

# 競技会に向けたライントレーサの制作

電子情報技術科 松下 剛

## Production of line tracer for competition

Tsuyoshi MATSUSHITA

**概要** 当校の電子情報技術科では、電子回路設計やマイコンプログラミングをカリキュラムに取り入れている。ハードウェア、ソフトウェアの技術研鑽として、競技会に向けての自律走行ロボット（以下、ライントレーサ）の制作、競技会への挑戦、ライントレーサの更なる改善の検討、制作を実施したので報告する。

### 1. はじめに

毎年実施される全日本マイクロマウス大会のロボットレース競技（以下、大会）<sup>1)</sup>用に、高速かつ高精度走行が可能な競技会用ライントレーサを制作した。制作した機体とコースの一部を図1に示す。

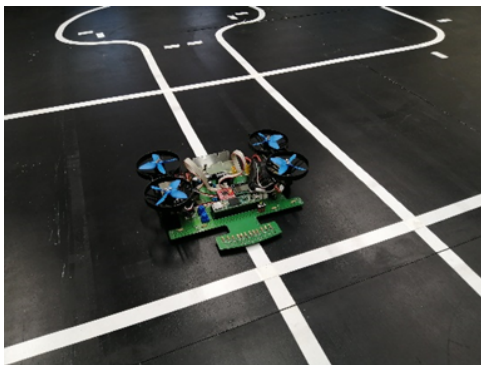


図1 機体と走行コース

大会は、周回コース（白線）に複数設置されたマーカを、センサで検知し、自律走行の精度とタイムを競う競技である。過去の大会に出場した機体の技術情報を基に、ライントレーサを制作し、翌年の大会に出場して前年を上回る結果<sup>2)</sup>を残せた。

また、大会出場後に、更に上回るタイムを記録することができたことから、併せて報告する。

### 2. 設計

#### 2.1 設計した仕様

大会出場後に、設計、制作した機体の仕様を表1に示す。

表1 機体の仕様

項目	しきい値	備考
機体の大きさ	250×250×60 [mm]以内 <sup>※1</sup>	全長×全幅 ×高さ
自律走行	操作数=0 <sup>※1</sup>	スタートから ゴールまで
平均速度	≥1.6 <sup>※2</sup> [m/sec]	コース長÷ 走行時間
走行距離	≥3[周]	1周=約19m <sup>※1</sup>
黒地白線コース スタート/ ゴールマーカ <sup>※3</sup>	検知ミス数 =0	コース進行 方向右側

※1：大会の規定 ※2：目標タイムから算出

※3：マーカのサイズは19×40[mm]<sup>※1</sup>

#### 2.2 ハードウェア

まず、機体用のマイコンとして、多機能化、高速処理、多センサ化、及びプログラミングの容易性の観点から、Arduinoと互換性のあるマイコンボードTeensy3.6<sup>3)</sup>にすることにした。

