

4 輪独立駆動型鉄道車両制御のための小型実験機の開発

Development of Four-Wheeled Scaled-down Railway Vehicle with Independently-Driven Wheels

○白寄陽明*, 熊谷正朗**

Haruaki Shirayori*, Masaaki Kumagai**

*東北学院大学大学院 工学研究科, **東北学院大学

* Graduate School of Tohoku Gakuin University, ** Tohoku Gakuin University

キーワード : 鉄道車両 (Railway vehicle), 独立駆動車輪 (Independently-driven wheels), 縮尺模型実験 (Scaled model experiment), 車輪制御 (Wheel control), 5 インチゲージ (5-inch gauge railway)

連絡先 : 〒 984-0075 仙台市若林区清水小路 3-1 東北学院大学 工学部 機械知能工学科
熊谷正朗 022-354-8716 E-mail: kumagai@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

本研究は 4 輪独立駆動型の鉄道動力車の制御の検討を目的とした研究である。

現存する鉄道車両の大半では、対となる左右の車輪は軸によって結合された一体の剛体 (輪軸) であり、その二つの車輪の角速度は等しい。それゆえ、基本的に直進性が強く、カーブにおいては車輪とレールの接する面 (踏面) の勾配角度によって、輪軸の左右移動に応じてレールと接する半径が変わることで両車輪の接線速度が変化することを利用する。このことは対応できる曲率が小さい (曲率半径が大きい) ことを意味し、それを越えるとフランジで脱線を抑制しつつ滑りが発生することになる。これに対して、たとえば対向 2 輪型のロボットでは積極的に左右の角速度を変化させることで、カーブを描いて走行する。

従来の車両は、鉄道も、道路を走る車両も走行駆動用の主たる動力の数は 1 または少数で、そ

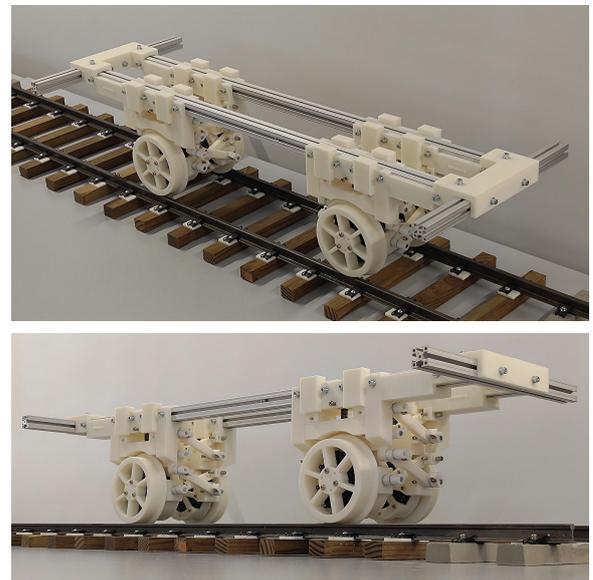


Fig. 1 試作した鉄道車両の小型実験機の外観.
Developed small-scale railway vehicle.

れを車輪に伝えることで走行する構造であった。それゆえ、道路車両はエンジン等からの動力をディファレンシャルギアで分配して走行する機

構と、ハンドル操作を伝えるステアリング機能が分離している合理性があり、それにとまなう旋回半径の制限があった。もともと、大きな旋回曲率にはしない鉄道では、上記の踏面勾配により、その輪軸を回転させれば十分である。これに対して、動力の電動化と制御手法の高度化に伴い、車輪の独立駆動が現実的となった。すなわち、4輪の車両である場合に、モータを4個搭載して、それぞれが駆動力、速度を独立して発生させる。車輪移動ロボット分野では従来から一般的な手法であり、道路用の車両では一部にインホイールモータなどの採用とともに、利用される場合がある。

