

# ロボットレース競技会に向けたライントレーサの開発と評価

島根職業能力開発短期大学校 松下 剛

Development and evaluation of a line tracer for robotrace competition

MATSUSHITA Tsuyoshi

## 要約

電子情報技術科のカリキュラムには電子回路設計とマイコンプログラミングが含まれており、これらの技術力を向上させる目的で、当校では総合制作実習の一環としてロボットレース競技会用のライントレーサの開発と評価を行っている。本稿では、そのライントレーサの開発過程、競技会への参加、そして競技会後に実施したライントレーサの改善と評価の結果について詳しく報告する。

## I 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、高速でミリ秒単位の加減速及び高精度なラインレースが可能な競技会用ライントレーサ（以下、機体）を製作した。製作した機体と公開された大会準拠の周回コース（以下、コース）の一部を図1に示す。

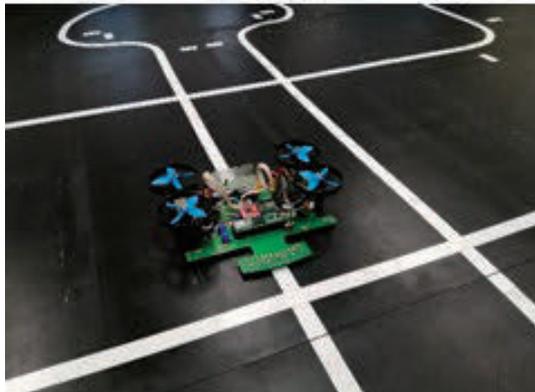


図1 機体と走行コース

この大会は、黒地で白線のコースを機体が自律走行し、完走タイムを競う競技である。コースにおいて、スタート、ストップ、そして旋回が必要なコーナーに複数のマークが設置されており、機体はこれらのマーク

を光センサで検知しながら走行する。前年度の大会に出場した機体の仕様を基に、新たな機体を製作し、今年度の大会に出場して前年を上回る結果<sup>(2)</sup>を残した。

また、大会出場後に機体の改善を検討し、製作した新しい機体で今年度の大会の結果を上回るタイムを記録できたので、併せて報告する。

## II 設計

### 1 仕様

機体の仕様を表1に示す。なお、修正条件として、スタート後の操作回数がゼロであること、及びスタート／ゴールマークのミス数がゼロであることを含む。

表1 機体の仕様

項目	閾値	備考
機体の大きさ	250×250×60 mm 以内 <sup>*1</sup>	全長×全幅×高さ
平均速度	≥1.6 <sup>*2</sup> m/sec	コース長÷走行時間
周回数	≥3 周	1 周＝約 19m <sup>*1</sup>

※1：大会の規定 ※2：目標タイムから算出

## 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>を使用した。

次に、ドローン用4枚回転翼（以下、ドローン）の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、電流容量を300mAhから500mAhにそれぞれ変更した。これらの変更は、以下に記載する3回の試作機で検討及び実証した。4台目の試作機（大会出場機体）の機体に関する構成図を図2に示す。

1台目の試作機では、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。

2台目の試作機では、前年度に設計した実際の機体に近い検討用基板に、これまでの設計内容に高性能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。これらの部品は、3DCADであるFusion360で設計し、3Dプリンタを使用して製作した。

3台目の試作機では、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、動作確認を行った。更に、本試作機から、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4枚回転翼型ドローンを検討した。ドローンには、小型ドローン用ユニットを採用して、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。

4台目の試作機（大会出場機体）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。

## 3 ソフトウェア

採用したマイコンボードは、豊富な設計資産や技術情報を持つArduino IDEで開発したが、度重なる試作による機能追加のたびに、必要なライブラリの調査とプログラムの修正を行った。

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。本モータの制御はデジタルPID（Proportional-Integral-Differential）制御<sup>(5)</sup>であり、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。タイマ関数で生成す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し、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、以下、PWM値）を一定時間間隔で

