

1211 マルチボディ・ダイナミクスを用いた LRV用セミアクティブ操舵台車の検討

学〔機〕 ○秋山 裕喜 (農工大院)

正〔機〕 道辻 洋平 (茨城大)

フェロー〔機〕 須田 義大 (東大)

A Study of Semi-active Steering Truck for Light Rail Vehicle Based on Multibody Dynamics

Yuki AKIYAMA, Tokyo University of Agriculture and Technology. 2-24-16, Naka-cho, Koganei-city, Tokyo

Yohei MICHITSUJI, Ibaraki University.

Yoshihiro SUDA, The University of Tokyo.

It is necessary for Light Rail Vehicle (LRV) to run on sharp curves smoothly. When LRV pass the tight curve, increase of the lateral force becomes serious problem. In the previous research, active control bogie with arranged linkage mechanism has been proposed and it enables the bogie to realize ideal curving. Active steering control requires sensors, actuators and other electronic devices. Therefore, it tends to become complex structure. In this paper, the newly proposed steering bogie with simple mechanism with semi-active damper is studied.

Keywords: Railway Vehicle, Independently Rotating Wheels, Semi-active Control, Multibody Dynamics

1. 緒言

近年、次世代の路面電車車両として LRV (Light Rail Vehicle) が注目されている。LRV は、交差点のような急曲線を走行する必要がある、その際に発生する、脱線や車輪・レール摩耗の原因となる横圧を低減する必要がある。しかし、LRV で多く用いられる独立回転車輪台車は、軌道追従性に乏しく、直線では偏り走行をしやすく、曲線での操舵性も乏しい。そこで、アクチュエータにより、車輪を操舵できる機構を有するアクティブ操舵台車が提案され、アクティブ制御により直線での偏り走行、曲線での操舵性の両方を解決できることが示されている¹⁾。さらには、学習制御を行うことで軌道に不整のある曲線でも理想的な操舵が可能であることが示されている²⁾。しかし、アクティブ制御ではシステムの複雑化、左右変位を測定する新たなセンサーが必要な点、フェールセーフ、コストなどが問題点として挙げられている。

そこで、本報告では新たなセンサーの必要ない走行速度に応じて、走行安定性と曲線通過時の最大横圧に影響を与える車軸・ステアリングリンク間のヨーダンパの減衰係数、発生力の限界値を変化させるセミアクティブ制御により曲線進入時の最大横圧・走行抵抗の低減を行い、その効果を 6 種類の台車を用いて比較検討を行った。

2. シミュレーションモデル

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 1 に示すような、実車スケール車両モデルを作成した。左右の車軸をステアリングリンクにより結ぶことで、左右車輪が連動して操舵する機構を採用し、ステアリングリンク・台車枠間にはヨーダンパを設置することで高速走行安定性を確保している。また、車軸・ステアリングリンク間の角度 θ を最適化することで曲線通過中の定常的な横圧を低減可能である。

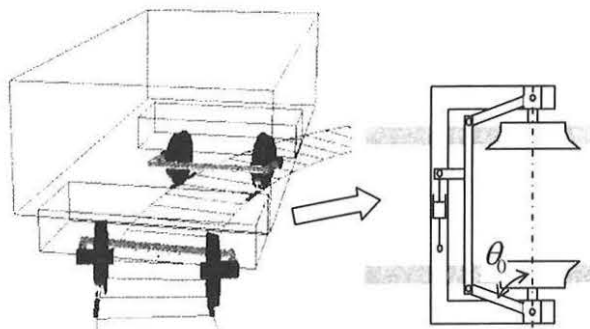


Fig.1 Simulation model

3. リンクアレンジの最適化

車軸・ステアリングリンク間の角度 θ は定常曲線通過時の車輪とレールのなす角であるアタック角を基準に設定した。 θ を 50 度から 90 度まで 5 度刻みで変化させ、直線 5m、緩和曲線 20m、定常曲線 50m、曲線半径 10m の軌道を走行速度 1m/s 一定の条件下で走行シミュレーションを行い、それぞれの θ でのアタック角を求めた。走行位置と前輪外軌側アタック角の関係を図 2 に示す。図 2 より θ の角度により定常状態でのアタック角が異なることがわかる。