一方、鉄道車両においてはまだこの手法の採用は限定的であるが、低床を目的とした路面電車、ライトレールなどで採用されている。一般的な鉄道はレールに対して高いホームの床面と車内の床面を合わせるのみでよいが、路面電車での低床を実現するには、輪軸の高さがその制約となる。車輪については、低床バスなどと同様にその部分を車内の座席下などに飛び出させればよいが、両輪を繋ぐ車軸が車内に邪魔となる。それゆえ、その解消には両輪を繋ぐ車軸を廃し、結果的に左右独立駆動が必然となる。鉄道の走行安定性は左右が結合された剛体輪軸で長年にわたって研究、保証されてきたものであるためか、積極的な左右独立駆動に関する事例は多くは見られず、上記ライトレールなどに關するもので制御ブロック図などが一部紹介されているに止まる。しかし、下記のように独立駆動型にはいくつか利点が見られるため、手法として研究する意義がある。

鉄道車両の駆動を左右独立とすることには、利点と欠点がある。利点としては

- 1) 左右の速度差を得やすく、より曲率の大きな線路に対応できる。
- 2) 左右の車輪を結合する軸が不要となり、空間的な設計の自由度があがる。

- 3) 踏面勾配による受動的な走行位置の調整に対して、能動的な制御を適用する可能性が生まれる。
- 4) 動力の冗長性が得られ、ユニットの電氣的故障時に緊急的なデグレード動作ができる可能性がある。
- 5) 電動機に要求される動力が分散するので、(1/2)～数分の1ではあるが、電動機の出力上限が緩和される。

上記(1)(2)がライトレールで活用されている特性であるが、左右を結合しないため、レール間隔を可変とするフリーゲージ化も可能となる。運用時の可変としなくとも、駆動系をモジュール化しておけば、ゲージの異なる車両を製造しやすい。(4)については、当初から分散動力となっている電車ではメリットは少ないが、保線の工事車両などで現在動力が1個のみの形式に対しては効果が期待できる。

欠点としては

- 1) 従来の鉄道車両の走行時の安定性が左右の車輪を結合した輪軸、それを2軸乗せた台車に対して行われてきたことに対して、その特性が未知であること。
- 2) 先行事例が少なく、実機を作ろうとした場合の知見が不足すること。

がある。直感的には、車輪を従来と同じ形状として、かつ、原則として左右の車輪は同角速度で精密に同期回転すれば従来と互換性のある状態となるので、それに能動的な制御として若干のオフセットを与えるという方策が考えられる。この方針では、非常時には臨時に左右の車輪を剛体結合できるような軸部品を用意しておけば、よりフォールトトレラントになる(たとえば故障時に別車両で牽引する受動走行の場合など)。

ここで本研究に関連する先行事例について述べる。そもそも実例が少ないことに加え、実機による実験が本格的な車両メーカ、鉄道会社な

どでなければ難しいこともあって、あるいは小型の鉄道は主にホビーとして製作されているため、技報による概略の説明はあっても学術的な文献は見つげがたい。

上述の通り、左右の車輪を独立回転させる鉄道車両は、一般的な車軸で結合された左右輪を持つ鉄道車両とは大きく異なる特性を持つ。中でも車体を低床化して乗り入れスペースを増やしたり、低重心化することで急カーブを通過しやすいメリットなどから、軌道上で運用される路面電車やライトレール車両への利用が盛んである^{1, 2)}。同様に、高速走行の安定化の制御の可能性があるほか、動力部を分散でき、故障耐性を高められる点から、線路上を走行する動力車両にも有用であると見込まれるが、線路上を走行する鉄道車両に独立車輪を適用する例は少ない。代表的なものに、スペインの鉄道車両 Talgo³⁾があるが、これは軌間可変の実現およびライトレール車両と同様の曲線通過性能の向上を目的としており、独立車輪が採用されているのは従動の客車のみである⁴⁾ ため(機関車は通常型)、上記のメリットを活かしているとはいいがたい。

