

## アクティブ制御と独立回転車輪を用いる走行装置開発による 鉄道車両の曲線通過性能向上に関する研究

氏名 王 文軍

### 1. 緒 言

鉄道車両の曲線通過性能は、高速走行安定性と相反する関係があり、両立のための研究開発が行われてきた。従来の一体輪軸では、急曲線旋回性能の限界があり、地下鉄やLRT(Light Rail Transit)などの都市交通システムへの一層の取り組みが必要である。また、従来の曲線通過性能の研究では、左右方向のダイナミクスが主体であり、前後方向の運動、すなわち駆動・制動力や、上下方向における輪重の変動の考慮はあまり行われていない。本研究は、駆動・制動力を考慮した新方式独立回転車輪を用いる走行装置の開発研究、アクティブ制御により車体傾斜および輪重アンバランスを抑制することにより、鉄道車両の曲線通過性能を向上することを試みたものである。

まず、提案されている自己操舵性独立回転車輪を用いる走行装置に駆動力を加える場合の課題を解明し、駆動・制動力を考慮した新方式独立回転車輪を用いる自己操舵性走行装置を提案する。

続いて、交差点通過時などの曲線半径 10m という超急曲線を旋回可能なLRV(Light Rail Vehicle)を実現させるため、逆勾配踏面形状の車輪を用いる新方式独立回転車輪走行装置を提案する。

さらに、構造簡単かつフェイルセーフ性の高い新方式空気ばね制御装置による車体傾斜制御システムを提案し、都市鉄道などの曲線通過時の乗り心地を向上させる。

最後に、提案する空気ばね制御装置を活用し、低速で出口緩和曲線通過時の輪重抜けを抑制し、急曲線通過安全性を向上する。

以上のアクティブ制御と独立回転車輪を用いる走行装置開発により、鉄道車両の曲線通過性能を向上する方策を考案し、特に地下鉄やLRTなどの都市鉄道交通システムのさらなる可能性を提供する。

### 2. 駆動駆動・制動力を考慮した 独立回転車輪を用いる走行装置

図 1 に示す従来提案されている自己操舵性独立回転車輪を用いる走行装置[1]は、駆動・制動力を加え

ると、駆動力から生じる逆操舵モーメントが支配的になり、図 1 に示す重力復元力による自己操舵能力なくなり、偏り走行に至る。

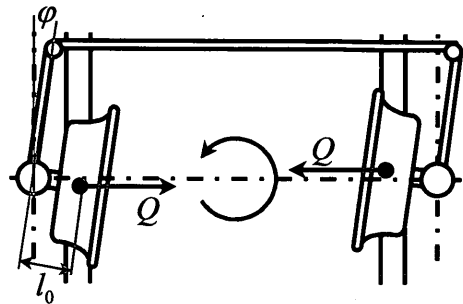


Fig. 1 EEF

そこで、図 2 に示す駆動・制動力を考慮した独立回転車輪を用いる走行装置を提案する[2]。

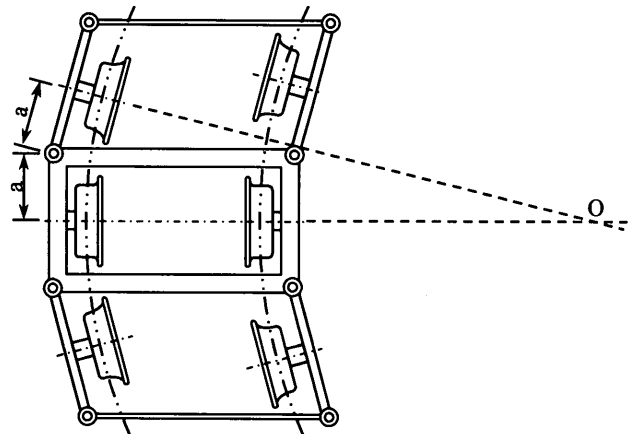


Fig. 2 Self-steering running gear with traction

提案する台車では、中間位置に台車枠を設け、その台車枠に独立回転車輪を設置する。台車枠の両端にジョイントを介し、それぞれ操舵輪ペアを取り付ける。両側の操舵輪はリンク機構により連結され、台車枠取り付けジョイント回りの操舵角を付けるようになる。駆動・制動力は、台車枠に取り付けられる駆動輪に加え、両端に取り付けられる操舵輪ペアにより操舵機能を図る。操舵輪には駆動・制動力を加えないため、重力復元力による操舵機能が駆動・制動力からの影響を受け、自己操舵機能が損なわれることが回避できる。

