

令和5年度 特別生徒研究助成報告書

## ライントレースロボットの開発

長野県駒ヶ根工業高等学校

機械科 安藤 幹人

## 1. はじめに

私は、駒ヶ根工業高校(以下本校)ロボット研究製作部マイコンカーラリー班において、令和3年度よりマイコンカーの製作に取り組んできた。マイコンカーとはマイコンを搭載したライトレーサーの一種で、コース上の白、灰色の線を読み取り走行する自立型ロボットのことである。

マイコンカーによる大会として「ジャパンマイコンカーラリー」がある。全国工業高等学校校長協会が主催しており、今年度で29回目の開催となった。本校では平成18年度からこの大会に参加しており、平成20年度からは地区大会である北信越大会を勝ち抜き全国大会への出場を続け、優勝や上位入賞を果たしてきた。平成24年度には、全国大会挑戦5年目にしてついに全国優勝を達成することができ、その翌年も2年連続しての優勝を達成した。平成26年は3連覇を逃したもののその翌年に再び優勝を達成した。私が入部した令和3年は、北信越大会は無事開催され全国大会出場権を得ることができたが、新型コロナウイルスの感染再拡大によって、全国大会前日に中止になってしまった。翌年の令和4年は北信越大会予選敗退に終わった。その悔しさをばねに挑んだ今年度の全国大会では予選1位通過、決勝トーナメントの決勝戦で敗れ準優勝という結果で大会を終えた。

以下の報告では、今年度行ってきた主要な研究、および3年間の活動を通して私が感じてきたこと、学んだことについて記す。

## 2. 研究動機・目的

今年度のジャパンマイコンカーラリー全国大会で優勝することを目標に、より速く安定した走りをするマシンにする方法を考え、研究を行った。

## 3. 研究内容

### ① 車体設計・加工

従来はAutodesk社のAutoCADで設計を行い、originalmind社のVcarveProというCAMソフトを使用して加工データの作成を行ってきたが、より高度な車体設計と加工をするためにAutodesk社のFusionという3DCADソフトを使用した。

#### I. 研究概要

私のマシンの長所は、車体の剛性が高いため4輪が安定してコースに接地し続け、特にカーブの切り返し(図1)の多いコースやスネーク(図2)などのコーナリングがスムーズになる。短所は、車体重量が重すぎるこ

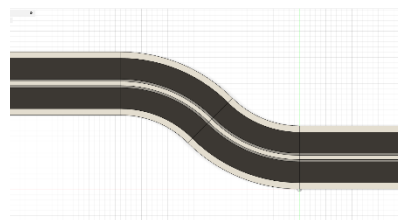


図1 カーブの切り返し

とによる加速・減速性能の低さであると考えた。また、よりコーナリング速度を上げるためには重心を下げ、車体がロールするのを防ぐ必要があると考えた。

それらを踏まえて、Fusion の構造解析などの機能を使用して、従来の剛性を保ちつつ、軽量化と低重心化を実現したマシンを設計した。

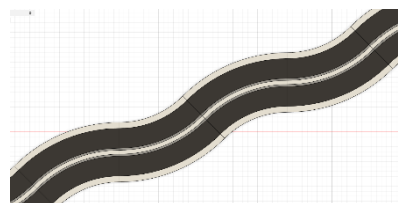


図2 スネーク

## II. 研究内容

従来使用していたマシン(図 3,4)を 3DCAD 上で描き、シミュレーションで車体をねじった際にどの部分に力が集中するのかを調べた。その結果から強度が必要な部分は強化し、足りている箇所を削ることで剛性を下げないように軽量化した。また従来のギアボックスは、アルミ角パイプから削りだして製作していたが、3D プリンターでの製作に変更したことで、必要な強度と剛性を確保しながら従来のものよりも軽量化することができた。

車体の重心を下げるには、重い部品を低い位置につける必要がある。しかし、マイコンカーのコースには 10 度以下の坂の区間があるため、コースと車体が干渉しないように設計する必要がある。そこで限界まで重心を下げるために 3次元加工が必要だと考えた。2次元加工では板状のものしか加工できないが 3次元加工をすることで曲がった部品も作れるようになるため坂ぎりぎりまでシャーシを下げることができ、重心を大幅に下げることが成功した。

