

フランジトップ走行を考慮した併用軌道分岐器の分岐通過シミュレーションに関する研究

○関口 拓人 (東京理科大院) [機] 杉山 博之 (東京理科大) [機] 須田 義大 (東大)

加賀谷 博昭 [機] 江崎 秀明 (川崎重工)

Vehicle/Turnout Interactions of Tram Systems with Top-of-Flange Contact

○Takuto Sekiguchi, Hiroyuki Sugiyama (Tokyo University of Science), Yoshihiro Suda (University of Tokyo)
Hiroaki Kagaya, Hideaki Ezaki (Kawasaki Heavy Industries)

In this investigation, vehicle/turnout interactions of tram systems are discussed using multibody dynamics simulations with a focus on the specially-shaped turnout for tramway. In the tram turnout, special contact scenarios that include three-point contacts on tread, back-of-flange and top-of-flange of the wheel can occur. It is demonstrated that severe wheel/rail contact scenario encountered in vehicle/turnout interactions of tram systems can be predicted using the numerical procedure developed in this investigation.

キーワード：分岐通過，車両運動シミュレーション，車輪／レール接触，多点接触，併用軌道

Key Words : Turnout, Vehicle dynamics simulation, Wheel/rail contact, Multiple contact, Tramway

1. 緒言

図1に示すような併用軌道用特殊分岐器は，片側のレールのみにトングレールが配置されていることが特徴であり，内軌車輪がトングレールとフランジ背面接触することで輪軸がガイドされ，また，外軌車輪は同図中の斜線で示した部分でフランジトップ走行することにより，基本レールからリードレールに乗り移る．つまり，内軌車輪のフランジ背面と踏面で横圧を負担しながら，外軌車輪でフランジトップ走行するなどの状況が発生する．さらに，併用軌道分岐器の曲線半径は数十メートルと極めて小さいことが多く，車輪踏面，フランジ，フランジ背面およびフランジ先端での不連続な接触点移動および衝撃を伴う多点接触が発生することから，特殊分岐器でのライトレール車両の乗り上がりに対する安全性向上に向けた車輪／レール接触力

学からの検討が望まれる．しかしながら，特殊分岐器での車輪／レール接触問題については，その非線形性の取り扱いの困難さから，これまでその理論的検討がほとんどされてこなかった．そこで，本研究では，併用軌道分岐器の車両運動シミュレーション法を開発し，当該分岐器特有の車輪とレール間の多点接触問題について検討を行う．

2. 分岐レール形状の生成

分岐器のレール断面はその長手方向に形状が変化するため，接触解析に多くの断面形状データが必要となる．そこで，図2に示すように，図面または実測により得られた断面をレール長手方向に内挿することによって，任意位置におけるレール断面形状を生成する．そこで，既知断面に対