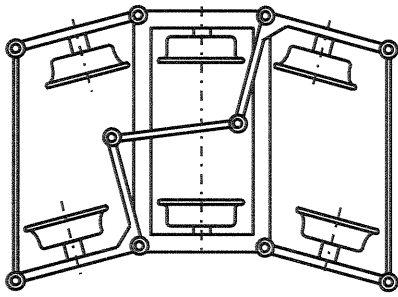


Fig. 3 Steer angle interlock

理論モデルによる安定解析を行い、図 3 に示す操舵角連動リンク機構により、安定する走行を実現し、スケールモデルの試作車両による走行実験にて駆動と操舵の両立を確認した。

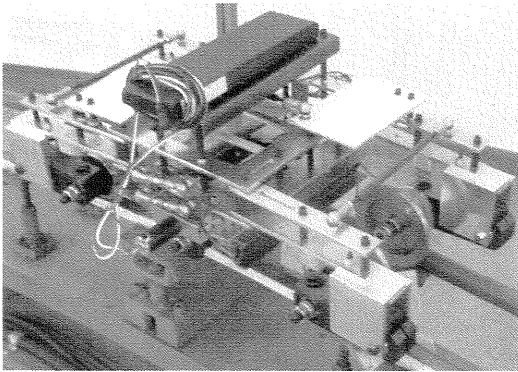


Fig. 4 Scaled model vehicle

### 3. 新方式独立回転車輪を用いる自己操舵性走行装置

図 1 に示す走行装置では、ヨー方向回転中心を車輪・レール接触点の外側へ移すことにより、独立回転車輪に自己操舵能力を与えている方法に対し、図 5(b)に示すように逆勾配踏面形状の車輪を用い、重力復元力の方向を外側向きに変えることにより、独立回転車輪の自己操舵能力を実現する新方式走行装置を提案する。

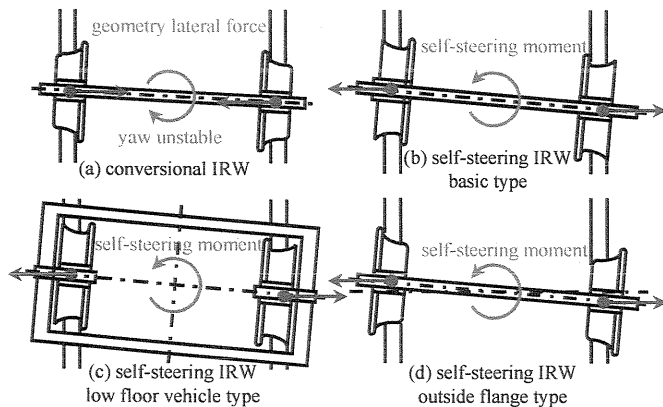


Fig. 5 New self-steering IRW running gear

提案する新方式独立回転車輪を用いる走行装置は、図 1 に示す従来提案に必要な操舵リンクなどによ

る機構の複雑化を回避できる。また、提案する走行装置は、左右の車輪が回転軸を共有するため、従来提案する走行装置におけるリンク機構の操舵動作による車輪ペアのバックゲージ縮小や、内外軌曲線半径差によるアタック角などの超急曲線旋回時の課題を解決できる。また、図 5(c)に示す貫通軸なし形式により、低床車も対応できる。

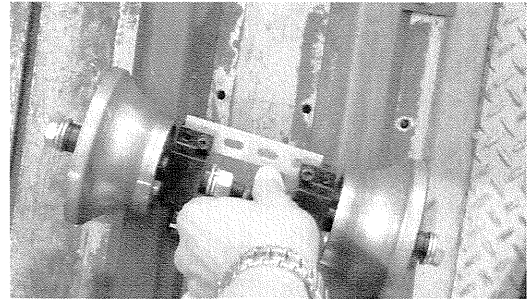


Fig. 6 Scaled model of proposed running gear

図 6 に示すスケールモデルで提案する走行装置の自己操舵機能を確認した上、提案する走行装置に適応する車輪踏面形状設計理論を考案した。従来の一体輪軸における車輪踏面形状設計とは別に、重力復元力を注目し、厳密の接触幾何学的な計算を行い、提案する走行装置に確実の横方向復元力を発生できる非線形車輪踏面形状の設計指針を考案した。

