

2703 逆踏面式輪軸を用いた操舵台車の走行性能

正〔機〕 道辻 洋平 (茨城大) フェロー〔機〕 須田 義大 (東大生研)

学〔機〕 〇島森 義 (農工大院) 正〔機〕 林 世彬 (東大生研)

Running Performance of Steering Truck on Wheelset with Inverse Tread

Yohei MICHITSUJI, Ibaraki University 4-12-1 Nakanarusawa-cho Hitachi-shi Ibaraki

Yoshihiro SUDA, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Tomo SHIMAMORI, Tokyo University of Agriculture and Technology

Shihpin LIN, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Recently, Light Rail Transit attracts attention as urban traffic system of the next generation, because it is economical and clean. In order to realize barrier-free design, LRV often has independently rotating wheels. However, wheelset with normal IRW does not have self-steering moment. In order to get self-steering moment, in previous research, EEF bogie was proposed. But, because the link joins the bogie's wheels, the bogie's structure is comparatively complicated. This paper proposes the introduction of wheelset with inverse tread IRW whose structure is simple and simulation results with a vehicle model show the effectiveness of wheelset with inverse tread IRW.

Keywords: Railway Vehicle, Independently Rotating Wheels, Steering Truck, Inverse Tread

1. はじめに

次世代路面電車車両である LRV (Light Rail Vehicle) は、輸送性・省エネルギー性を備えた優れた交通システムとして期待されている¹⁾。LRV には、バリアフリーの観点から車両全体に及ぶ超低床化をはかるため、車輪間の空間を通路として使用できる独立回転車輪軸が用いられている。しかし、独立回転車輪軸は左右の車輪が独立に回転するという特徴ゆえ、急曲線での操舵性が低く、また偏り走行しやすいためフランジを磨耗しやすいという欠点がある。そのため走行性能改善への更なる技術開発が望まれている。

これまでに、車輪踏面勾配による重力復元力に着目し、自己操舵機能を生じさせる、二輪ユニット操舵台車²⁾が提案されている。この台車は、ヨー方向回転中心を車輪・レール接触点の外側に配置することで、静的に安定な性質を有する。しかしながらこの方式の輪軸は、左右の車輪間にリンク機構を設置するなど、通常の輪軸に比べ複雑な構造となっている。

そこで新たに、踏面内側より外側の車輪半径が大きくなるよう設計された逆踏面式独立回転車輪軸³⁾が提案されている。これは通常の独立回転車輪軸の踏面形状を変えるだけというシンプルな構造ながら、自己操舵機能を有しており、革新性のある輪軸として研究する価値が大きい。

本研究ではマルチボディ・ダイナミクスを用いたシミュレーションを行い、車両モデルに逆踏面式独立回転車輪軸を用いた場合の走行性能の検証を行った。

2. 独立回転車輪

2.1 通常の独立回転車輪軸

図 1(a)に示すように、通常の独立回転車輪軸では、車輪の踏面勾配により、輪軸に内向きの重力復元力が発生す

る。この内向きの力により、ヨー角が存在する際に輪軸の回転中心に対してさらにヨー角を増大させる、反操舵モーメントが生じる。このダイナミクスは倒立振子に相当し、通常の独立回転車輪軸単体では静的に不安定な性質を有する。

2.2 逆踏面式独立回転車輪軸

二輪ユニット操舵台車ではリンク機構により、車輪のヨー方向回転中心を車輪・レール接触点の内側から外側に変えることで自己操舵機能を得ている。同様の効果を得るために、車輪のヨー方向回転中心を変えるのではなく、重力復元力を内向きから外向きに変えることによっても、図 1(b)に示すように自己操舵モーメントが得られると考えられる。