構造解析を使用したこと、部品の一部を 3D プリンターで製作したこと、後述するタイヤの小径化を行ったことなど様々な軽量化を行った結果、剛性を下げずに車体を約 100 g 軽くさせることに成功した。また 3次元加工ができたおかげで、マシンの重心位置を従来よりも約 3 mm 低くすることができた。

従来の車体は部品数が多く、組み立てや解体に時間がかかるが、新しい車体はパーツ数が少ないため問題が発生した場合も素早く対処できるようになった。また、軽量化にもつながっている。(図 5,6)

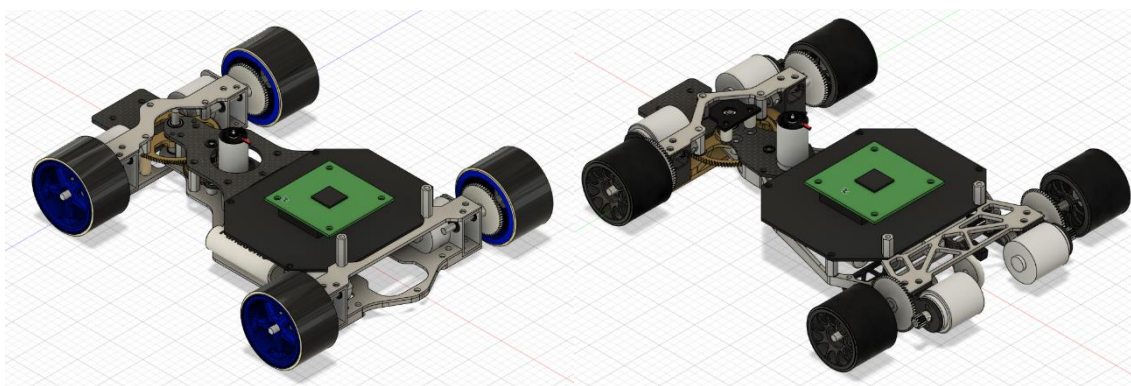


図3 従来マシン (等角図)

図5 新しいマシン (等角図)

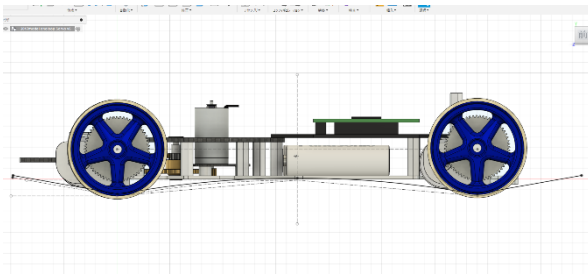


図4 従来のマシン（側面図）

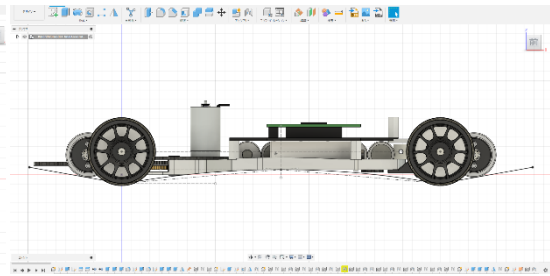


図6 新しいマシン（側面図）

## ② タイヤ径・ギア比の変更

### I. 研究概要

従来のマシンはトルクが過剰であり、スタート時にタイヤが空転してその分ロスが発生していることが分かった。また、令和4年度に開催された全国大会に出場していた多くの選手が、タイヤ径40mm以下のものを使用していた。そこで、ギア比の見直しとタイヤの小径化も行った。

### II. 研究内容

タイヤの小径化のメリットは、ホイールそのものの軽量化ができること、車高を下げ低重心化ができること、接地面積が減ることによる加減速性能の向上だと考えた。

現在のギア比である1:7.5のまま、タイヤ径を46mmから38mmまで小径化(図7)したところ、モーター1回転あたりの進む距離が約19mmから約16mmまで短くなる。これは加速性能(トルク)が向上することを意味しており、これでは本来の目的とは相反するものになってしまう。そこで、タイヤ径は38mmのまま、ギア比を1:5に小さくし、モーター1回転あたりの進む距離を24mmまで長くすることにした。