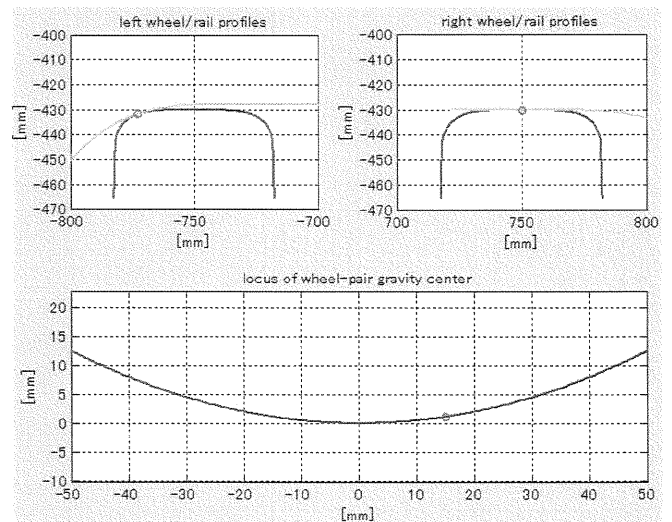


Fig. 7 Wheel profile design

図 7 に示すように左右変位が生じる際、車輪ペアの重心位置は上昇することを確保すれば、重力による復元力が発揮できるため、重心軌跡に基づき、車輪・レールの接触点を探索し、車輪の踏面形状点を算出するアルゴリズムを開発した。

提案した独立回転車輪の踏面形状設計理論を用い、マルチボディダイナミクス解析コード SIMPACK™ を利用し、図 8 に示す一車両シミュレーションモデルを構築し、曲線半径 10m である超急曲線旋回シミュレーションを行い、図 9 に示す究極の曲線旋回能力を確認した。

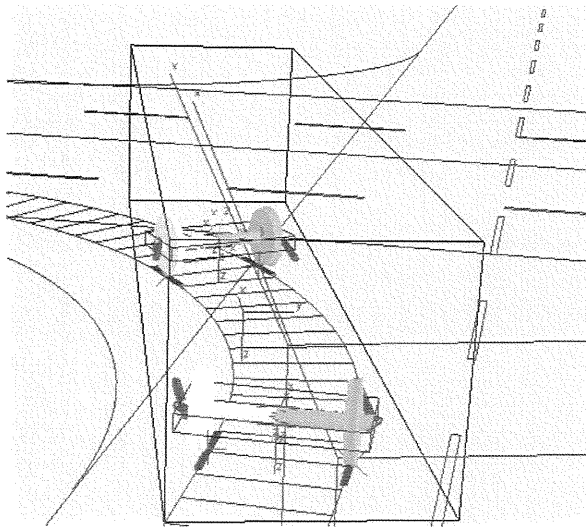


Fig. 8 Super tight curve negotiation

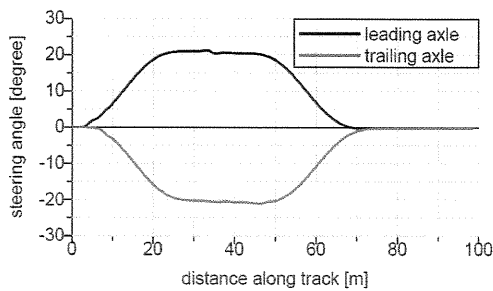


Fig. 9 Steering angle

#### 4. 空気ばねによる都市鉄道の車体傾斜制御

都市鉄道には急曲線が数多く存在するため、車体傾斜制御を行い、カント不足による超過遠心加速度を打ち消し、曲線通過時の乗り心地を向上することができる。従来の車体傾斜システムの構造複雑化に対し、空気ばねの長さをアクティブ制御し、車体を傾斜させるコンセプトを提案する。

また、フェイルセーフ性を考慮し、従来の機械的な空気ばね高さ自動調整弁(LV)を活用し、図10に示す新方式空気ばね制御装置を考案した。

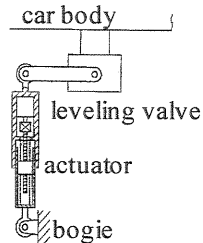


Fig. 10 AS control device

車体・台車枠間に設けていた連結棒は、車体・台車枠の相対上下変位にともない、LVのレバーを回転し、空気ばねへ給排気して荷重変動によらず車体高さを一定に保つ役目を持つ。連結棒の役目により車体・台車の相対上下変位からLV本体とレバーとの相対回転角が生じるメカニズムにアクティブ制御を介入し、例えば図10に示すように、直動アクチュエータで連結棒を取替え、LVの給排気動作をアクティ