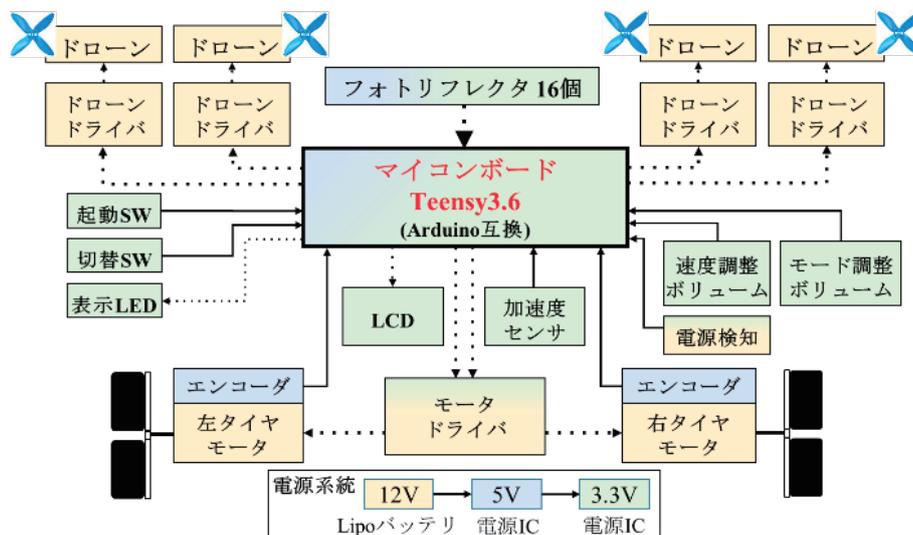


図2 機体（大会出場機体）の構成図

計算する。図3に動作の概要を示す。具体的には、式(1)で左右差0に対する誤差(制御量)を計算し、式(2),(3)で左右のモータの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

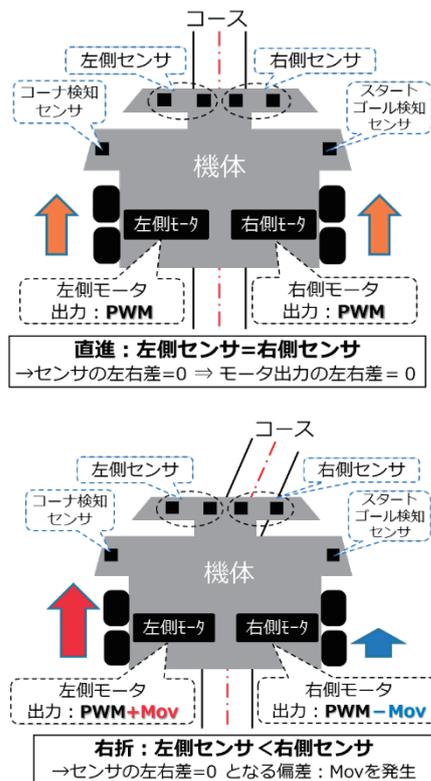


図3 基本走行例

スタートとゴールの判断は機体右端部のセンサで行い、ゴール時にはセンサが検出後に停止する制御プログラムを実装した。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し、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。以上の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。

高速走行時に機体がコースを外れても自ら復帰できるように、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。追加した動作は以下の①から③である。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する。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、②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。

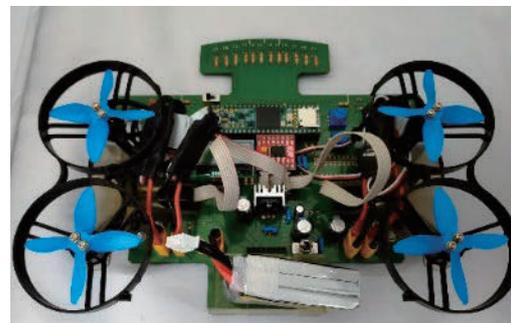
本脱線対策プログラムのために、走行の準備段階において、コースセンサがコースライン上、全て白いライン上、全て黒い場所上にそれぞれある場合のセンサ値を機体に記憶させる。このセンサ値は、基本走行の一つである十字検知にも利用した。

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により自動的にドローンの起動シーケンスに移行し、走行開始と同時にユニットの始動(初期信号をドローンに一定時間送信後、ドローンの回転速度に対応するPWM信号を送信)とする。走行終了後には、ドローンもDCモータ同様に停止する。