一般的な鉄道車両においては、レールとの接触面に勾配を持つ左右の車輪が一つの車軸によって結合されており、この構造の機械的な動作性質により、レールに対して車輪の位置が安定するような自己操舵性を得ているが、ある程度以上の高速域での運転などによりこれが過剰になると蛇行動を引き起こし、レールと車輪に与える横圧や摩耗の増加が発生する。また、自己操舵性を大きくするほどに、この問題は発生しやすくなる。これに対し、この問題点が発生しない左右独立車輪に、固定輪軸の自己操舵性に代わる操舵機能を付加したものを利用することで、前述の問題点を解消しつつ輪軸と同様の働きを得ようとする試みがある⁵⁾ が、操舵機能を付加する仕組みは機械的なものが主であり、故障耐性は明らかに悪化が見込まれるものが多い。前述した Talgo に採用されている手法も機械的

に操舵機能を付加したものである。電子制御によって操舵機能を付加する試みとしては、逆踏面勾配を有する車輪を装備した鉄道車両を電子制御する研究が存在する⁶⁾ が、ライトレール車両向けに低速で走行する際の曲線通過性能を逆踏面勾配を持つ車輪によって達成し、電子制御によってそれを補助するというものであり、高速走行する車両に対し電子制御を主として制御するものとは方向性が異なるほか、逆踏面勾配であることから電子制御に障害があると、牽引等の走行の可能性に疑問が生じる。また、これら先行する制御事例においては、車輪の速度ではなく、主に車輪のトルクに着目している。

以上のような背景から、今後、このような車両を構想、制御するために、予備的な研究を進めておく必要性が考えられた。ある程度はモデル化されてはいるが、滑りを伴う転がりシミュレーションと実機挙動の一致が難しいことから、実機による検証が適すと言え、本研究では Fig. 1 に示す実験用の小型機の開発から始めることとした。

2. 実験機の仕様の検討

2.1 スケールモデルの縮尺の選択

鉄道において実寸での実験設備の準備は特に長さの点で困難がある。一般的な車輪移動ロボットと異なり、そもそも走行実験をするにはレールが必要であること、および、ある程度の連続した車輪の回転による挙動を見るためには、車輪の径に比してその長さが必要である。そこで、スケールモデルでの実験を前提とした。そのうえで、どの要素がどう影響するかは未知であるため、幾何学的な形状の特徴をまずは優先することとした。また、資材の調達性から、既存の鉄道模型用部品を使用することとした。車両を走らせるだけであれば、HO ゲージ(レール間隔=軌間=ゲージ 16.5 [mm]) は車両内に小型の制御回路を搭載する余地もあって手頃であるが、

本研究は走行駆動系に関する物で、かつ左右独立駆動であるため、ある程度の大きさが必要である。

これより大きなサイズで主流なものに5インチゲージ(127[mm])がある。これは、イベント会場などで人を乗せて走る鉄道模型などで見られる、人が車体にまたがって乗るタイプの鉄道である。この上には7.5、10インチなどもある。一方、スケールモデルとの境界にある小型鉄道に目を向けると、後述のレールの選定とも関係するが、JIS規格の軽レール(JIS E1103)にはもっとも小型の物で“6kgレール”が定義されている。ただし、小型と言っても、レール頭の幅で25.4[mm]、高さ50.8[mm]と大きく、かつ長さ1[m]あたりで6[kg]であって、実験用のものとしては大きくなりすぎる。

以上のことから判断し、5インチゲージでの開発とすることにした。鉄道模型における縮尺にはある程度幅があるが、日本の主流の狭軌(1067[mm])を基準とすると、1/8.4となる(標準軌では1/11.3)。

2.2 レールと車輪のモデル

上述の通り、本実験機の目的が実機による研究であるため、挙動が実車に近いことが要請される。線路上の走行の特性には、レールの頭部の形状と車輪の断面形状が関係することから、その形状を実車に近い物とすることが重要と考えられた。

実際の鉄道レールはJISに規定があり、主に1[m]あたりの質量を代表値として、 n kgレールとされている。最小でも6kgレールであって、これは採用するにはまだ大き過ぎたため、5インチゲージ用のレールを用いることとした。より小型の普及している鉄道模型と異なり、取り扱いが限定的であるなかで、(有)ヤマダ金属商会⁷⁾で取り扱いのレールおよび関連部材を選定した。同レールは頭部幅8[mm]、高さ18[mm]であり、同社案内によるとJIS 50kgレールを