ブ制御することにより、空気ばねの長さを制御し、車体を傾斜させるメカニズムとなる。アクチュエータがフェイルした際に戻りばねなどで連結棒の長さをパッシブ系と同じように戻し、従来の空気ばね系の性能を維持できる。

提案する車体傾斜制御システムの速答性を向上するため、LVによる給排気動作の空気流量を拡大したほうがよい。一方フェイルセーフ性を確保するため、パッシブ系の性能を従来どおり維持する必要がある。そこで、図11に示す2段空気流量特性を有するLVを提案する。大流量特性を通常走行時発生できないレバー角エリアだけに設け、フェイル時のパッシブ性能を維持しながら、アクチュエータで大レバー角を発生させ、アクティブ制御性能を向上する。

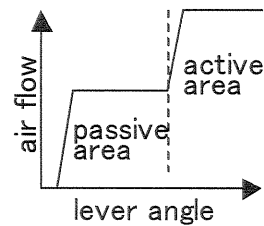


Fig. 11 2-step LV characteristic

3章で提案する走行装置を用いる車両モデルに急曲線通過時の空気ばね方式車体傾斜制御を行い、図12に示す制御効果を確認した。

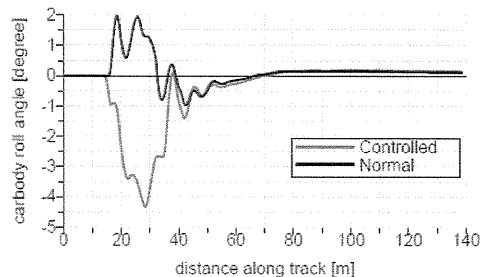


Fig. 12 Tilting control by active AS

また、バリアフリーの観点から提案する空気ばね制御装置を用い、停車時のニーリンク制御を行い、乗り降り利便性を向上することもできる。

#### 5. 輪重制御による曲線通過安全性向上

4章で提案する空気ばね制御装置を活用し、急曲線の出口緩和曲線を低速で走行する際の輪重抜けを抑制することにより、曲線通過安全性を向上するアクティブ制御を提案する[3]。

四点支持方式の空気ばね車両には、空気ばねが緩和曲線軌道のねじれにより強制変位を受けるにもかかわらず、各々のLVが独立に高さを一定に保とうとして給排気制御を継続するため、大きな内圧変動を生じやすい。