タイヤ径の変更に合わせて、ホイールの形状の見直しも行った。従来のホイールは、インナー側を手で潰すと簡単に变形してしまっていた。マシンは低重心化のためシャーシをぎりぎりまで下げているため、タイヤが变形してしまうとコースと接触する恐れがあった。インナー側を厚くするだけでも改善したが、タイヤ径を小さくしたにも関わらず今までのものよりも重くなってしまった。そこで、円筒の両端を縮



図7 新しいホイール

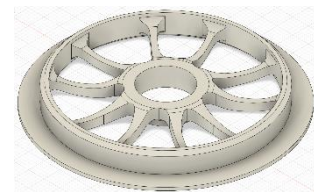


図8 インナーキャップ

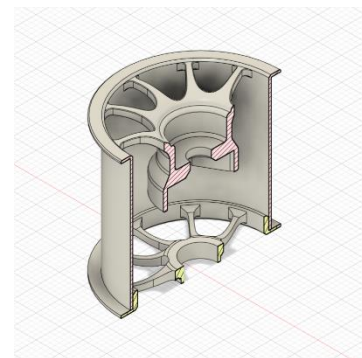


図9 新しいホイール（断面図）

めることで剛性を高められないかと考え、インナーキャップを製作し装着させた。その結果、剛性が格段に強化された。

実際に走行させてみた結果、トルクが低下したことにより停止状態から最高速度に達するまでの時間は長くなったが、カーブ・クランク・レーンチェンジを抜けた後の中低速から最高速度に達するまでの時間は短くなった。また、大幅なタイムアップもできた。マイコンカーは、スタートしてから完走するかコースアウトするまで、停止することなく走り続ける。この改造を通して、停止状態からの加速性能よりも、中低速からの加速性能を重視したほうが全体的にタイムアップをできることが分かった。

この改造を行ったことにより、従来のマシンよりもトルクを抑えつつ、軽量化によって加減速性能が向上し、低重心化とホイールの高剛性化によって安定した走行をできるようになった。

### ③ ブレーキの最適化

#### I. 研究概要

走行中クランクやレーンチェンジに進入するときは、適切なスピードになるまで強めのブレーキをかける必要がある。加減速性能が向上した新しいマシンで今まで通りのブレーキ制御を行うと、走行が不安定になることが多かった。そこで、安定したブレーキ制御ができるように改善を行った。また、タイムロスが減らすためなるべくブレーキをかけずに減速ができるよう、ブレーキの強度の最適化を行った。

#### II. 研究内容

今までのブレーキ制御は設定した速度よりも下回ったときはモーターを100%で正転させ、上回ったときはモーターを-100%で逆転させて制御していた。加減速性能が向上した新しいマシンでこの制御を行うと、急激な加速と急激な減速を繰り返して、各セクションの走行に悪影響を及ぼしていた。そこで、ブレーキの強度をエンコーダの値（マシンのスピード）を参照しながら決めることにした。

例えばクランクを走行するとき、私のマシンは3.4m/sまで減速することができれば、スムーズに通過することができる。今までのブレーキはこの速度になるまで-100%でモーターを逆転させていたが、4.0m/s以下まで減速したら-70%、3.8m/s以下は-50%、3.6m/s以下は-30%、と徐々にブレーキの強度を落とすようにした。また、設定スピードを下回った場合、正転100%ではなく50%~80%に抑えた。これをレーンチェンジの進入、坂道の走行にも取り入れた。その結果、急激な加減速がなくなり、各セクションの走行が安定した。さらに、走行が安定したことによって、進入スピードを上げることが

でき、タイムアップにもつながった。

#### ④ 坂の頂上から下り坂への走行

##### I. 研究概要

坂道の走行で、マシンの先端についているライン検出センサが浮いてしまったり (図 10)、前輪後輪どちらも浮いてしまう (図 11) ことで、蛇行してコースアウトしたりすることがあった。パート練習を続けた結果、頂上から飛び出すときのマシンの姿勢が乱れていたため、改善を行った。