1/8.4に縮小したものである。また、レールを線路(軌きょう)とするには、枕木が必要であるが、これも同社製とした。

車輪については、道楽ぼーず⁸⁾ 取り扱いのφ102車輪をベースとし、後述のように同形状の車輪を駆動系に合わせて製作した。車輪径はフランジ近傍で101[mm]、踏面の傾斜は1/20(2.9[deg])であり、走行時は100[mm]程度の径となる。

2.3 駆動系と制御系

車輪の駆動は、インテリジェントアクチュエータを用いたインホイール型形状とした。後述のように、アクチュエータの出力面に車輪を直接固定し、かつ、アクチュエータごと簡易サスペンション構造の下に配置した。これにより、駆動系のシンプルなユニット化をした。

アクチュエータにはXiaomi社製CyberGearを採用した。同アクチュエータは、インテリジェントアクチュエータで、モータ、遊星減速機、制御系を内蔵しており、24[V]DCの電源と、CANによる通信の接続のみで、角度・速度・トルクの各制御モードでの動作ができる。トルクは最大で12[Nm]、速度は約300[rpm]であり、直径100[mm]の車輪換算で推力が約240[N]で十分に大きく、速度は約1.6[m/s]でスケール換算しても約50[km/h]と一般的な電車の走行速度に比べると遅めである。本研究では、屋内に敷設した最大でも9[m]の試験線での走行を予定しており、当初仕様としてはこの速度でよいこととした。寸法はφ80.5[mm]、厚さ36.5[mm]でほぼ車輪内に収まる小型さも選定理由のひとつである。

制御系は基本的には小型のマイコンによる制御系を車載することを念頭に設計している。また、CAN接続であることから、外部のPCにて状態量をモニタ、記録する。

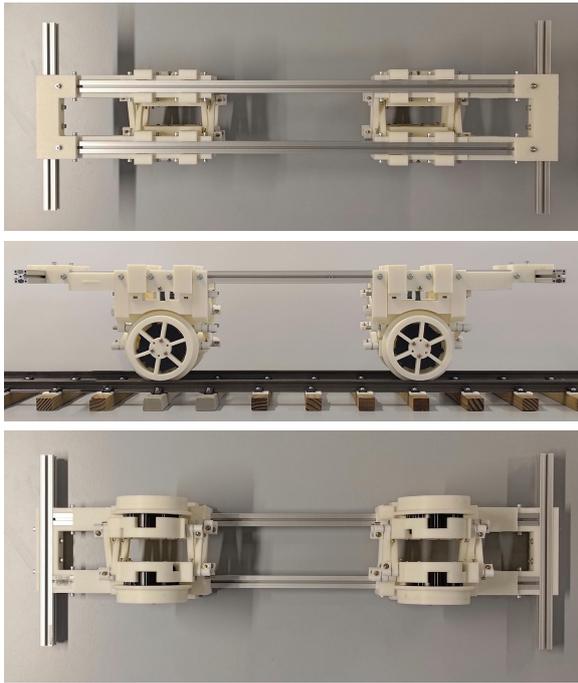


Fig. 2 車両の上面、側面、底面の全体図. Top view, side view, and bottom view of the vehicle.

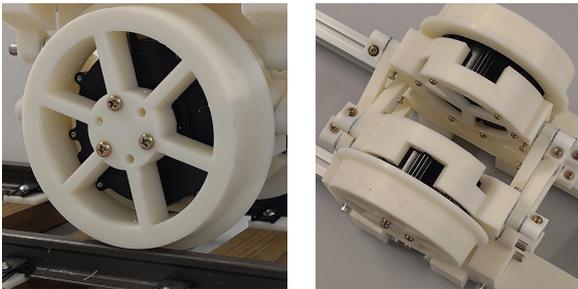


Fig. 3 駆動ユニット. インホイール形式としており、アクチュエータの半分を覆うような車輪と、アクチュエータをサスペンションを介して車体フレームと連結するケーシングからなる. Drive unit. A cup shaped wheel with in-wheel intelligent actuator, supported by suspension unit fixed on the body frame.