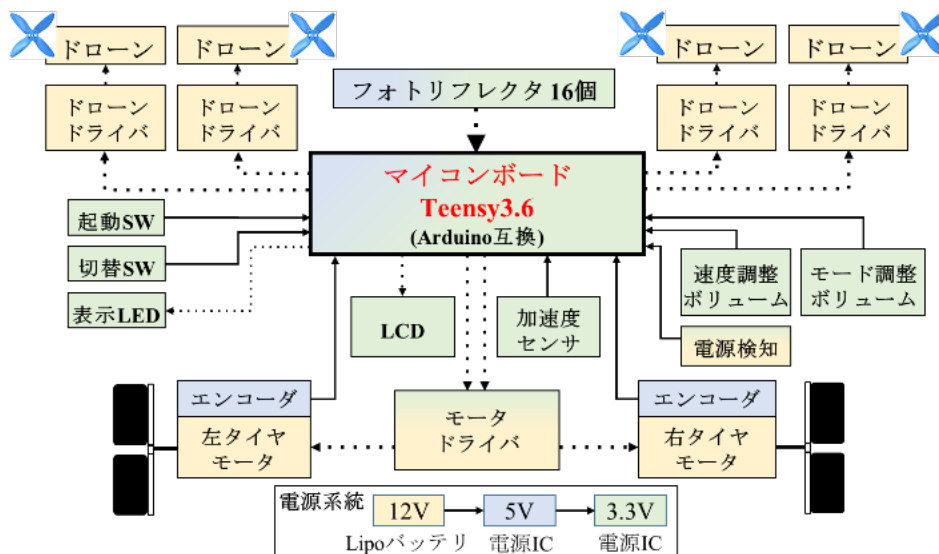


図2 機体の構成図

次に、ドローンユニット搭載と高速走行の両立を考慮し、バッテリーの電圧を7.4Vから11.2Vに、電池の電流容量を300mAhから500mAhにそれぞれ変更した。これらの変更を、以下に記載する3回の試作機で検討及び実証した。第4の試作（最終案）の機体に関する構成図を図2に示す。

第1の試作では、マイコンボード（Teensy3.6）、汎用DCモータ、モータドライバ（TB6612FNG）、フォトリフレクタをブレッドボードに搭載した機体を設計した。

第2の試作では、昨年度設計した基板に、高性能DCモータの搭載、多電源化、コース検知センサの増加（フォトリフレクタ<sup>4)</sup>:8→16）、電池（7.4V）を搭載した機体を設計した。本試作以降において、タイヤホイール、ピニオンギア、モータマウント、電池ケースが必要となった。これらは、3DCADであるFusion360で設計した。これらの設計後には、生産技術科の所有の3Dプリンタでこれらの部品の試作、製作を行った。

第3の試作では、これまでの評価結果より、電源の再選定（12、5、3.3V）、部品の電源電圧と配置の最適化、バッテリーの電圧検知回路とマイコン電源用スイッチの追加、機能追加用のユニバーサル領域の配置を検討して機体を設計及び試作し、動作確認を行った。更に、本試作から、高速走行に必要なダウンフォース（機体を下に抑える力）を発生させるため、4回転翼型ドローンユニットを検討した。

ドローンユニットには、小型ドローン用ユニットを採用、重量と電源消費を抑制した。また、市販のブレードカバーを用いて安全性にも配慮した。但し、従来のプログラムに、ドローン用モータドライバの起動・動作シーケンスが別途追加になった。

第4の試作では、これまでの評価に基づき、部品配置の高精度化、ドローンと走行の両立を目的としたマイコンのPWM（Pulse Width Modulation）端子の再設定、電源起動時の不安定動作を防止するために電源とエンコーダ配線にEMI（Electro Magnetic Interference）除去フィルタの追加と配置、後述するドローン用コネクタ（電源及び信号線）の増加を考慮した機体を設計した。

### 2.3 ソフトウェア

採用したマイコンTeensy3.6は、ソフトウェア（プログラム）の設計資産、技術情報が豊富なArduino-IDEで開発できる。機能追加に伴い、必要なライブラリを調査・追加した。

走行用のDCモータは、マイコンから発生するPWM信号で速度を制御する。本モータ制御には、デジタルPID（Proportional-Integral-Differential）制御<sup>9)</sup>を採用、走行ラインの中心と機体先端にある12個のフォトリフレクタ（以後、走行センサ）の中心を常に一致させるものである。タイマ関数で生成される一定時間毎にコースラインの走行センサ値を左右で取得、同値の左右差が0になるような左右

のモータの速度（PWM 信号の Duty 比に比例した数値、以後 PWM 値）を一定時間間隔で計算する。具体的には、下記式（1）で左右差 0 に対する誤差が分かり、式（2）、（3）で左右の PWM 値を算出する。

$$\text{Mov} = K_p \times \text{Err\_now} + K_d \times (\text{Err\_now} - \text{Err\_pre}) \quad (1)$$