重力復元力の方角を変えるには、従来の車輪踏面形状とは逆に、踏面内側より外側の車輪半径が大きくなるように設計すればよい。

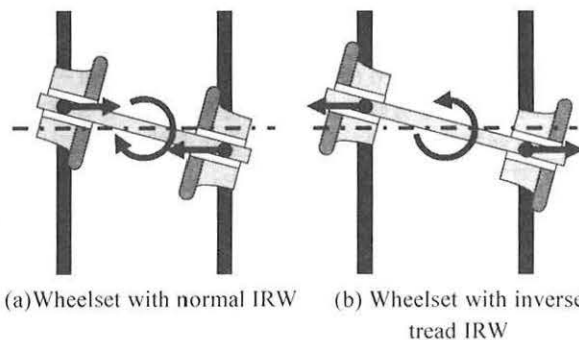


Fig.1 Steering mechanism

3. 輪軸モデルのダイナミクス

はじめに通常輪軸の運動方程式は、左右変位 y 、ヨー角 ψ とすると式(1)のようになる。

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \frac{1}{v} \begin{bmatrix} 2\kappa_{22} & 0 \\ 0 & 2b^2\kappa_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -2\kappa_{22} \\ \frac{2b\gamma_0\kappa_{11}}{r_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

各記号の意味は以下である。

m : 車輪質量, I : 車輪操舵慣性モーメント

v : 車速, κ_{11}, κ_{22} : 縦, 横クリープ係数

r_0 : 中立位置の車輪半径, γ_0 : 中立位置での踏面勾配

b : 左右車輪レール接触点間距離の半分

次に、車輪踏面形状が式(2)のような非線形性を持つ場合を考える。

$$\gamma(y) = \gamma_0 + \gamma_1 y \quad (2)$$

ただし、 γ_1 : 踏面勾配変化率である。

このような非線形の車輪踏面形状のため、重力復元力により左右変位 y が発生した場合は式(3)のような復元力が、またヨー角 ψ が発生した場合は式(4)のような復元モーメントが得られる。

$$f = -2P\gamma_1 y \quad (3)$$

$$\tau = -2P\gamma_0 b \psi \quad (4)$$

ただし、 P : 車輪垂直荷重である。

これら復元力、復元モーメントと、左右の車輪が独立に回転するという条件 $\kappa_{11} = 0$ から、逆踏面式独立回転車輪軸の運動方程式は式(5)のようになる。

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \frac{1}{v} \begin{bmatrix} 2\kappa_{22} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2P\gamma_1 & -2\kappa_{22} \\ 0 & 2P\gamma_0 b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

この式は、二輪ユニット操舵台車の運動方程式と同様のものとなる。

4. シミュレーションモデル

逆踏面式独立回転車輪軸の有効性を確認するため、車両モデルによる検討を行う。シミュレーションモデルは汎用マルチボディ・ダイナミクス解析ソフト「SIMPACK」を用いて図2に示すような実車スケールのモデルを作成した。モデルはLRVを想定しており、車両全体に及ぶ超低床化をはかるため、車輪間の空間を通路として使用できる、貫通軸を設けない方式とした。

車両構造は、車体一つ、台車枠二つ、逆踏面式独立回転車輪軸二つで構成されている。車軸-台車枠間は心皿により結合されており、輪軸は台車枠に対してヨー方向の回転自由度のみを持っている。台車枠-車体間は線形ばねにより結ばれている。また、走行安定性を確保する目的として、車軸-台車枠間にはステアリングヨーダンパが取り付けられている。

5. セミアクティブ制御

5.1 概要

車軸-台車枠間に取り付けているステアリングヨーダンパは、微小な振動を吸収し走行安定性を向上させる働きがある一方、緩和曲線区間など曲率の変化を伴う区間では自己操舵に対する反操舵トルクを発生し、応答悪化の要因となる。そこで、急曲線区間では制限速度により低速走行となることに着目し、直線区間ではステアリングヨーダンパの発生トルクが大きく、また曲線区間では小さくなるよう、走行速度に応じてステアリングヨーダンパの減衰係数を変化、および発生トルクの限界値を設定・変化させることで、高速走行安定性と曲線通過性能の両立をはかる。