次に、 θ と定常状態での前輪外軌側、内軌側アタック角との関係について整理したものを図 3 に示す。図 3 の結果より θ の最適値は前輪外軌側、内軌側ともに 0mrad 近傍となる約 62.2 度となることがわかり、理論解 61.5 度³⁾とほぼ等しいことが確認できる。そこで車軸・ステアリングリンク間の角度を最適化したモデルとして θ を 61.5 度としたモデルを用い以後のシミュレーションを実行することとする。

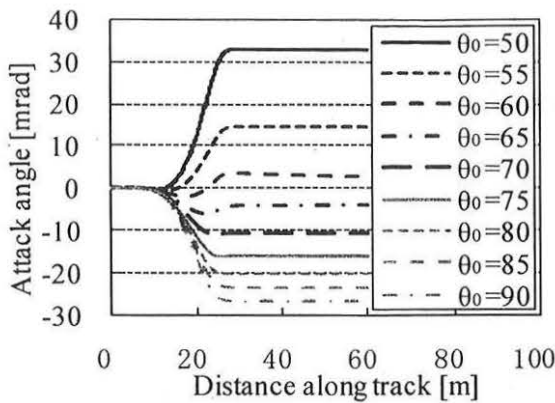


Fig.2 Simulation result of attack angle

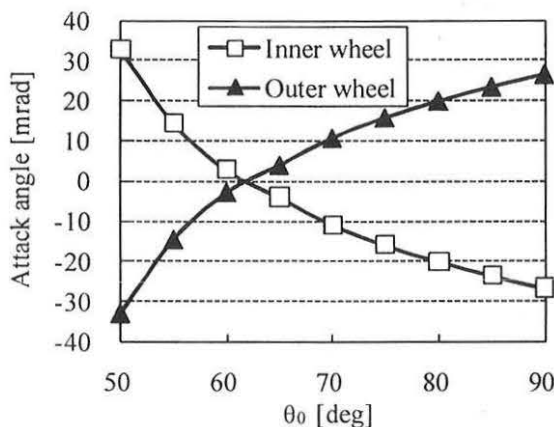


Fig.3 Relation between θ_0 and attack angle

4. セミアクティブ制御

4.1 概略

走行安定性確保のために設置されている、台車枠・ステアリングリンク間のヨーダンパは、曲線入口では反操舵トルクを発生し操舵遅れを生じさせ、最大横圧増加の原因となる。そこで、急曲線区間では制限速度により速度が低速になるという点をふまえ、走行速度に応じてステアリングダンパの減衰係数、発生トルクの限界値を変化させることで、曲線進入時の最大横圧低減を行う。

4.2 減衰係数の最適値導出

ステアリングダンパの減衰係数は走行安定性に影響を与えない範囲で変化させることを考える。そこで、初期変位 9mm を与えた状態から、走行が安定となるのに必要なステアリングダンパの減衰係数を、十分な余裕をみて走行速度 40m/s まで、空車、満車の状態に対して減衰係数を変化させ、実際にシミュレーションを行うことで確認した。走行速度 40m/s、空車での走行安定に必要な減衰係数は 60kNs/m であることがわかる。

同様に、他の走行速度についても走行が安定となる減衰係数を求め、図 5 にまとめる。この結果より、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の変化を、

$$\begin{cases} C = 2V - 10 & (V > 7.5) \\ C = 5 & (V \leq 7.5) \end{cases} \quad (2)$$