$$\text{PWM\_L} = K \times \text{PWM} + L \times \text{Mov} \quad (2)$$

$$\text{PWM\_R} = K \times \text{PWM} - L \times \text{Mov} \quad (3)$$

ここで、上式の各変数は、以下のとおりである。

$K_p, K_d, K, L$  : パラメータ（評価後決まる）

Err\_now : 左右のセンサ値の差分

Err\_pre : Err\_now の 1 タイミング前の値

PWM : 基本速度に相当する PWM 値

Mov : 偏差（制御の基本パラメータ）

PWM\_L/R : モータの速度に相当する PWM 値

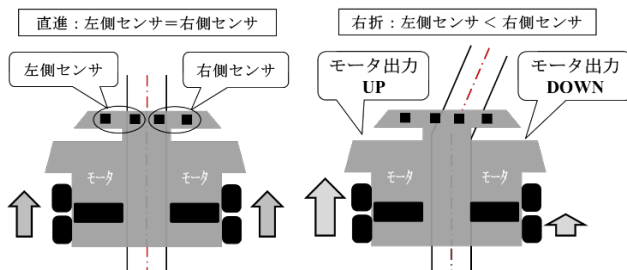


図 3 基本走行例

スタート・ゴールの判断には、機体右端部のセンサで判断、ゴールマーカの検知後に停止する制御を実装した。十字路の判断には、十字路に機体が到達した際にスタート・ゴール検知センサとコーナ検知センサの誤動作を考慮、十字路では 2 つの検知センサによる無効化処理を実装した。以上 2 つの機能を走行の制御と同じ一定時間間隔で実施した。以後、デジタル PID 制御による走行、スタート・ゴールの判断、十字路の判断を基本走行と定義する。

基本走行のプログラムに脱線対策プログラムを追加した。理由は、高速走行時に機体がコースを外れても自ら復帰するためである。本動作として、①外れる直前の状態から、機体の左右のどちらにコースラインがあるのかを認知、②その場で高速旋回を行う。③②の旋回後に、機体前方にあるコースセンサ

がラインを感知後に基本走行に戻る。また、④②の旋回後に一定時間以内に復帰不可の場合、安全性の観点から走行を強制終了させる。

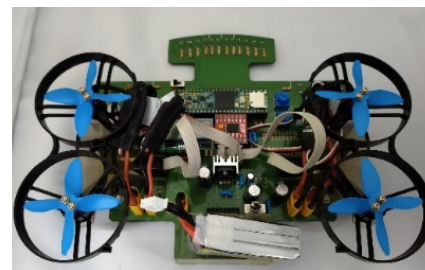
本脱線対策プログラムのために、走行の準備段階において、コースセンサがコースライン上、全て白いライン上、全て黒い場所上にそれぞれある場合のセンサ値を機体に記憶させる。このセンサ値は、基本走行の一つである十字検知にも利用した。

搭載したドローンユニットの起動シーケンスと動作プログラムを実装した。動作は、スタートスイッチ押下、自動的にドローンユニットの起動シーケンスに移行、走行開始と同時にユニットの始動（初期信号をドローンユニットに一定時間送信後、ドローンの回転速度に対応する PWM 信号を送信）である。走行終了後には、ドローンユニットも DC モータ同様に停止する。

### 3. 製作

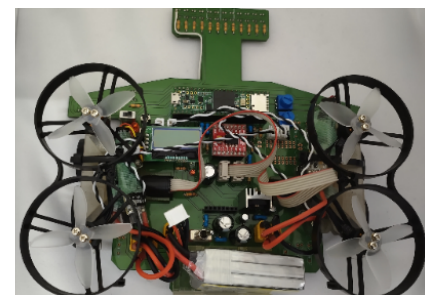
#### 3.1 ハードウェアの製作

4 回目の試作後に 2 種類の機体を制作した。図 4 に示すように、2 種類の機体を製作した。



奥行 : 165 × 幅 : 215 × 高さ : 63 (mm) 重量 : 370g

(a) D 版



奥行 : 211 × 幅 : 118 × 高さ : 63 (mm) 重量 : 378g

(b) S 版

図 4 製作した 2 種類の機体

### 3.2 ソフトウェアの製作

2つの機体（S版とD版）で大きさ、重量が異なるので、基本走行システムであるデジタルPID制御やドローンユニットのパラメータ値やセンサの閾値（基本走行、スタート・ゴールの判断、脱線対策プログラム）を機体毎に調整した。調整は、実際に機体をコース上で走行させ、走行状態とタイムを確認しながら実施した。