3. 実験機の設計と試作

3.1 車体の設計

今後の種々の実験に使えるように、車体はアルミフレーム材で構成し、各要素はモジュール化して搭載することとした。各部の部品はFDM式3DプリンタでABS樹脂で製造しており、現

時点で強度は足りているが、今後必要に応じて金属切削化する。なお、レールとの接触の挙動について、本来の鉄製車輪とABSプリント製車輪について、輪軸型の受動軸受けの車両を先行試作して比較を行ったが、明確な挙動の差は見られなかったため、現状では形状パラメータを変えての実験をしやすいABSプリント製を維持している。

Fig. 2に試作した車両の全体を、およびFig. 3に駆動部分を示す。

まず、車輪は椀状に内側を抜いた形状とし、アクチュエータCyberGearの出力軸端に直接固定した。カタログ等にはベアリング等の機械的特性の詳細な情報は無いが、もともと脚ロボットの関節に直接取り付けることなどを想定したアクチュエータであり、相応の強さがあることが期待される。なおかつ、車輪にかかる重量の荷重がアクチュエータの厚み方向で内側でかかるようにすることで、軸への曲げモーメントの影響を低減する設計とした。

このアクチュエータをガイドピンと面の滑りによる直動機構とコイルスプリングによるサスペンションに取り付けた。Fig. 4にその構造を示す。図は側面および正面の写真であり、荷重無負荷と、5 [kg]の錘で2輪に荷重を荷した場合である。ストロークは3 [mm]であり、線路面にある凹凸に対応できる。また機械的なりミッタで可動範囲を制約してあり、2.25 [N/mm]のバネを与圧して使用している。常にバネ支持をした動的特性を意図したものではなく、平常時は車体と接触した状態(車体フレームの剛性がつかわれる)で、浮きそうになると押しつける目的である。

4輪の車両で車輪が各々独立している場合に1輪が浮くと(あるいは駆動力を摩擦力が下回るほどに垂直抗力が低下すると)、すべて速度制御なら影響は限定的であるが、トルク制御をしている場合は車輪のスリップ、急加速につながり、その後に悪影響がある。一般的な輪軸を有

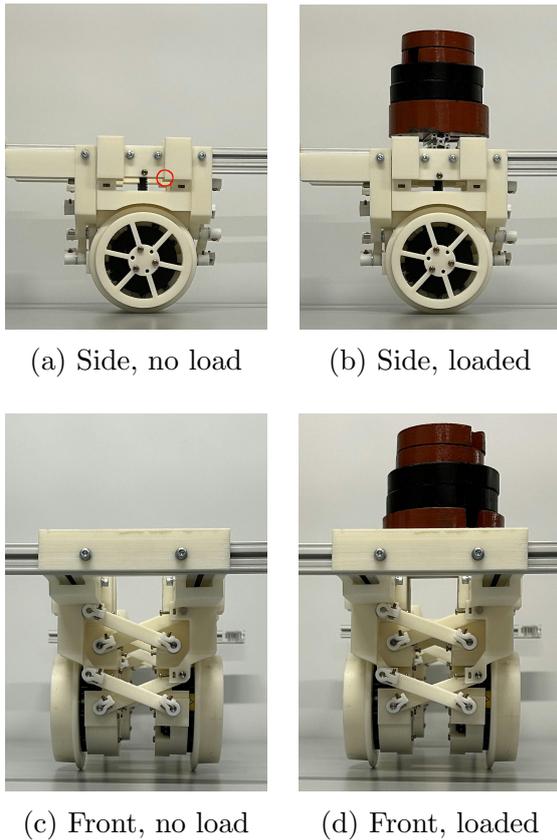


Fig. 4 駆動部のサスペンション構造. 小ストロークで直動するように、変位は機構的リミッタで制約してある. 赤丸部で荷重時の変位が見られる. 正面図左右方向の曲げモーメントに対しての剛性の改善のため、平行リンクを併用した. Design of suspension of drive unit. Wheel unit with actuator slides 3 [mm] within mechanical limiter when loaded (approx. 5 [kg]). Parallel links are employed to improve stiffness along right-left direction.