と定義する。

ここで、 C : 減衰係数[kNs/m]、 V : 走行速度[m/s]とする。

4.3 最大トルクの最適値導出

ヨーダンパの発生するトルクは軌道不整を有する直線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 10mm の正弦波状の軌道不整を有する直線を走行する際に発生するステアリングトルクを、10m/s から 40m/s まで走行シミュレーションを行い求め、これらを下回らないよう、セミアクティブダンパの発生トルクの限界値を定める。走行速度 40m/s での結果を図 6 に示す。この結果より、前輪、後輪それぞれに対して、発生トルクの最大値、最小値を取り、速度ごとに整理したものを図 7 に示す。この結果より、高速走行時のダンパ発生トルクに影響を与えない、

$$-0.12V \leq T \leq 0.12V \quad (3)$$

でダンパの発生トルクの限界値を定義する。

ここで、 T : ダンパの発生トルク[kNm]とする。

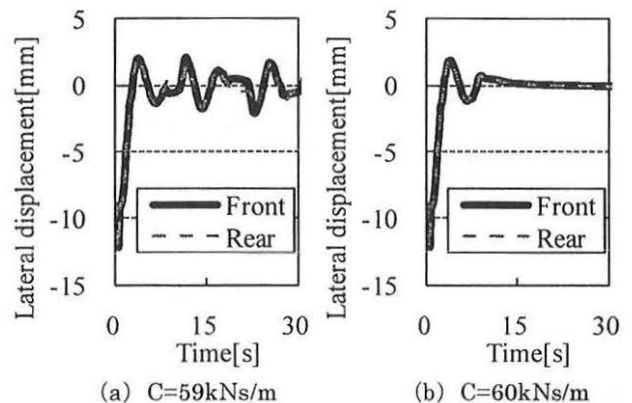


Fig.4 Relation between damping coefficient and displacement

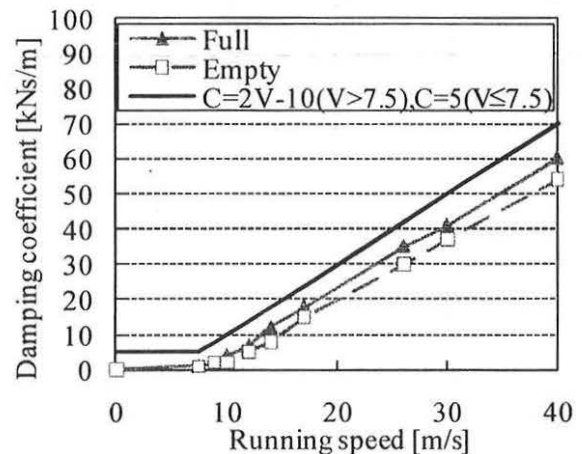


Fig.5 Damping coefficient for steady

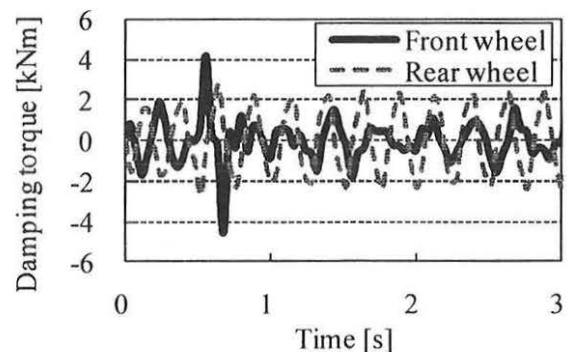


Fig.6 Damping torque of $V=40\text{m/s}$

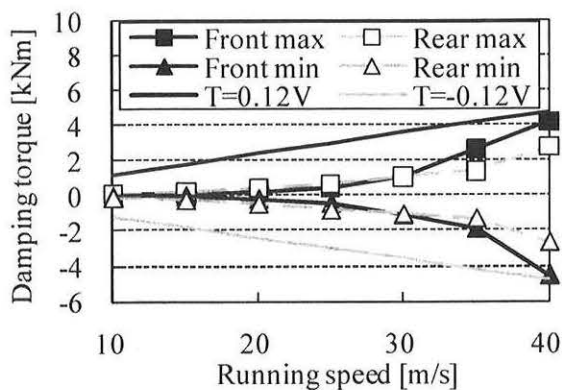


Fig.7 Damping torque for steady

5. 曲線通過性能の検討

5.1 比較モデル

現在実用化されている台車との比較検討を行うために、一般的な鉄道車両に用いられている通常輪軸一軸台車⁵⁾、通常独立回転車輪の一軸台車を作成した。また、先行研究にて理想的な曲線通過が実現可能とされているフィードバック制御をリンクアレンジを最適化したモデルに適用したものを作成し、以下に示す6種類のモデルで比較検討を行った。