## 4. 評価

### 4.1 評価方法

大会規定に準拠した周回コースで制作した機体を走行させ、1周の走行タイムを計測し、併せて走行状態と動作を確認する。周回コースとしては、既存の短距離（8m）のものと図5に示す本大会と同一の周回コース（19.4m）を使用した。

### 4.2 評価治具（大会コース）の製作

出場した大会ではコースが事前公開された。図5に事前公開された図面を示す。本図面に基づいて、図6に示すコースを本校内に製作した。黒地の板の上に白色のビニールテープを貼り製作した。本製作物の評価で大会の環境に近い状態で調整ができた。

評価者の安全性を考慮して、機体の暴走に対して、評価時にはコースの周囲に弾力性のある素材による壁を設置した。



図6 製作したコース

### 4.3 評価結果

第1及び第2の試作で制作した機体では、採用したマイコンボード（Teensy3.6）、モータドライバ、高性能DCモータ及び検知センサの増加という機体の基幹部品による走行を確認できた。しかし、電源の不安定動作、電圧の選定ミス、部品の選定不良、部品配置ミスを確認できた。

第3の試作で制作した機体では、基本走行の確認、走行精度向上、及びドローンユニットの動作を実現した。更に、機体に搭載したドローンユニットにおける、ダウンフォース（重量増加分）とブレー

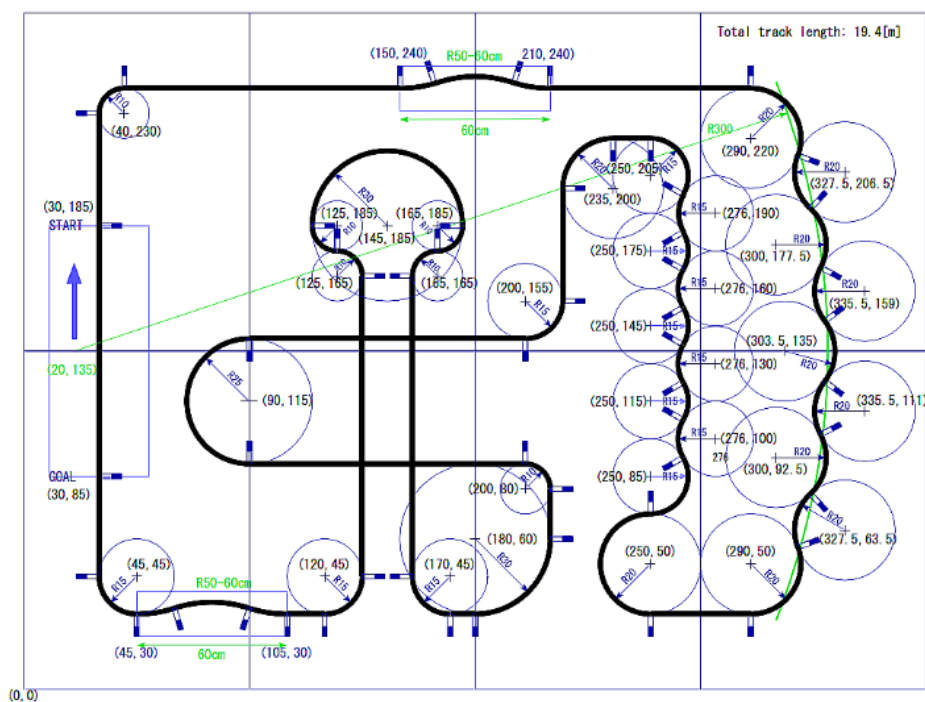


図5 大会コースの図面

下の回転速度（PWM 値）依存性を確認できた（図7）。ダウンフォースが回転速度の2乗におおよそ比例（図7の点線）していることから、本ユニットが正常に動作していると考えられる。