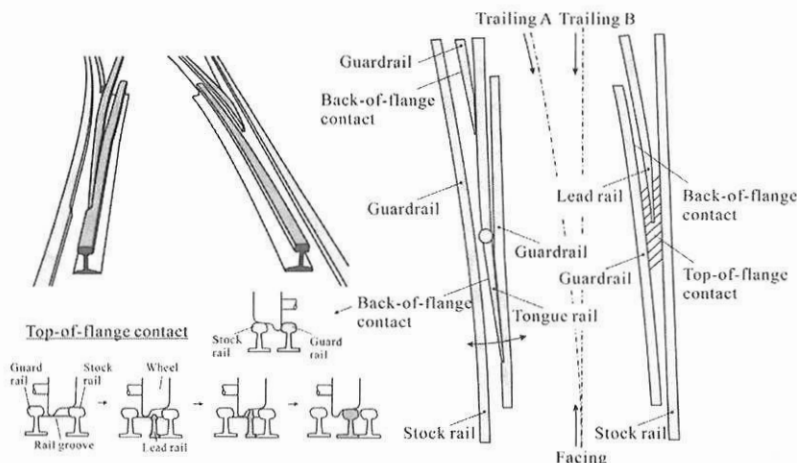


Fig. 1 Wheel/rail contact in tram turnout

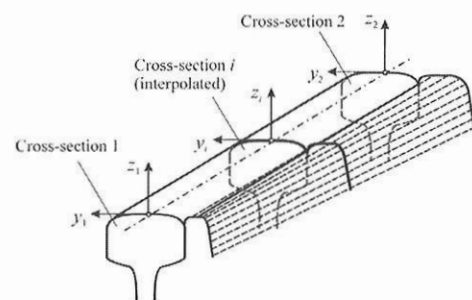


Fig. 2 Interpolation of rail profiles

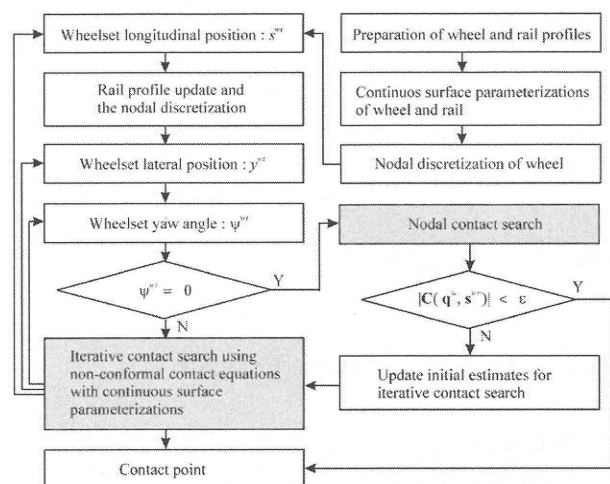


Fig. 3 Combined nodal and non-conformal contact search

して、3層のスージングスプライン処理を施し、高階の微分値においても変位と同じ3次のスプライン関数で記述されたレール形状の点列データを生成する⁽¹⁾。

次に、生成したレール形状データをレール長手方向に内挿することで、任意断面における形状データだけでなく、その微分データも同時に得ることができる。これにより、内挿によって生成された断面に対して再びスプライン処理を施す必要がなく、分岐器内の任意位置での形状データをシステムティックに生成することが可能となる⁽¹⁾。

3. 分岐接触幾何解析

3.1 ノンコンフォーマル接触条件

車輪とレールが接触している時、車輪とレールが接触点において位置を共有し、またその点における接平面が平行となる。これらの条件が満足された車輪およびレール曲面上の点において2物体が接触すると考える。以上から、ノンコンフォーマル接触条件式が次式のように与えられる。

$$C^{wrk}(q^w, s^{wrk}) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^{wk} - \mathbf{r}^{rk} \\ \mathbf{t}_1^{wk} \cdot \mathbf{n}^{rk} \\ \mathbf{t}_2^{wk} \cdot \mathbf{n}^{rk} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (1)$$

式(1)を用いたノンコンフォーマル接触解析法では、スプライン関数で記述された車輪とレール曲面間の接触探索を行うため、3次元の接触点移動を厳密に算出することが可能である一方、非線形代数方程式の収斂計算により接触点位置を求めているため、初期値近傍の解しか求まらず、分岐器での接触幾何解析が必要となる接触点位置の不連続な飛び移りを厳密に考慮することは難しく、分岐器における複雑な形状を有するレールと車輪間の接触問題に対しては、計算時間の増大や収束性の悪化を招くことがある。

3.2 ハイブリッド接触探索

そこで、ノンコンフォーマル接触探索法における解の収束性および安定性に関する問題を改善するため、ノンコンフォーマル接触探索法とノードの貫通条件から接触点位置を求めるノード接触探索法を組み合わせたハイブリッド接