- (TYPE 1) 通常輪軸一軸台車
 - (TYPE 2) 通常独立回転車輪一軸台車
 - (TYPE 3) 先行研究で提案された EEF 台車
(ステアリングリンク 90 度モデル)
 - (TYPE 4) リンクアレンジを最適化した EEF 台車
(ステアリングリンク 61.5 度モデル)
 - (TYPE 5) 4 章で提案したセミアクティブ操舵台車
 - (TYPE 6) フィードバック制御モデル
- それぞれのモデルのイメージを図 8 に示す。

5.2 曲線通過シミュレーション

曲線通過時の横圧を、直線 5m、緩和曲線 5m、定常曲線 60m の軌道で、走行速度 1.4m/s 一定の条件で前節にて述べた 6 種類のモデルで曲線半径 10m から 50m まで走行シミュレーションを行った。例として、曲線半径 30m での前輪外軌側横圧の時系列応答を図 9 に示す。それぞれの曲線半径について、最大横圧と定常横圧を求め、定常横圧について整理したものを図 10 に、最大横圧について整理したものを図 11 に示す。

5.3 本章の考察

TYPE4 の EEF 台車 61.5 度リンクモデルと TYPE5 のセミアクティブ制御モデルを比較することでセミアクティブ制御の効果を確認することができる。図 11 よりセミアクティブ制御を行うことで、最大横圧は約半分にできていることがわかる。また、図 9 より定常横圧に差はないが、定常状態になるまでの時間が短く、軌道追従性が向上していることがわかる。

TYPE3 の 90 度リンクモデルと TYPE4 の 61.5 度リンクモデルを比較することで、リンクアレンジ最適化の効果が確認できる。リンクアレンジ最適化を行うことで、アタック角が低減し、その結果、図 10 に示すように定常横圧を大幅に低減できることがわかる。