特に図13に示すように、出口緩和曲線では、輪重抜けの発生する第1台車外軌側で、空気ばねが伸ばされ、それゆえに排気を行なってさらに空気ばねが

伸びるといふ悪循環が生じ、内圧が大きく減少して輪重抜けを助長してしまう。

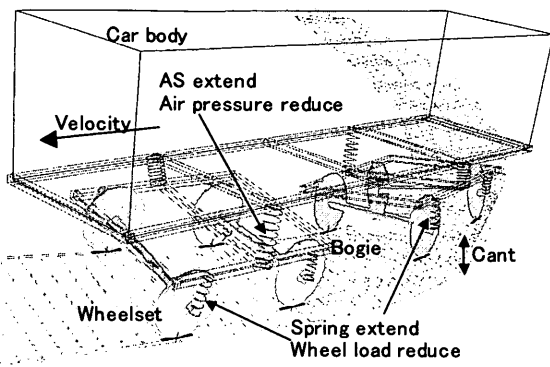


Fig. 13 Low speed exit transition curve negotiation

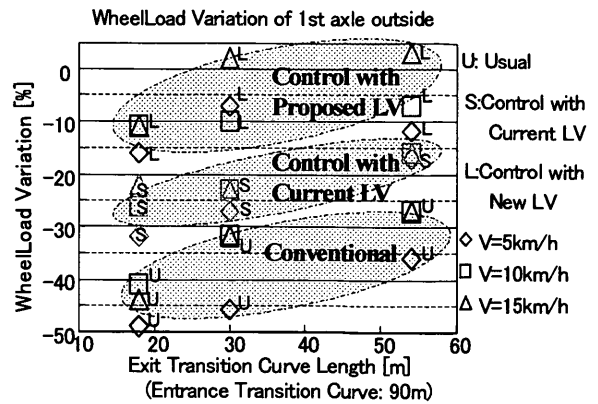


Fig. 16 Wheel load reduction preventing performance

## 6. 結論

本研究は、鉄道車両の急曲線通過性能を向上するため、アクティブ制御を独立回転車輪と用いる走行装置開発に関する研究を行い、以下の結論を得た。

- (1) 駆動・制動力を考慮した新方式独立回転車輪を用いる走行装置を提案し、理論解析と模型実験を行い、駆動・操舵を両立できることを確認した。
- (2) 逆勾配踏面形状車輪を用いる新方式独立回転車輪走行装置を提案し、スケール模型とマルチボディシミュレーションを行い、提案する走行装置の自己操舵性能を検証し、LRVの交差点通過などの超急曲線旋回性能をシミュレーションで確認した。
- (3) 2段空気流量特性を有するLVによるアクティブ空気ばね制御装置とを考案し、構造簡単かつフェイルセーフ性のある空気ばね方式車体傾斜制御コンセプトを提案した。
- (4) アクティブ空気ばね制御装置を利用し、低速出口緩和曲線通過時の輪重抜け現象を抑制する制御則を考案し、実スケールのベンチ試験とフルビークルシミュレーションと両方で輪重抜け抑制制御効果を確認した。

## 文献

- [1] F. Frederich: *Dynamics of a bogie with independent wheels*, Vehicle System Dynamics, Supplement 19, pp.271-232 (1989)
- [2] W. Wang, Y. Suda, et al., *Running Performance of Steering Truck with Independently Rotating Wheel Considering Traction and Braking*, Pro. of the 20th IAVSD, pp125-126, (2007-8)
- [3] 須田・王他, 鉄道車両用空気ばね系の輪重抜け抑制制御に関する研究, 機論 C, 71-702, pp96-99, (2005-2)
- [4] 須田・王他, 鉄道車両用空気ばね系の輪重抜け抑制制御性能の向上に関する研究, 機論 C, 72-718, pp174-178, (2006-6)

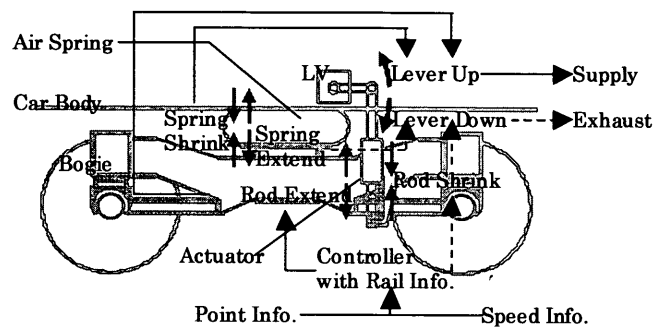


Fig. 14 Feed forward control method

図 14 に示すように運行線路の軌道情報(曲線長, カントなど)を入力したコントローラが路面マーカー, エンコーダなどから車両の地点情報と走行速度を得て, あらかじめ軌道条件や走行速度に応じて制御方法が一意的に対応づけられているフィードフォワード制御を行い, アクチュエータの動作を決定することを想定し, 一車両モデル試験機による走行模擬試験を行い, 図 15, 図 16 に示す輪重抜け抑制制御効果を実証した[4]。

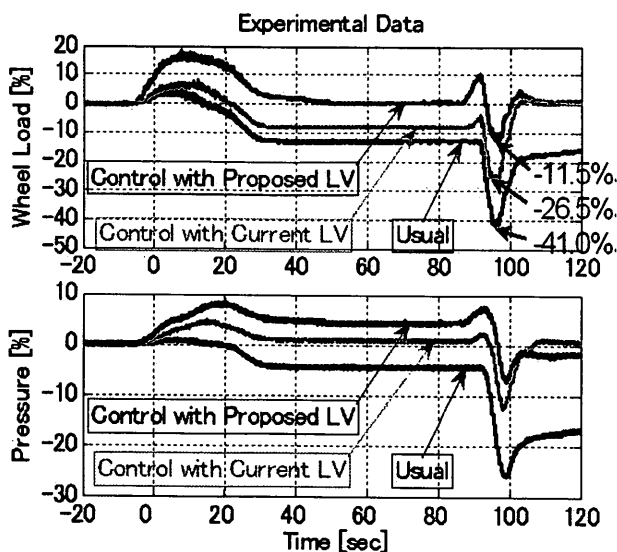


Fig. 15 Experiment results