### III 製作

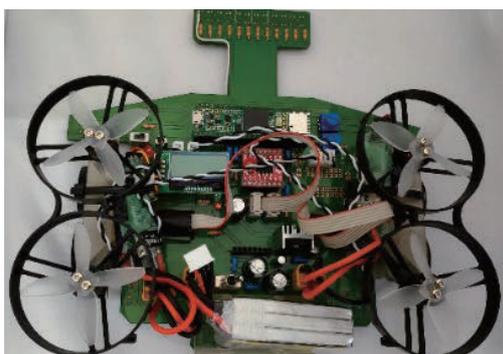
#### 1 ハードウェア製作

4回目の試作後に、図4に示す2種類の大会出場機体を製作した。



興行：165×幅：215×高さ：63mm 重量：370g

(a) D版



奥行：211×幅：118×高さ：63mm 重量：378g  
(b) S版

図4 製作した2種類の機体

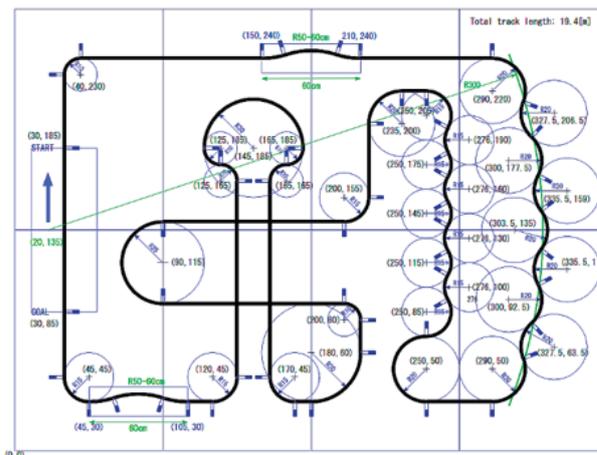


図5 大会コースの図面

## 2 ソフトウェア調整及びチューニング

2つの機体（D版とS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、設定した。調整は、実際に機体を走行させ、走行状態とタイムを確認しながら実施した。



図6 製作したコース

## IV 評価

### 1 評価方法

評価としては、機体を大会規定に準拠したコースで走行させ、1周の走行タイムを計測すると同時に走行状態を確認する。事前公開された大会コース（19.4m）の図面を図5に示す。

### 2 評価用大会コースの製作

大会コースの図面に基づき、本校内で黒地の板の上に白色のビニールテープを貼って自作のコースを製作した（図6）。このコースにより、大会の環境に近い状態で機体の調整と評価を行うことができた。評価者の安全性を考慮し、機体の暴走に備えて評価時にはコースの周囲に弾力性のある素材で壁を設置した。

### 3 評価結果

2台目までの試作機において、タイムが20秒程度でコースの完走を確認できた。しかし、電圧の確認不足、部品の選択漏れによる電源の不安定動作、部品配

置ミスも併せて確認できた。

3台目の試作機では、コースの完走（タイム15秒程度）及びドローンの動作を実現した。更に、機体に搭載したドローンにおける、ダウンフォース（重量増加分）とブレードの回転速度（PWM値）依存性を確認できた（図7）。

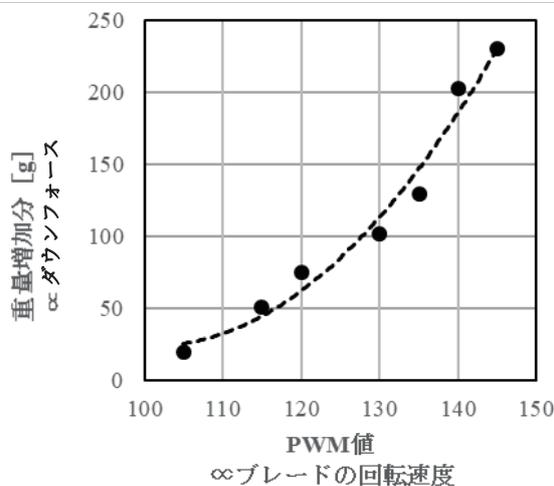


図7 ダウンフォースの速度(PWM 値)依存性

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、ドローンが正常に動作していると考えられる。

本試作機での課題は、部品配置、すなわち、ドローン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、3台目の試作機までの基板では、仕様を満たす高速走行の実現が困難と判断した。

これまでの課題に対応した4台目の試作機(大会出場機体)で、表1の仕様、すなわち、平均速度1.6m/sec、スタート/ゴール間の自律動作、スタート/ゴールのマーカを検知、3周連続の高速走行、を達成した。また、今年度から搭載したドローン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。