図 11、TYPE6 のフィードバック制御モデルの結果から、理想的なフィードバック制御を行うと最大横圧は大幅に低減できることがわかる。

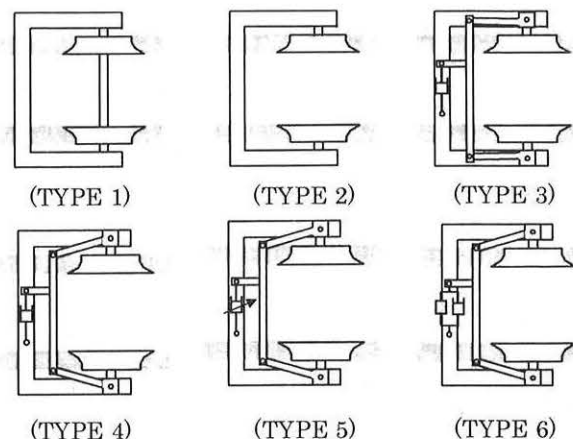


Fig.8 Bogie models

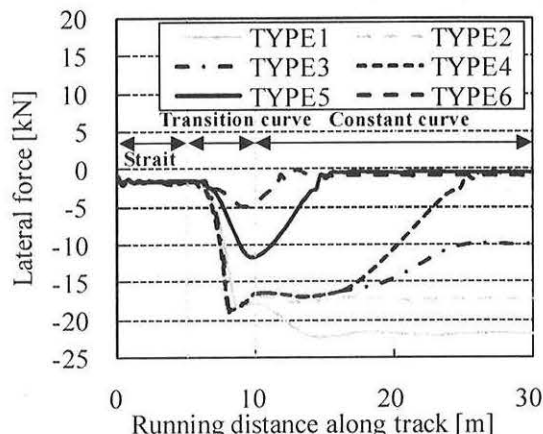


Fig.9 Lateral force of front outer wheel

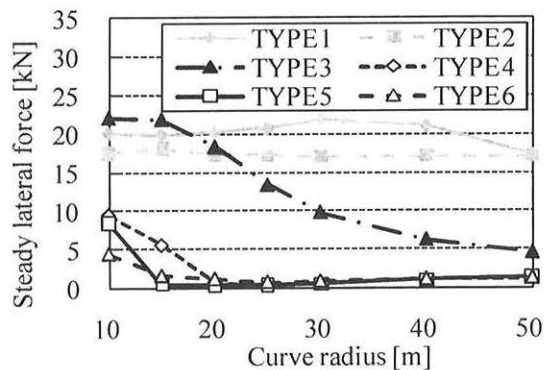


Fig.10 Steady lateral force

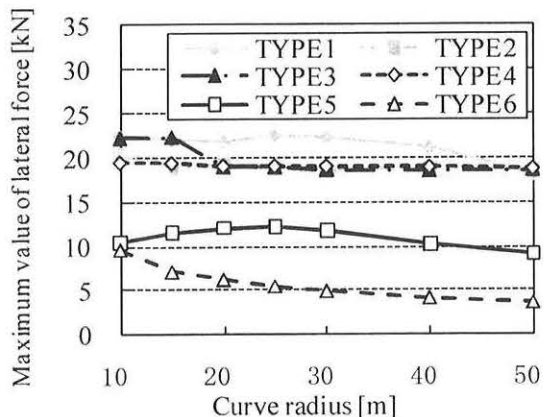


Fig.11 Maximum value of lateral force

6. 走行抵抗低減による省エネルギー性の検討

6.1 省エネルギー性検討シミュレーション

検討する軌道は図 12 に示すような交差点を模擬した軌道とし、直線 5m、緩和曲線 5m、定常曲線、緩和曲線 5m、直線で構成される。定常曲線長は 90 度の曲線となるよう曲線半径に応じて変化させている。初速度 1.4m/s 可変の条件で、5.1 節で示した 6 種類のモデルで走行シミュレーションを行い比較検討を行った。例として、曲線半径 25m 時の走行速度の応答グラフを図 13 に示す。

また、初速度と終速度の差からエネルギー損失を求め、曲線入口から曲線出口、または曲線途中での停止位置までの走行距離で除し、曲線を 1m 走行する際速度損失を算出し、曲線半径ごとに整理したものを図 14 に示す。

6.2 本章の考察

TYPE4 の EEF 台車 61.5 度リンクモデルと TYPE5 のセミアクティブ制御モデルを比較すると、セミアクティブ制御の走行抵抗低減性能が非常に優れていることがわかる。さらに TYPE6 のフィードバック制御と比較しても走行抵抗低減効果は遜色なく、セミアクティブ制御の有効性を示せた。

TYPE1 の通常輪軸台車と TYPE3 の EEF 台車 90 度リンクモデルを比較すると、図 13 より曲線全体で見ると EEF 台車 90 度リンクモデルの方がエネルギー損失は少ない結果となったが、緩和曲線部分では通常輪軸モデルの速度損失が少ない結果となっている。これは、通常輪軸は自己操舵性が強いいため、緩和曲線進入時の軌道追従性に優れていることが要因として考えられる。

TYPE3 の EEF 台車 90 度リンクモデルと TYPE4 の EEF 台車 61.5 度リンクモデルを比較すると曲線半径 20m、25m で定常状態での走行抵抗が低減できていることが確認でき、リンクアレンジの最適化を行うことで走行抵抗にも効果があることがわかった。しかし、曲線半径 10m や 15m、また 30m 以降ではあまり効果が見られなかった。これは、曲線半径 10m、15m では緩和曲線通過直後に停止してしまっているため、定常横圧を低減可能なリンクアレンジ最適化の効果を発揮する前に停止していることが原因と考えられる。また、曲線半径 30m 程度になると第 5 章の結果から 90 度リンクモデルの定常横圧も 10kN 以下となるため、走行抵抗に大きく関与してくる値ではないことが考えられる。

