発表の際に一人あたりの分量が少なくなってしまい、かつ内容が細かく分割されるため、聴衆に伝わりやすいスライド構成にすることが難しかった。プレゼンテーションの評価のために全員発表にしなければならないと言った事情はもちろん承知しているが、来年以降はこの点に多少なりとも何かしらの配慮があれば良いと考える。

## 10 物品一覧

今回の配布品, 引継ぎ品, 購入品についてそれぞれ, 以下の表にまとめる.

表 10.2: 配布品一覧

メーカー	商品名	単価 (円)	数量	価格 (円)
GWS	SERVO MOTOR GWS03T-2BBMG-J	1540	1	1540
日本電産コパル電子	ロータリエンコーダ インクリメンタル 500	7145	1	7145
TAMIYA	22T・23T AV ピニオンギア	378	1	378
TAMIYA	1/12RC トヨタ トムス 84C	24624	1	24624
TAMIYA	SP.1487 380-Sモーター	648	1	648
	合計			34335

表 10.3: 引継ぎ品一覧

メーカー	商品名	単価 (円)	数量	価格 (円)
RSコンポーネンツ	Raspberry Pi 3 Model B	6200	1	6200
Bellnix	ISOLATED DC-DC CONVERTER BTD05-05S200D	3368	1	3368
Cytron	10Amp DC Motor Driver	1250	1	1250
Anker	Astro E4 13000mAh Portable Charger	3456	1	3456
Powers	STREET RACER 3300	5076	1	5076
Powers	Powers Max 4000 Ni-MH 7.2V 4000mAh 6CELL ニッケル水素バッテリ	4320	1	4320
TOSHIBA	microSDHCメモリーカード8GB	1058	1	1058
SANYO	OSコンデンサー 10V 47uF 10個	1300	1	1300
uxcell	AC 250V/2A 120V/5A 3ポジション SPDT トグルスイッチ	391	2	782
協和ハーモネット	UL3265-24 L-2×7 耐熱電子ワイヤー	560	1	560
	合計			27370

表 10.4: 購入品一覧

メーカー	商品名	単価	数量	価格
Pololu	VL53L0X Time-of-Flight 距離センサモジュール	1879	3	5637
Pololu	QTR-1RC フォトリフレクタ・モジュール	550	1	550
Herwell Asia Limited	ブレッドボード・ジャンパーウイヤ (オースメス) 15cm (10本入り)	220	1	220
Supertech Electronic Co., Ltd.	セラミックコンデンサー 1000pF50V	5	10	50
村田製作所	絶縁ラジアルリード型 積層セラミックコンデンサー 3.3μF50V5mm	50	10	500
エーモン工業	ギボシ端子セット	539	1	539
TAMIYA	ユニバーサルブレードL	648	3	1944
OptoSupply	高輝度5mm赤色LED 15度 OSR5CA5111A-WY (10個入り)	200	1	200
矢島製作所	両面スルーホール ガラスコンポジット・ユニバーサル基板 95×72mm	170	1	170
教室在庫	XHピンヘッダ	10	12	120
教室在庫	XHハウジング	10	15	150
教室在庫	アセンブリケーブル	30	29	870
教室在庫	SERVO MOTOR GWS03T-2BBMG-J	1540	1	1540
教室在庫	Powers Max 4000 Ni-MH 7.2V 4000mAh 6CELL ニッケル水素バッテリ	3000	1	3000
	手数料			1840
	合計			17330
	残高			2670

## 参考文献

- [1] SWITCH SCIENCE, "Pololu VL53L0X Time-of-Flight 距離センサモジュール" <<https://www.switch-science.com/catalog/2869>> 2018年6月1日アクセス .
- [2] Philips Semiconductors, "I<sup>2</sup>C バス仕様書バージョン 2.1" <<http://ekousaku.web.fc2.com/doc/I2C.pdf>> 2018年6月1日アクセス .
- [3] 表允, 倉爪亮, 渡邊裕太, "詳説 ROS ロボットプログラミング-導入から SLAM・Gazebo・MoveIt まで-", Kurazume Laboratory, pp.15-18, (2015).
- [4] 小倉崇, "ROS ではじめるロボットプログラミング", 工学社, pp.8-10, (2015).
- [5] 後閑哲也, "作る, できる/基礎入門 電子工作の素", 技術評論社, p181, (2009).
- [6] Cytron technologies, "MD10C Enhanced 10Amp DC Motor Driver User's Manual Rev2.0 v1.0", <<https://www.robotshop.com/media/files/PDF/user-manual-md10c-v2.pdf>>, 2018年6月2日アクセス .
- [7] MABUCHI MOTOR, "Let's Motorize", <<https://www.mabuchi-motor.co.jp/motorize/branch/motor/>>, 2018年6月3日アクセス .
- [8] SWITCH SCIENCE, "10Watt BTD Series", <<http://www.bellnix.co.jp/pdf/pdf/BTD.pdf>>, 2018年6月2日アクセス .
- [9] 後閑哲也, "作る, できる/基礎入門 電子工作の素", 技術評論社, pp.84-85, p186, (2009).
- [10] Pololu Corporation, "QTR-1RC Reflectance Sensor(2-Pack)", <<https://www.pololu.com/product/2459>>, 2018年6月1日アクセス .

- [11] Interface , ”実験研究！サーボモータの応答特性” ,  
[http://www.kumikomi.net/interface/sample/201407/if07\\_108.pdf](http://www.kumikomi.net/interface/sample/201407/if07_108.pdf) ,  
2018 年 6 月 25 日アクセス .
- [12] 坂本哲三, ”電気機器の電気力学と制御”, 森北出版, pp.164-168, (2007).