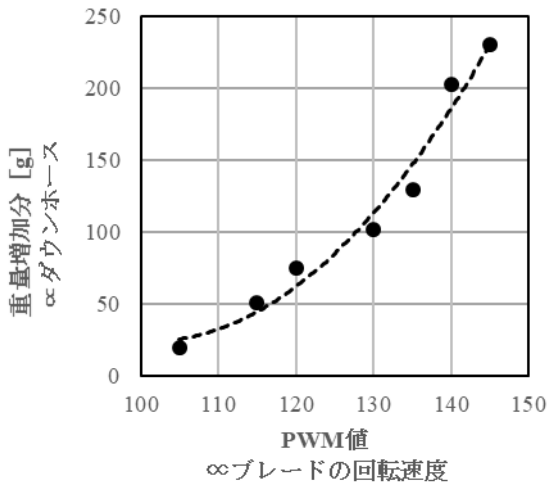


図7 ダウンフォースの速度（PWM 値）依存性

本試作での課題は、部品配置精度の低さ、ドローンユニットの動作と走行動作が両立できないこと、電源起動時の不安定動作及び高速走行時の不安定性であった。よって、これまでに用いた基板では、仕様を満たす高速走行の実現が困難と判断した。

第4の試作で制作した機体（大会出場した機体）で、表1の仕様、すなわち、平均速度 1.6 m/sec、スタート/ゴール間の自律動作、黒地白線のスタート/ゴールのマーカを検知、3周連続の高速走行、達成した。また、今年度から搭載したドローンユニットも問題なく制御でき、高速走行に有効であることを確認した。

#### 4.4 大会結果

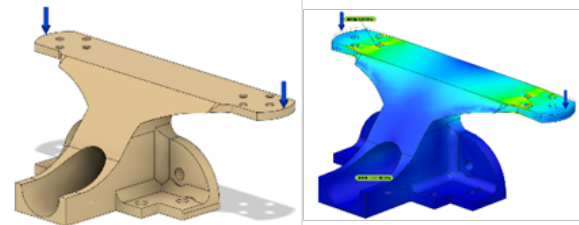
制作した2機体で大会に出場した。各機体の走行タイムと順位は、S版が11.372秒の5位、D版が11.964秒の6位であった。

### 5. 新規機体の制作

#### 5.1 制作内容の検討

まず、部品設計の一つの検証手段として、図8に示す Fusion360 の機能の一つである応力解析<sup>6)</sup>を実

施した。本解析により、対象物の製作前に機体の更なる軽量化と強度の確認ができ、生産性の向上とコスト削減を実現できた。



矢印の箇所に応力を印加  
 応力による分布を CAE 機能で計算  
 (青：応力が弱い⇔黄：応力がやや強い)

図8 モータマウント(左)と応力の解析結果(右)

次に、今大会で上位に入賞していた他機体のデータと比較した際、我々が制作した機体と比べて重量が半分以下であった。よって、この軽量化を意図した基板設計が急務と判断した。具体的には、部品の面積削減と配線の部品化を考慮した基板設計をする必要がある。

#### 5.2 設計

前述の検討より第1の対策として、現在機体に使用している炭層被膜抵抗からチップ抵抗への変更を検討した。製造的に実現可能で、抵抗での消費電力が小さいことから変更が可能と判断した。

第2の対策として、1枚で構成されている機体の基板からセンサ部分を分離した。センサを分離した理由は、技術的には実現可能で、基板の削減面積（軽量化の効果）が大きく、分離が他の部品より容易なためである。

第3の対策として、現在の機体で採用したドローン用モータ1個毎に制御用ドローンドライバ（以後、ESC）を、1つのESCで4つのドローン用モータを制御できるESC（4in1-ESC）への変更を検討した。理由は、軽量化とコスト低減を同時に実現できるためである。

直接的な対策以外に、各部の接続部分の部品を3Dプリンタで考案した。特に、バッテリーケースに4in1-ESCを固定する箇所を付属した。これらの軽量化実現のために、応力解析を利用した。