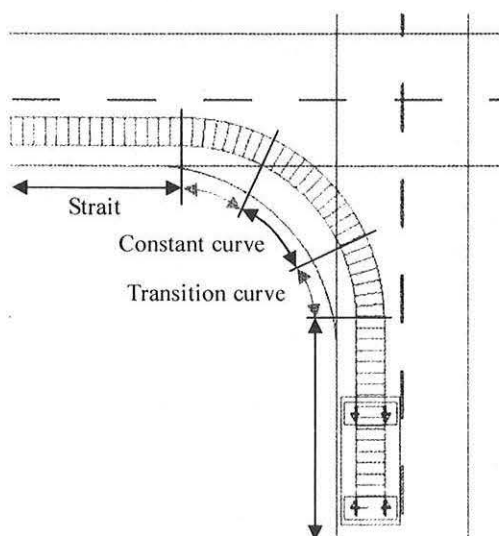


Fig.12 Simulation track

7. 結言

本報告では、先行研究にて提案された EEF 台車に対して、アタック角に基づくリンクアレンジの最適化、セミアクティブダンパを活用したセミアクティブ制御を行うことにより、以下の知見を得た。

- (1) セミアクティブ制御により、曲線進入時に発生する最大横圧を大幅に低減することが可能である。
- (2) リンクアレンジの最適化により、曲線通過中の定常的な横圧の低減が可能である。
- (3) セミアクティブ制御により、曲線通過時のエネルギー損失を低減することが可能である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 島森 義, 道辻 洋平, 福永 浩, 須田 義大, 林 世彬: 軌道曲率の学習による鉄道車両用独立回転車輪台車のアクティブ制御, 第 17 回交通物流・部門大会講演論文集, pp.127-130, 2008.
- 3) 道辻 洋平, 仁科 穰, 須田 義大: 操舵リンク系ジオメトリの非線形特性を考慮した鉄道用自己操舵性独立回転車輪台車の設計, 第 17 回交通物流・部門大会講演論文集, pp.81-82, 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.
- 5) 須田 義大, 藤岡 健彦, 井口 雅一: 鉄道車両の高速走行安定性と曲線通過性能, 日本機械学会論文集 (C 編), 52 巻 474 号, pp.738-745, 1986.

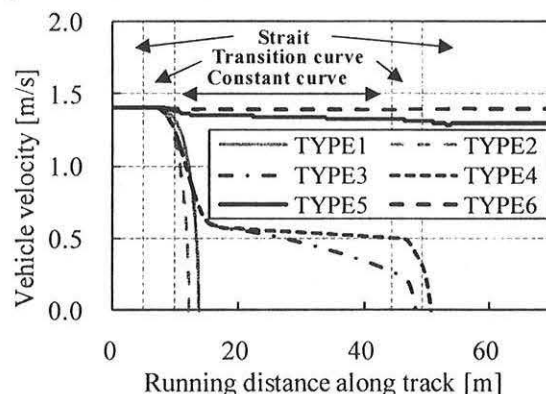


Fig.13 Vehicle velocity

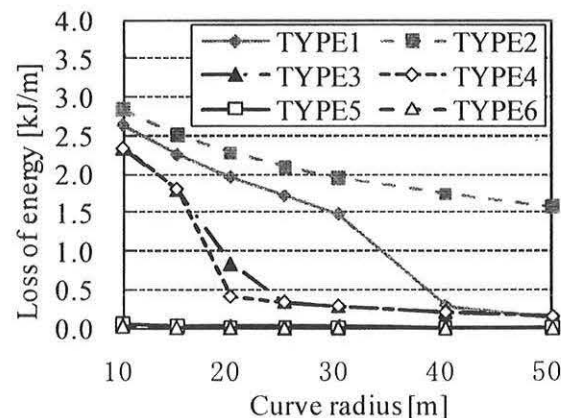


Fig.14 Loss of energy