5.2 ユーダンパの減衰係数・トルク限界値の影響

ステアリングヨーダンパの減衰係数、および発生トルクの限界値の変化による曲線通過性能への影響を確認するために、直線長さ 5m、緩和曲線長さ 5m、定常曲線長さ 30m、曲線半径 30m の曲線軌道で、速度 1m/s の走行シミュレーションを行った。

ステアリングヨーダンパの減衰係数 c_{st} を変更した場合のアタック角の応答を図3に示す。図3から、減衰係数の値を小さくすることで曲線進入部でのアタック角を低減できることが確認できた。また、発生トルク T の限界値を変化させた場合のアタック角の応答を図4に示す。図4にあるように限界値を小さくすることで、減衰係数を変更した場合と同様に曲線進入部でのアタック角を小さくできている。ただし、発生トルクの限界値を小さくしていくと、振動的となる。

これらのシミュレーションより、ステアリングヨーダンパの減衰係数、および発生トルクの限界値を変化させることは、曲線通過性能向上への効果があると確認できた。

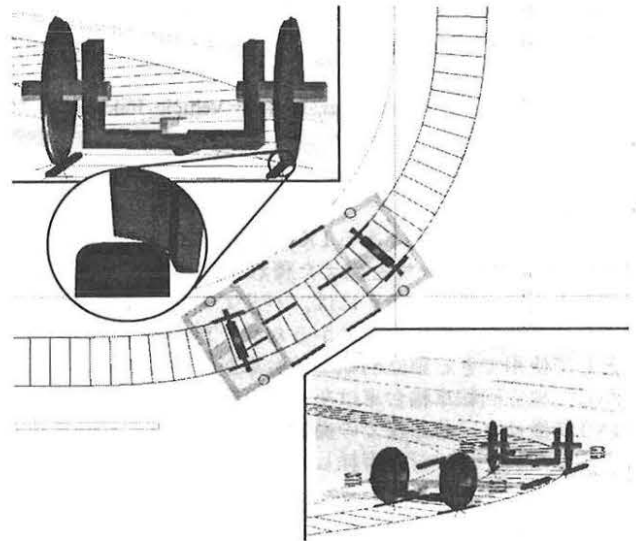


Fig.2 Simulation model

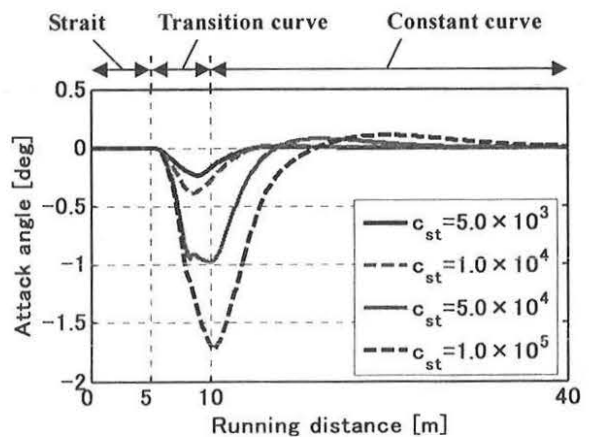


Fig.3 Effect of damping coefficient

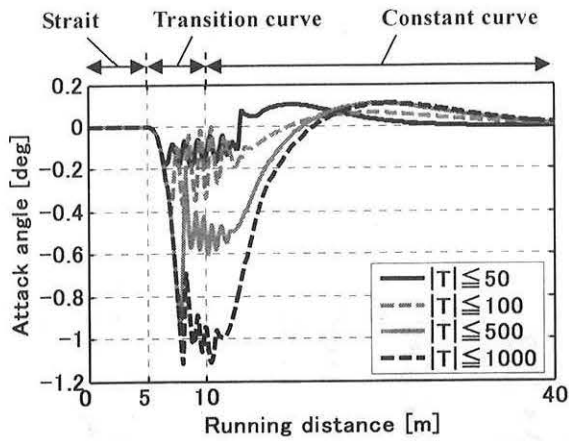


Fig.4 Effect of torque limitation

5.3 ステアリングヨーダンパの減衰係数の検討

ステアリングヨーダンパの減衰係数を変化させても走行安定性が保たれるよう、検討を行う。

初期の左右変位 5mm の状態から、直線軌道を走行させることで、各速度で走行安定に必要な減衰係数の値を求めていく。走行速度 5m/s の場合の結果を図 5 に示す。減衰係数が 180Nms/rad では発散しているのに対し、190Nms/rad では中立位置へと収束している。このことから、走行速度 5m/s での走行安定となる最小の減衰係数は 190Nms/rad となる。