する車両、台車であれば、その軸の両端をバネで支持する構造であって、かつ軸付近を直接支持できるために問題になりにくい。本構造では Fig. 4(c,d) に示すように、車体フレームに対して車輪が片持ちはりの構造となり、その中間にサスペンションを入れることで、横方向の剛性を確保しにくい。そのため、図に示すように、お互いの基部から平行リンクを取り付けることで、剛性を高めた。厳密にはリンクの傾きによって、横方向にも変位が生じるが、サスペンションの実際のストロークが小さく、目立った横変

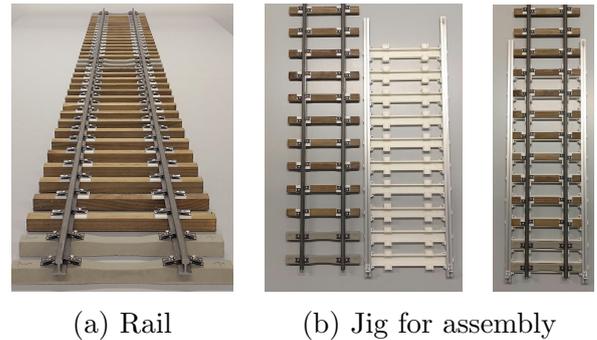


Fig. 5 レール (3 [m]) とレール組立用ジグ. Rail unit (approx. 3 [m]-length) with 38 cross-ties and a jig frame for assembly.

位とはならない。

以上のようにお互いのサスペンションを平行リンクで接続した形になっていることから、左右2機セットの駆動部となっている。この構造では動的には軌間を変更できないが、設計段階ではこのリンク長の修正で軌間の変更はできる。

車体をアルミフレーム材にしてあるため、ユニットのレイアウトに自由度はあるが、現時点の設計では実在の軌道モーターカー*の寸法を参考として、車輪の前後の間隔を 400 [mm] としてある。また、車体中央部には電源用の鉛蓄電池 12 [V] を 2 個搭載する。

3.2 実験用線路

前述の通り、レールは (有) ヤマダ金属商会製の 5 インチ模型用の部材を用いた。組み立てたレールの 1 区間を Fig. 5(a) に示す。枕木には木製枕木 (防腐処理木材) とコンクリート製枕木 (TY-129 型) を併用した。コンクリート製は高コストであるが、寸法精度が良く、これを軌間の基準として約 3000 [mm] のレールの両端と中央に 2 本ずつ計 6 本入れ、その間に木製枕木を 16 本ずつ入れた (合計 38 本)。枕木の間隔は 80 [mm] で、レールの継ぎ目となる両端で若干異なるが、全体的に等間隔である。なお、実際の鉄道レ

*北陸重機工業 (株) 製 標準軌用大型軌道モーターカーの軸間 4500 [mm]⁹⁾ を標準軌から 5 インチへの尺度 1/11.3 で縮小。

ルは1本25[m]であり、この3[m]というレール長は約1/8.4の縮尺にあっており、線路等級によるが概ねレール1本あたりの本数は同等である。

また、軌間を定めるためのコンクリート製枕木は曲線用の軌間公称値129[mm]のものを用いて、軌間130[mm]になるようにした。直線部に対して曲線部では台車を走行させやすくするように若干軌間を拡げるために、直線用(127[mm])と曲線用(129[mm])があったが、本研究では走行時の蛇行などの特性も評価しやすいように、直線軌きょうでありながら軌間を広めとした(狭いと振幅が大きくなるまえにフランジが接触するため)。レールの組立には専用のジグを製作し、軌間、枕木間隔、枕木とレールの直角度を管理し、かつ定規でレールの直線さを確認しながら組立を行った。これにより、軌間はほぼ全区間で $130_{-0.4}^{+0}$ [mm]程度とほぼ一定となった。