図 10 下り坂進入時

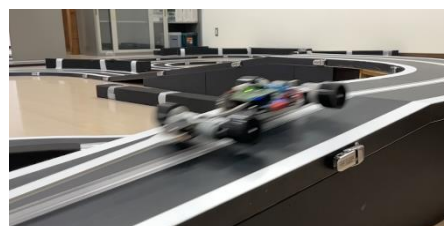


図 11 下り坂進入後

##### II. 研究内容

パート練習の動画と走行データから、坂の頂上から飛び出すときの速度が速すぎるのが原因であった。速度上限を下げれば解決するが、速度が速くても通過できることがあり、その時の区間タイムで比較すると 0.5 秒前後のタイムロスができてしまった。そこで、頂上から飛び出すときのモーターのパワーバランスを見直すことで、姿勢を改善しようと試みた。

まず、前輪だけが浮いているときに、後輪にブレーキをかけることで、飛び出した時のマシンの滞空時間を短くできないかと考え、同様にコース検出センサが浮いているときは、前輪にブレーキをかけるようにした。実際に走行させた結果、最低限の減速で安定して通過できるようになった。また、ライン検出センサの反応がすべて途切れたら下り坂と判断させることで、余裕をもって減速を行えるようになり、坂の頂上の速度上限をさらに上げることができた。

#### ⑤ カーブの走行

##### I. 研究概要

私のマシンは、カーブの走行でアンダーステアが起きてしまうことが多かった。カーブ進入ブレーキを強くすることで大体は解決したが、しっかり減速できていたのにアンダーステアになることもあった。今回マシンの駆動系を大きく改造したので、これを機にカーブの走行を 1 から見直すことにした。

##### II. 研究内容

アンダーステアとは、一定のハンドル角で旋回しているときに速度の上昇とともにクルマの向きが外側に膨らんでいく現象である (図 12)。アンダース



テアが発生している間はハンドルを切っても曲がらなくなるため、前輪がグリップを取り戻すまでは速度を落とす必要がある。今までは速度を落とすことだけを考えていたので、カーブの進入速度に関係なくフルブレーキをかけていた。そのため、減速しすぎてしまいハンドルを切り始める前に設定した速度を下回ってしまい再加速していた。加減速性能が向上した今のマシンではこの現象がより顕著になっていた。これがしっかり減速できていたのにアンダーステアになる原因だった。

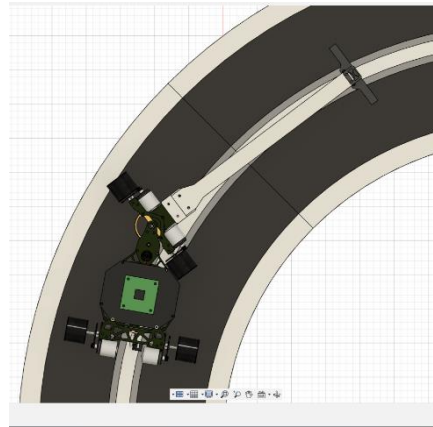


図12 アンダーステア

そこで、定常円旋回に焦点をあてて研究を行った。定常円旋回とは、一定の大きさの円の上を常に一定の速度と一定の切れ角で旋回することをいう。前輪・後輪のバランスをとることにより、自転運動・公転運動のつり合いがとれるようになるため、アンダーステア等による失速がない理想的な走りができると考えた。特にアンダーステアが出やすい R450 のカーブで、定常円旋回ができているときの速度とハンドルの切れ角を走行データから読み取った結果、私のマシンは秒速 3.7m/s、切れ角約 24° であれば R450 のカーブを定常円旋回で曲がるということが分かった。目安となる速度の数値を知ることができ、無駄なブレーキをなくすことができた。しかし、全国大会で戦うにはまだまだ力不足で、タイムアップのためにはブレーキを極力使わず、アンダーステアも発生させない走行が必要であると感じた。