同様に走行速度 8, 10, 20, 30, 40m/s の各場合でも中立位置へと収束する最小の減衰係数の値を求め、これを図 6 に示す。これより、常に走行が安定となるよう、セミアクティブ制御時の減衰係数を式(6)のように定める。

$$c_{st} = \begin{cases} (3.2 \times 10^3)v - 1.0 \times 10^4 & (v > 5) \\ 6.0 \times 10^3 & (v \leq 5) \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 c_{st} : 減衰係数[Nms/rad], v : 走行速度[m/s]である。

5.4 ステアリングヨーダンパの発生トルク限界値の検討

ステアリングヨーダンパの発生トルクは、不整を有する軌道を走行する際に特に大きな値となる。そこで条件の悪い軌道不整⁴⁾とされる、波高 6mm、波長 10m の正弦波状の軌道不整を有する直線を走行する際の発生トルクを走行シミュレーションから求め、これを下回らないよう発生トルクの限界値を定める。

速度 10m/s でのシミュレーション結果を図 7 に示す。同様に 15m/s から 40m/s まで 5m/s ごとにシミュレーションを行い、これらの結果から、前輪、後輪それぞれに対して発生トルクの最大値、最小値を求めたものを図 8 に示す。これより、常に安定した走行となるステアリングヨーダンパの発生トルク限界値を式(7)のように定める。