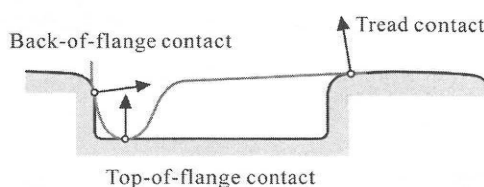


Fig. 4 Three-point contact

触探索法が著者らによって提案されている⁽²⁾。本手法では、接触点位置の飛び移りを含む接触点移動をノード探索法により求め、その値を初期値としてノンコンフォーマル接触探索法により解の修正を行う。それにより、接触点の不連続な飛び移りだけでなく、3次元連続曲面間のスムーズな接触点位置の変化も精度良く算出することができ、分岐器での3次元接触幾何解析に有効な手法である。つまり、ノード法をグローバル探索、ノンコンフォーマル法をローカル探索として組み合わせることにより、フランジ背面およびフランジトップでの接触を伴う併用軌道用分岐器における複雑な車輪とレール間の接触問題を効率的かつ精度良く解析できる。さらに、ノンコンフォーマル法を併用しているため、2点接触を含む3次元接触幾何解析にも適用可能である。本手法の概要を図3にまとめる。

4. 特殊分岐器通過解析法

図1に示すように、併用軌道の特殊分岐器においては、トンゲレールが片側のみであるため、その反対車輪は、レール溝とフランジ先端で接触することで基本レールからリードレールへの車輪の乗り移りが行われる。そのため、図4に示すように踏面、フランジ背面およびフランジ先端が3点で同時に接触することもありうる。しかしながら、既存の車両運動解析では一組の車輪とレールに対する踏面1点または踏面とフランジの2点接触テーブルを用いて接触点位置を算出することが一般的であるため、特殊分岐器通過の車両運動解析にそのまま応用することはできない。さらに、レール長手方向にレール形状が変化するため、輪軸の位置および姿勢に応じて、接触点位置の急激な飛び移りや多点接触判定を効率的かつ精度良く行う必要がある⁽³⁾。

そこで、本研究では図5に示すように、フランジ背面接触については、輪軸の左右変位およびアタック角に応じて、フランジ背面接触を含む多次元多点接触テーブルを読み込むことによって接触点位置を算出し、フランジトップ接触については、フランジ先端とレール溝間の上下方向距離から接触判定を行う。また、多点接触が発生した場合は、予め、軌道の長手方向に沿って生成した多次元の多点接触テーブルを内挿することにより、動力学解析中に踏面、フランジ、フランジ背面およびフランジトップの接触点ごとに接触点位置を求める。さらに、各接触点位置の法線接触力およびクリープ力を算出し、運動方程式の求解を行う。これを各時間ステップごと繰り返すことにより、多点接触を含む車両運動シミュレーシ

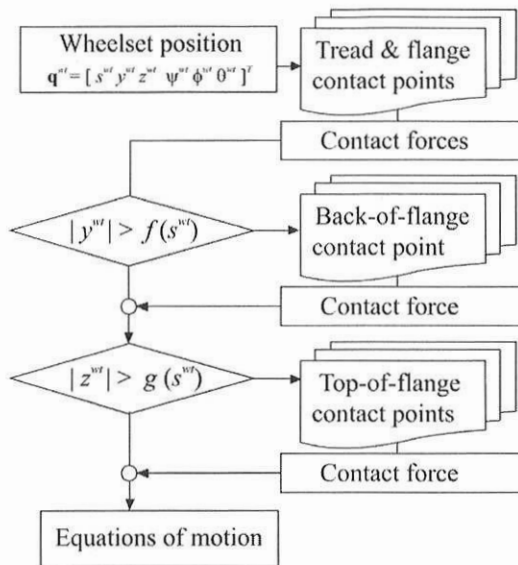


Fig. 5 Numerical procedure for multiple contacts

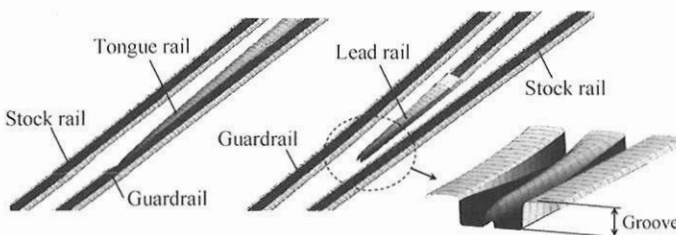


Fig. 7 Interpolated rail profiles of tram turnout

ョンを行う，図 6 にレールの形状生成から車両運動シミュレーションまでの概要をまとめる。

5. 数值計算結果

本研究で開発した併用軌道用特殊分岐器に対する分岐通過解析法を用いて、図1に示すような分岐器を台車が分岐線へ進入する対向のシミュレーションを行う。ここで、分岐線の曲線半径は30mとした。また、図7に形状内挿により生成したリードレールおよびトングレール形状を示す。