図9に対策を施した基板の図面を示す。

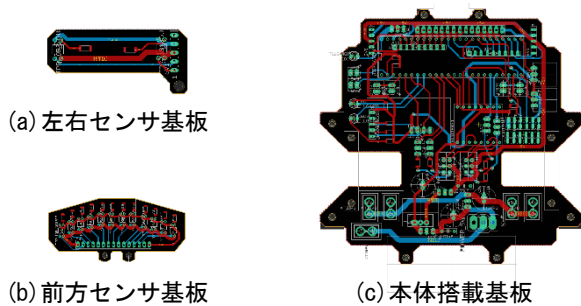
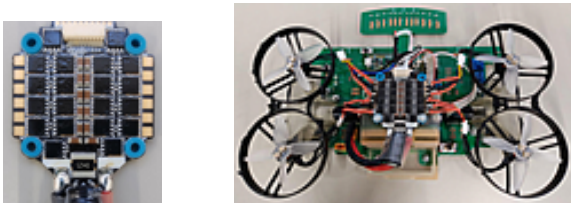


図9 分離基板

### 5.3 製作

4in1-ESCとしてBLHeli社製 60A\_32-DS1200®を  
採用した。追加した制御プログラムの手順を以下に  
示す。図10にESCと機体をそれぞれ示す。

- ①電源投入後に制御信号周波数を1kHzに設定
- ②3秒後2.7kHzに設定
- ③0.1kHz毎にドローン回転速度が1段階変化
- ④1.0kHzまで下げるとドローン停止



(a) 4in1ESC (b) (a)を搭載した機体

図10 軽量化機体

炭素被膜抵抗からチップ抵抗に変更、部品同士の間隔を狭めた配置を行った。この配置により更なる余剰スペースを削除、基板面積の縮小を実現した。これらの対策を施した基板を図11に示す。

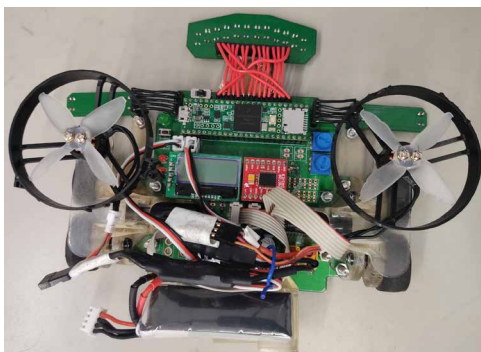


図11 分離機体

### 5.4 評価 (大会コースでの走行タイム)

表2 製作機体の重量と走行タイム

	重量[g]	走行タイム[秒]
軽量化機体	353※※	11.970
分離機体	290※	10.730
大会機体	378※※	11.372

※ドローンの数が2個、※※ドローンの数が4個

### 5.5 考察

分離機体の結果と他の2機体の結果の比較から、機体の軽量化が走行タイムの短縮に有効だったと考えられる。但し、今回製作した基板より、基板の更なる小型(軽量)化は困難であるため、更なる軽量化にはマイコンボード等の小型化・軽量化が必要であると判明した。

### 6. おわりに

大会用のライントレーサを2機体制作り、大会に出場、前年度までの結果を改善でき、当該結果を上回る機体を制作した。最後に、今後の指針を示す。

- ①Arduinoでは高機能化への対応は困難
- ②機体へのドローン搭載は有用
- ③部品軽量化でのCADの応力解析は有用
- ④機体分離、チップ抵抗の採用は有用

### 文献

- 1) 公益財団法人NTF, マイクロマウス2020, 閲覧日2021-02-17, <https://ntf.or.jp/alljapan2020/>
- 2) 公益財団法人NTF, マイクロマウス2019 <https://ntf.or.jp/oldindex.html>
- 3) Teensy3.6 PJRC 閲覧日2021-02-17 <https://www.pjrc.com/store/teensy36.html>
- 4) 秋月電子通商, TPR-105F, 閲覧日2021-02-17, <https://akizukidenshi.com/catalog/g/gI-07266/>
- 5) 西田麻美, モータ制御 the ビギニング, 日刊工業新聞社, 2015, pp.100-107.
- 6) スリプリ, Fusion360 操作ガイドスーパーアドバンス 編, 株式会社カットシステム, 2020, pp.231-267

著者 E-mail Matsushita.Tsuyoshi@jeed.go.jp