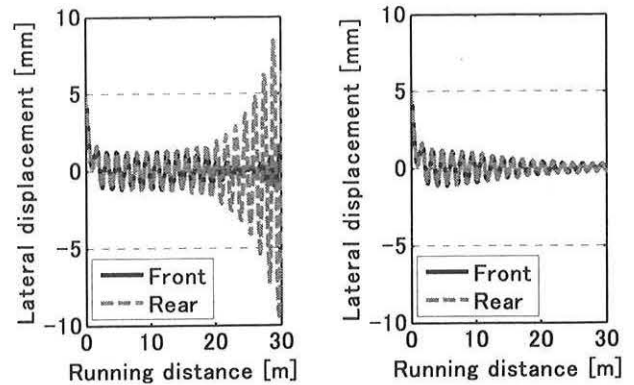
$$-70v \leq T \leq 70v \quad (7)$$

ただし、 T : ステアリングヨーダンパの発生トルク[Nm]である。

6. シミュレーション

6.1 シミュレーション軌道

シミュレーション軌道は、現行の LRT 路線より大幅に急な半径 10m の曲線を模擬している。軌道緒元は表 1 になっている。



(a) $c_{st} = 180\text{Nms/rad}$

(b) $c_{st} = 190\text{Nms/rad}$

Fig.5 Difference of response by damping coefficient

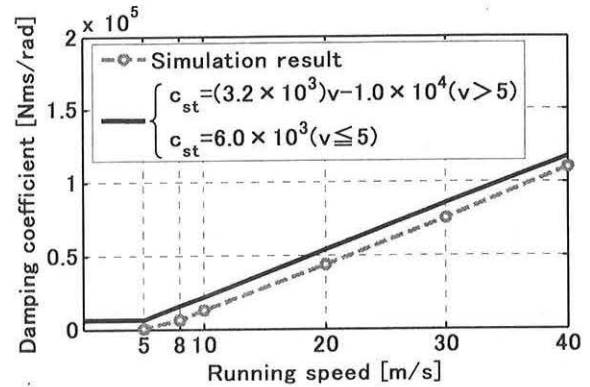


Fig.6 Damping coefficient for stability

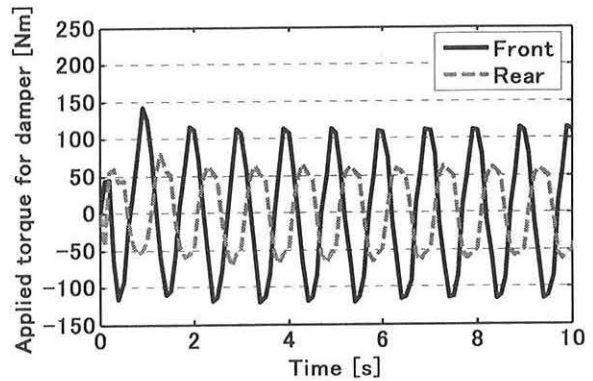


Fig.7 Damping torque on $v=10\text{m/s}$

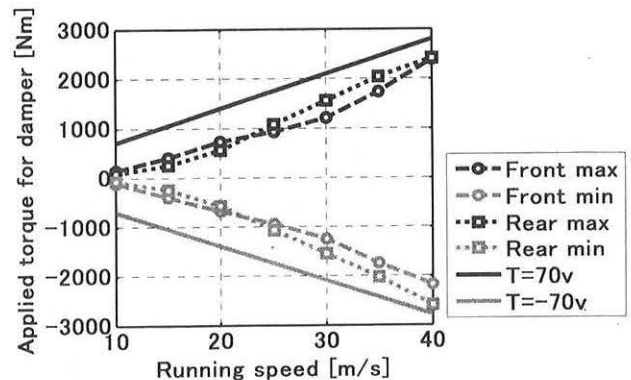


Fig.8 Damping torque for stability

6.2 シミュレーション結果

以下の4種類の車両モデルについて、速度 1m/s の条件で表1の軌道を走行させた。

- Type1 : 通常輪軸一軸台車車両
- Type2 : 通常独立回転車輪輪軸一軸台車車両
- Type3 : 逆踏面式独立回転車輪輪軸一軸台車車両
- Type4 : 逆踏面式独立回転車輪輪軸一軸台車車両のセミアクティブ制御モデル

これらモデルのイメージを図9に示す。

ただし、通常輪軸とは一般的な鉄道で用いられている、左右車輪が車軸で結合されている輪軸のことを指す。

これら4種類のモデルの、前輪アタック角の応答を図10に示す。図10から、逆踏面式独立回転車輪輪軸は中立位置へ戻る復元力を持ち、安定な系であることが確認できる。その上で Type3 は、Type1、および Type2 に比べアタック角を大きく低減できており、定常曲線区間ではアタック角がほぼゼロであり、理想的な曲線通過が実現できている。しかしながら、曲線進入部の緩和曲線区間ではステアリングヨーダンパによる反操舵トルクによりアタック角を十分に低減できていない。ステアリングヨーダンパのセミアクティブ制御を行った Type4 では、定常曲線区間だけでなく緩和曲線区間を含めた軌道全体で車輪アタック角をほぼゼロとすることができている。

また図11に前輪外軌側横圧の応答の絶対値を示す。Type3 では定常曲線区間では横圧の低減ができていたが、曲線進入部では大きな値となっている。セミアクティブ制御を行うことで、Type4 の結果が示すように曲線進入部での最大横圧を低減できていることがわかる。

7. まとめ

本報告では逆踏面式輪軸を用いた走行シミュレーションを行い、以下の知見が得られた。

- ・ 踏面勾配の向きが通常と逆である逆踏面式独立回転車輪輪軸は、シンプルな構造ながら自己操舵機能を持ち、中立位置へ戻る復元モーメントを有する事を確認した。
- ・ 逆踏面式独立回転車輪輪軸を備えた車両は、通常輪軸の場合、および通常独立回転車輪輪軸の場合と比較して、急曲線通過時の車輪アタック角、横圧を低減できることを確認した。
- ・ ステアリングヨーダンパのセミアクティブ制御を行うことで、定常曲線区間だけでなく緩和曲線のような曲率の変化を伴う区間でも車輪アタック角、横圧を低減できる。