5.1 特殊分歧器通過解析結果

車両運動シミュレーションにより得られた前軸および後軸のアタック角を図8に示す。曲線半径が30mと極めて小さいため、前後軸で逆方向の大きなアタック角が発生していることが分かる。この時の前軸および後軸の車輪とレール間の接触状態の変化をそれぞれ図9および図10に示す。本図より、前軸は外軌側に変位するのに対し、後軸は内軌側に大きく変位していることが分かる。そのため、前軸で内軌車輪のフランジ背面接触が発生し、横圧をフランジ背面で負担しながら、外軌車輪で踏面とフランジトップの2点接触が発生する。その後、フランジトップ走行を介してリードレールへ乗り移る様子が確認できる。

一方、後軸では、前軸と異なり、内軌側へ変位するため、

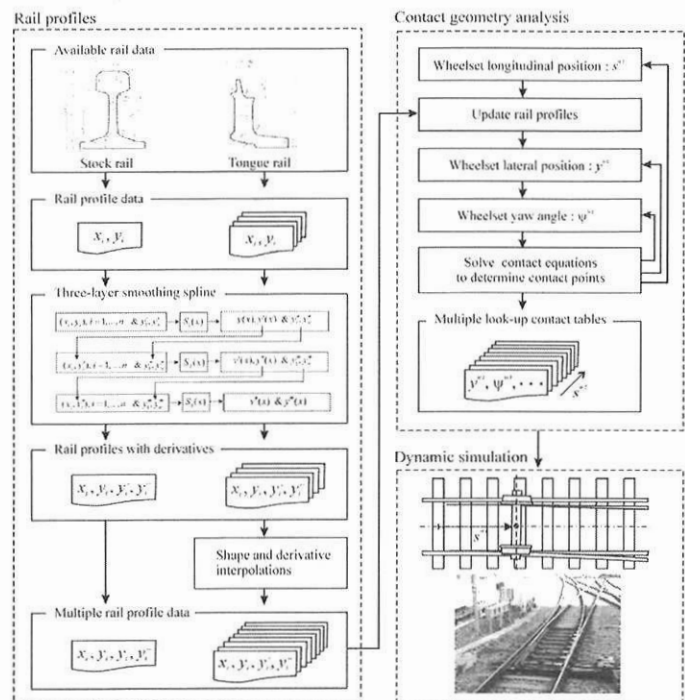


Fig. 6 Numerical procedure of vehicle/turnout interactions

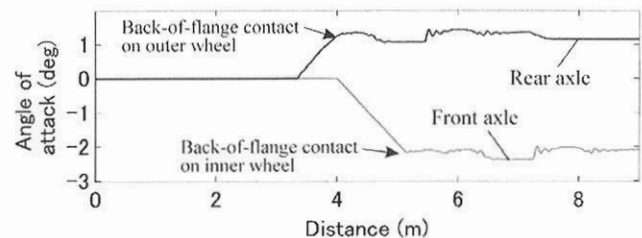


Fig. 8 Angle of attack (front and rear axles)

外軌車輪でガードレールとフランジ背面の接触が発生し、フランジ背面接触したまま、フランジ先端がレール溝と接触する。その後、フランジ背面、フランジトップおよび基本レールとの踏面接触を含む3点接触が発生し、最終的に、フランジ背面、フランジトップの2点接触状態を介してリードレールに乗り移る様子が確認できる。ここでも、フランジ背面、フランジトップ、リードレールとの踏面接触を含む3点接触が発生する。一方、内軌車輪はフランジ喉部で接触していることが分かる。その結果、前軸は内軌車輪のフランジ背面、後軸は外軌車輪のフランジ背面で横圧を負担しながらリード曲線を走行する。