ブレーキを極力使わない走りを実現するため、大きく分けて 3 つの走行方法を考えた。

- A) ブレーキ走行
- B) 姿勢づくりの走行
- C) 通常走行

A の「ブレーキ走行」は、タイヤがまだ直線上を走っているときに、逆転ブレーキをかける走行方法である。C の「通常走行」は、定常円旋回ができる速度と切れ角で走行していることを示す。今までは A の走行で減速をした後すぐに C の走行に移っていたため、十分に速度が落ちていなかったり、ハンドルが切れていない状態で加速していたのが不安定な走行につながっていたと考えた。そこで、新たに B の「姿勢づくりの走行」を追加した。この走行ではヨーモーメントに注目した。ヨーモーメントとは、自動車を上方向から見た時に、その中心を軸として回転させる力のことである。この力を適切に与えること

で、より早く定常円旋回ができる姿勢が作れると考えた。

マイコンカーはマシン先端のライン検出センサで常にセンターラインを追従しているため、マシンが外側に膨らむほどハンドルの切れ角が大きくなる。よって、カーブ走行中に切れ角が大きくなるとアンダーステアが起きていると判断することができる。またアンダーステアは、マシンが左または右に曲がろうとする力よりも、前に進もうとする力の方が強くなるために、前輪タイヤのグリップ限界により横滑りが起こり発生する。前輪タイヤは、ステアリング制御の恩恵もあり、ヨーモーメントを与えられていたが、後輪にはうまく与えられていなかった。そのため、切れ角が大きくなりやすい状態にアンダーステアが起きやすい姿勢を作り出してしまっていた。「姿勢づくりの走行」では、後輪のカーブ外側のモーターを 100% で正転させ内側のモーターを止める (0%) ことで、後輪にヨーモーメントを与えハンドルの切れ角の増加を防ぐことができなかつたかと考えた。前輪はステアリング制御への影響を防ぐため、カーブ外側のモーターだけ 50% 程度で正転させている。

走行させた結果、後輪はしっかり前輪の軌道を追従するようになり、多少速度が速い状態で進入してもアンダーステアが生じにくくなった。さらに、逆転ブレーキも加速もしない惰性の走行をさせることで、よりスムーズな姿勢づくりができていると感じた。また、惰性の走行だけでも十分減速できていて、カーブ進入時に逆転ブレーキをかける頻度が減り、カーブ走行中のブレーキには逆転ブレーキを使う必要がなくなった。

カーブの走行の見直しを通して、平均秒速 4.1m/s から 4.4m/s まであげることができた。令和 5 年の夏に飯田 OIDE 長姫高等学校で開催された競技会では、過去に全国大会 2 連勝を果たした学校のマシンに並ぶタイムを残すことができた。R450 のカーブを切れ角は 24°、速度は想定を上回る秒速 3.9m/s を出すことができおり、期待以上の走りができていた。見直しの成果を実感することができた。

#### 4. 考察・まとめ

全国大会優勝を私個人の目標として掲げ、今年は去年の課題であった完走率の向上とさらなるタイムアップを目指してきた。車体の大きな改造や新しい車体に合わせたプログラムの調整など 1 年で成し遂げるにはかなり苦しいこともあったが、先輩方や先生方の助言をいただいて調整を続けて、全国大会の決勝戦で戦えるマシンに仕上げることができた。車体構造の刷新にともなって、車体重量やバランスの変更、ホイール径と材質の変更、駆動ギアのギア比の変更、ギアボックスの材質変更など走りに大きくかわる部分を 1 度に置き換えた。自分で評価してから取り入れたわけではなく、いろいろな方