参考文献

- 1) 須田義大：低床式 LRT の意義と技術課題，鉄道車両と技術，3-9，23，5-12，レールアンドテック出版，1997。
- 2) 道辻洋平，須田義大：スケールモデル実験装置を用いた独立回転車輪パワーステアリング台車の走行性能，日本機械学会論文集（C 編），71 巻 703 号，pp.103-110，2005。
- 3) 須田義大，王文軍，道辻洋平，仁科穰：操舵機能を持つ新方式独立回転車輪台車の可能性，J-RAIL2008，2008。
- 4) 谷藤克也：台車旋回抵抗を考慮したボギー車の左右強制振動解析（第1報，側受摩擦力の影響），日本機械学会論文集（C 編），55 巻 512 号，pp.940-949，1989。

Table.1 Track Parameters

Length of strait	[m]	5
Length of transition curve	[m]	5
Length of constant curve	[m]	30
Radius of constant curve	[m]	10

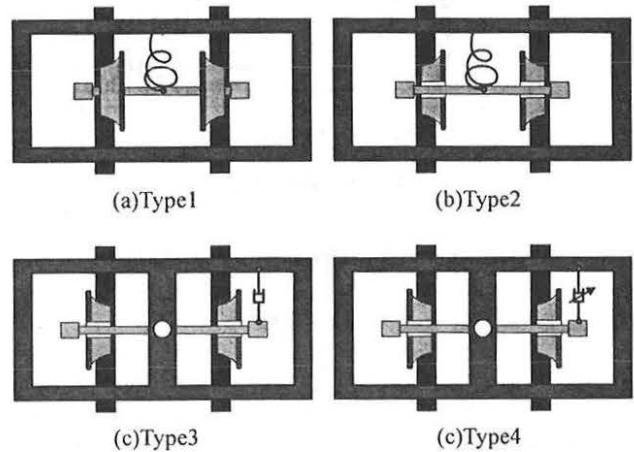


Fig.9 Bogie models

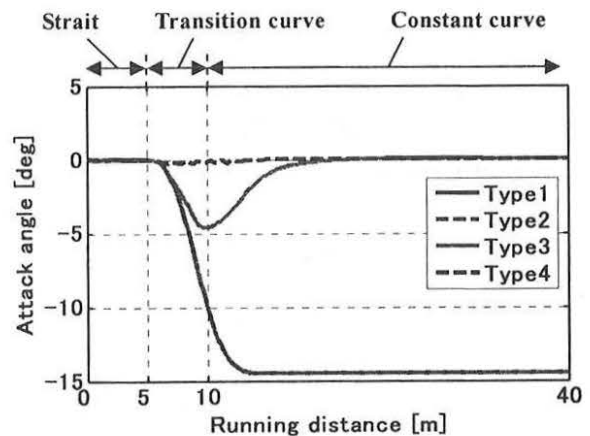


Fig.10 Attack angle of front wheel

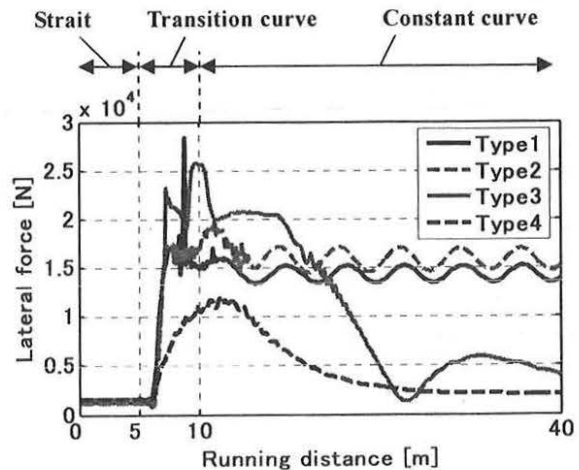


Fig.11 Lateral force of front outer wheel