5.2 走行試験結果との比較

次に、解析で実施したものと同じ特殊分岐器に対して、走行試験により得られた外軌車輪とレールの接触の様子を図 11 に示す。本図(a)に示す前軸は進行方向後方から、同図(b)に示す後軸では進行方向前方からの画像である。図 11(a)に示す前軸外軌車輪は、(1)において図 9 の(2)に示すように輪軸が曲線内に入っているにもかかわらずフランジ接触していないことから、シミュレーション結果同様、内軌車輪のフランジ背面でガイドされながら走行していることが分かる。また、図 11(a)の(2)から(3)で車輪が基本レールからリードレールへ乗り移っていることが分かる。その後、

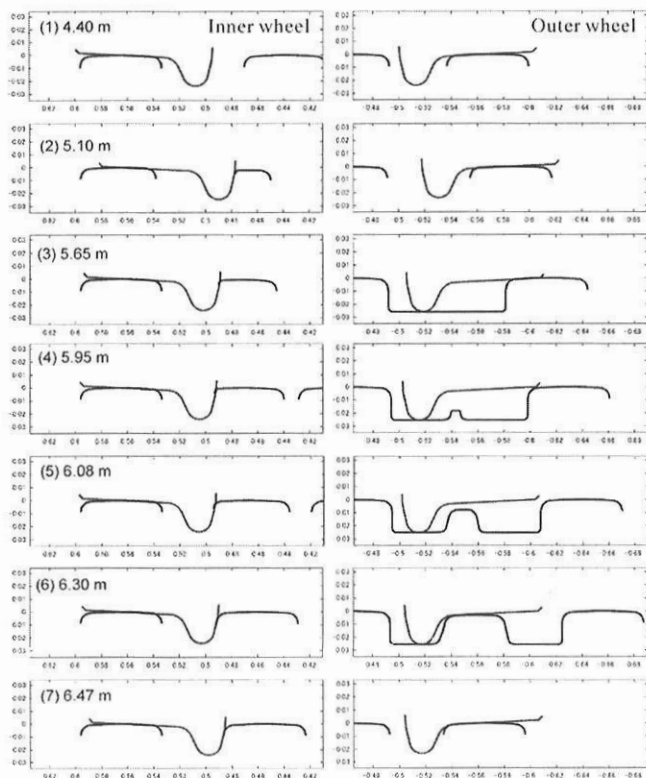


Fig. 9 Wheel/rail contact of the front axle

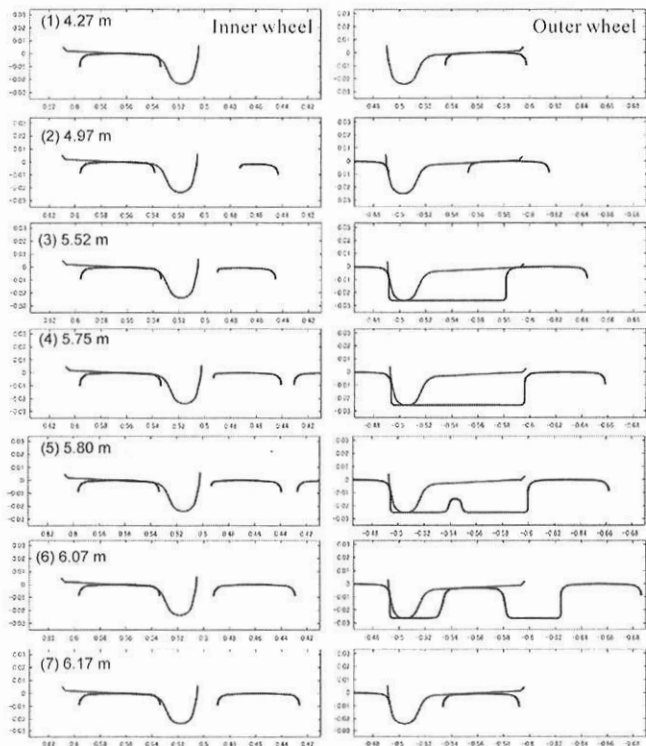


Fig. 10 Wheel/rail contact of the rear axle

(4)のリード曲線内では、図9の(7)に示すように外軌車輪はフランジ接触していないことから、内軌車輪のフランジ背面で横圧を負担しながら曲線を走行していることが分かる。