の知恵を借りて、それらをすべてこの1台に詰め込んだ。そんな事情もあり、設計の時から難航していて製作に入ってから毎日トラブル続きだったが、先輩方や先生方に助言をいただきながら調整を進めてきた。昨年予選敗退した北信越大会では、最後は格上の相手だったが、相手がコースアウトしたため3位という結果で全国大会出場権を得ることができた。全国大会では、練習通りの順調な走りができ、私自身も冷静に大会に臨めた。スピードを徐々に上げていって、予選は1位で通過することができた。決勝1回戦目、コース清掃が行われていなかったらしくコースアウトしてしまったが、相手も同様にコースアウトしたため、予選結果により2回戦へ進むことができた。コースアウトの衝撃が原因でその後の走りに影響がないかかなり焦ったが、何事もなかったかのように予選通りの走り続けて決勝戦まで勝ち上がることができた。相手は北信越大会で優勝した選手だった。結果は0.21秒差で敗北し準優勝という結果に終わった。北信越大会で0.7秒近く差があった相手にコース難易度が上がった状態で0.2秒差まで詰められたこと、マシンの不調によるコースアウトは1回もなかったのも、昨年の課題を克服し、タイムアップも達成することができた。

#### 大会結果

ROBOCON in 信州 (県大会)	決勝戦 1 回戦敗退
ジャパンマイコンカーラリー2024 北信越大会	3 位
ジャパンマイコンカーラリー2024 全国大会	
個人戦	準優勝
団体戦 (北信越地区代表として参加)	優勝

## 5. 活動を通して

私は、昨年は出場したすべての大会で、立て続くマシントラブルにより完走率0%という悲惨な結果を残しました。ロボコン in 信州では決勝戦では完走すらできなかったにもかかわらず、予選結果より準優勝という結果を残し、放送の方に「完走しないと意味ないですからね (笑)」と鼻で笑われ悔しく恥ずかしい思いをしました。その次の北信越大会では、同じところで同じようなコースアウトを試走・予選2回ずつ繰り返し大会を終えました。今年は絶対にこんな結果で終わりたくない、先輩方が積み上げてきたものを崩したくないという気持ちで全国大会優勝を目標に活動を行ってきました。マイコンカーの製作を通して、様々な分野の技術や知識を身につけることができたこと、なにより自分自身が成長することができたと感じています。

今年の北信越大会・全国大会はどちらも長野県松本市キッセイ文化ホールで開催され、日頃からお世話になっている先生方や後輩、そして助言をいただいた先輩方に運営していただきました。また、多くの方に励ましていただきました。本当は優勝で恩返しした

かったのですが、最後の最後で敗れて準優勝という結果に終わりました。しかし、最後まで練習通りの走りで完走しきれたことがとても嬉しいし、今までめげずに調整をしてきた甲斐があったと感じています。この大会で結果を残せたのは、顧問の先生や先輩方、家族、部員の仲間など多くの方に支えていただいたおかげです。関わっていただいた方々への感謝の気持ちを忘れずに、この活動で得たものを今後の人生でも生かしていきたいと思います。



## 6. 参考文献

アンダーステア・オーバーステア：

[https://t-reiz.com/blog/20220916-](https://t-reiz.com/blog/20220916-2573/#:~:text=%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%80%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A2%E3%81%A8%E3%81%AF%E3%80%81%E4%B8%80%E5%AE%9A%E3%81%AE,%E4%BD%BF%E3%82%8F%E3%82%8C%E3%82%8B%E3%81%93%E3%81%A8%E3%82%82%E3%81%82%E3%82%8A%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82)

[2573/#:~:text=%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%80%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A2%E3%81%A8%E3%81%AF%E3%80%81%E4%B8%80%E5%AE%9A%E3%81%AE,%E4%BD%BF%E3%82%8F%E3%82%8C%E3%82%8B%E3%81%93%E3%81%A8%E3%82%82%E3%81%82%E3%82%8A%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82](https://t-reiz.com/blog/20220916-2573/#:~:text=%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%80%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A2%E3%81%A8%E3%81%AF%E3%80%81%E4%B8%80%E5%AE%9A%E3%81%AE,%E4%BD%BF%E3%82%8F%E3%82%8C%E3%82%8B%E3%81%93%E3%81%A8%E3%82%82%E3%81%82%E3%82%8A%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82)

定常円旋回：

<https://www.goo-net.com/knowledge/11739/>

[https://www.hai-sya.com/column/steady\\_circular\\_turning\\_univ005.html](https://www.hai-sya.com/column/steady_circular_turning_univ005.html)