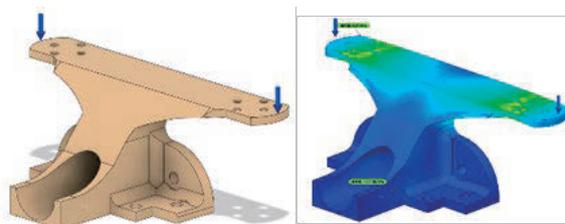
## 4 大会結果

これまでの技術的課題を考察、評価して、製作した2機体で大会に出場した。各機体の走行タイムと順位は、D版が11.964秒の6位、S版が11.372秒の5位であった。当初の仕様(表1)は達成した。但し、直近の上位グループ(3,4位)との差が2秒、その更に上のグループ(1,2位)との差が5秒であること<sup>(6)(7)</sup>から、今後の主要な課題、方針となる。

## V 新規機体(5台目の試作機)の製作

### 1 改善案の検討

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>(8)</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 モーターマウント(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、我々が製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、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。

## 2 機体の開発

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、これまで1枚で構成されていた機体の基板からセンサ部分(前方、左右)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個毎にドローン制御用ドライバ(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(以後、4in1-ESC)への変更を検討した。理由は、ESCの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。

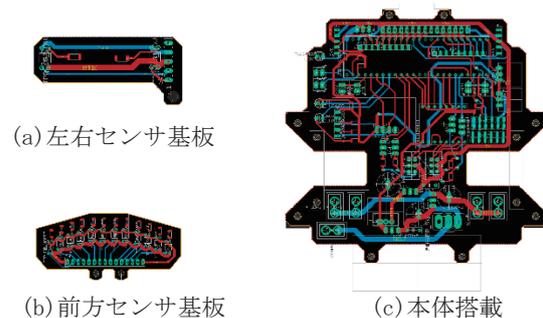
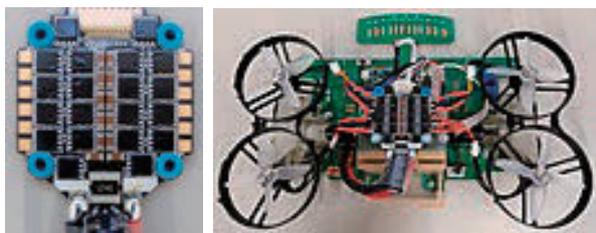


図9 分離基板

4in1-ESCとしてBLHeli社製 60A\_32-DS1200<sup>®</sup>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。

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

図10にESCと機体をそれぞれ示す。



(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

### 3 評価（大会コースでの走行タイム）

表2に、大会後に新規に制作した2機体（表中の軽量化機体と分離機体）と大会に出場した機体（表中の大会機体）のタイムと重量を示す。軽量化機体と分離機体はドローンの数が異なる。

表2 制作した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

### 4 考察

表2の結果から、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、今回制作した基板より、基板の更なる小型（軽量）化は困難である。更なる軽量化には基板に搭載される部品、特に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。

## VI おわりに

大会用のライトレーサを2機体製作し、大会に出場、従来までの結果を改善できた。更に、この大会結果を上回る機体を製作した。最後に、今後制作するライトレーサの設計及び製作指針を示す。

- ① Arduino系マイコン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

担当した学生は、以下の電子情報に関する技術等を習得できた。

- ① プログラミング
- ② 制御の実装化（方式：デジタルPID制御）
- ③ 電子回路の設計、製作（種類：電池及び電源回路、モータドライバ、マイコン）

さらに、製作に必要なマネジメントスキルも体得できた。これには、関係者との技術的な議論や報告、工数管理が含まれる。

### 【参考文献】

- (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, 閲覧日 2021-02-17, <https://ntf.or.jp/oldindex.html>.
- (3) PJRC, Teensy3.6, 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/g112626/>.
- (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) 公益財団法人 ニューテクノロジー振興財団, 第41回全日本マイクロマウス大会 エントリーリスト, 閲覧日2024-03-18, [https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2020/MM20\\_20\\_Robots/index.html](https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2020/MM20_20_Robots/index.html).
- (7) 公益財団法人 ニューテクノロジー振興財団, 第41回全日本マイクロマウス大会 エントリーリスト（動画）, 閲覧日2024-11-25, <https://youtu.be/TySJu-15VTA>.
- (8) 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.