一方、図11(b)の(1)に示す後軸の外軌車輪は内軌側に変位し、フランジ背面接触が発生していることが分かる。こ

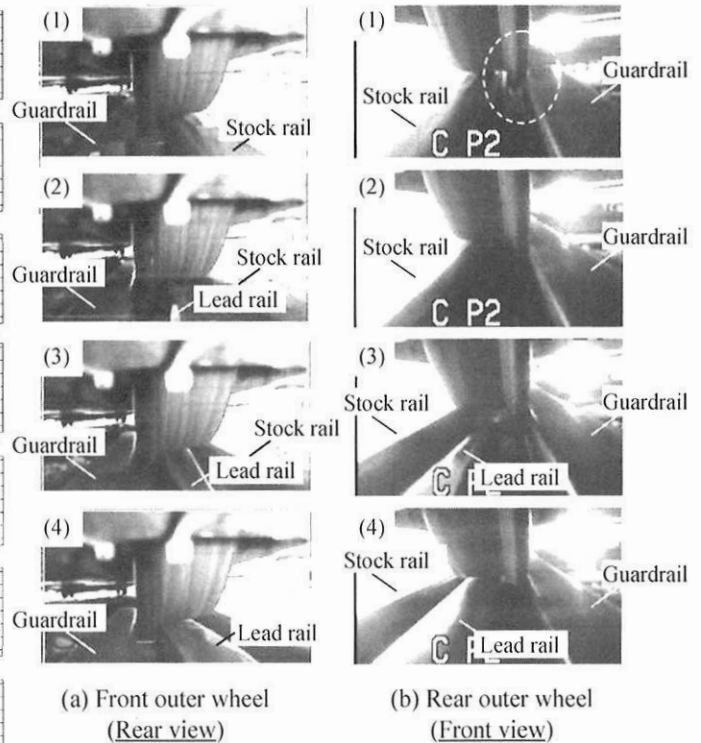


Fig. 11 Contact of outer wheels of the front and rear axles (experiment)

れは、シミュレーションより得られた図10の(2)と同じ状態である。その後、後軸外軌車輪はフランジ背面接触しながら、リードレールに車輪が乗り移っている。これは、シミュレーション結果である図10の(3)から(6)と同じ運動を示している。最終的に、図11(b)の(4)に示すリード曲線内では、図11の(7)に示すように後軸外軌車輪のフランジ背面で横圧を負担しながらリード曲線を走行している。これらの試験結果より、一連の特殊分岐器における車輪とレール間の接触状態の変化を、開発した車両運動解析法により忠実にモデル化できていることが分かる。

6. 結言

本研究では、併用軌道の特殊分岐器における車両運動シミュレーション法を構築し、当該分岐器特有の踏面、フランジ、フランジ背面およびフランジトップ接触を考慮した車輪とレール間の多点接触問題について検討を行った。また、走行試験結果との比較を行い、特殊分岐器における車輪とレール間の接触状態の変化が開発した手法によりモデル化できていることを示した。

参考文献

- 1) Sugiyama, H., Tani, Y. and Matsumura, R.: Analysis of Wheel/Rail Contact Geometry on Railroad Turnout Using Longitudinal Interpolation of Rail Profiles, *ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, vol.6, pp. 024501-1-5, 2011.
- 2) Sugiyama, H., Sekiguchi, T., Matsumura, R., Yamashita, S. and Suda, Y.: Wheel/Rail Contact Dynamics in Turnout Negotiations with Combined Nodal and Non-Conformal Contact Approach, *Multibody System Dynamics*, in press.
- 3) 松村, 杉山, 山下, 須田: 鉄道車両の分岐通過シミュレーションに関する研究, 鉄道技術シンポジウム講演論文集, 2010.