3.3 センシングと制御方針

現時点で制御系については開発中であり、実装しての制御実験は行っていない。前述の通り、本研究の方針としては、基本には左右の車輪が剛体結合された輪軸型で培われた従来技術があって、そこに左右が独立駆動となる利点を追加する。そのため、まずは左右の車輪の速度の制御と、その精度、安定性が直進性に及ぼす影響を確認し、そこからあえて速度差を与えた場合の挙動を検証する。単純には、踏面の勾配による、レールとの左右方向の相対位置とレールに接触する部分での半径比と速度比が釣り合うところが平衡点となると考えられるが、それ以外の未知要素があるかどうかを検証するための実験機の試作でもある。現時点では独立した制御系をもつ3相モータに対して速度指令等を与える方式であることに対して、より回転の同期を図るため、左右の対となる車輪のモータを一体で制御する方式も必要ではないかと考えている。

これが可能であれば、レールとの相対位置のセンシングと、それにもとづく走行位置の補正、とくにカーブにおける能動的な車輪速度比の設定なども可能となる。そのためにはレール位置のセンシングが必要となるが、予備実験において、レール側面を測距センサで読み取ることは可能であった。

また、4輪のうち、一部の車輪に故障があったときに、どのように残りの車輪で安定した走行が可能となるかも重要な検証項目である。

4. おわりに

本研究では鉄道用の左右独立の4輪駆動車の制御法の今後の必要性に着目し、そのための試験車両の試作を行った。車両は実機実験を行うことを前提に、実機との相似性を意識したスケールモデルとした。車体のメカニズムなどハード面の実装に目処がついた段階であり、引き続き制御系の実装および初期的な動作試験を行う予定である。

最後に、本研究での5インチレール類の導入にあたっては、(有)ヤマダ金属商会様、道楽ぼーず様から選定や情報の提供にてご支援頂いたことをここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 星光明, 山口正博, 大久保吉喜, 新井徳泰, 野中祐樹, 河野浩幸, “国産初100%超低床LRV(Light Rail Vehicle)”, 三菱重工技報 **43-1**, (2006), <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/431/431028.pdf>, (2024/12/10 確認)
- 2) 梅原淳, “いま話題の鉄道, 宇都宮ライトレールで感じられる横揺れはなぜ起きるのかを検証してみた”, Yahoo!ニュース <https://news.yahoo.co.jp/expert/articles/1513daf3caa99970b4dc31f82f27f2745f98727d>, (2024/12/10 確認)
- 3) さかいともみ, “スペイン「フリーゲージ列車」どんな仕組みなのか 日本仕様は?聞くと「相談してくれれば喜んで」”, 東洋経済オンライン, <https://toyokeizai.net/articles/-/624341>, (2002) (2024/12/10 確認)

- 4) 日本民営鉄道協会, “フリーゲージトレイン | 鉄道用語事典”, 鉄道用語事典, <https://www.mintetsu.or.jp/knowledge/term/16458.html>, (2024/12/10 確認)
- 5) 須田義大, “独立回転車輪を用いた操舵台車の研究開発の動向”, 生産研究, **47**-9 (1995), 東京大学学術機関リポジトリ, <https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/record/18504/files/sk047009001.pdf>, (2024/12/10 確認)
- 6) 須田研究室, “研究番号 K-18 逆踏面勾配独立回転車輪車両～フルスケールモデルによる走行制御実験”, 須田研究室 公開 2022 研究概要, http://www.nozomi.iis.u-tokyo.ac.jp/koukai_komaba22.html, (2024/12/10 確認)
- 7) 有限会社ヤマダ金属商会, “有限会社ヤマダ金属商会鉄道事業部”, <https://www.yamada-5inches.com/鉄道>, (2024/12/10 確認)
- 8) “道楽ぼーず”, <https://www7b.biglobe.ne.jp/~douraku/>, (2024/12/10 確認)
- 9) “製品紹介：新幹線用大型軌道モーター”, 北陸重機工業株式会社, <https://www.hokuju.com/product/523/> (2024/12/10 確認)