

鉄道車両の分岐通過シミュレーションに関する研究

松村 僚介 (東京理科大学) *

杉山 博之 (東京理科大学)

山下 隼平 (東京理科大学)

須田 義大 (東京大学)

Dynamic Simulation of Vehicle/Turnout Interactions

Ryosuke Matsumura*, Hiroyuki Sugiyama, Shunpei Yamashita, (Tokyo University of Science)

Yoshihiro Suda, (University of Tokyo)

In this investigation, a systematic and automated procedure that can be used for modeling vehicle/turnout interactions is developed. To this end, the contact geometry analysis procedure is generalized for turnout simulations such that tongue rail profiles available from measurement and/or drawing can be automatically interpolated and used for providing multiple look-up contact tables. Having obtained multiple look-up contact tables, the wheelset trajectory coordinate is used to locate the nearest look-up contact tables to be interpolated for determining the location of contact point at every time-step in the dynamic simulation. Several numerical examples are presented in order to demonstrate the use of the procedure developed in this investigation for vehicle/turnout interactions.

キーワード：鉄道車両のダイナミクス，分岐通過，車輪／レール接触，接触幾何
(Railroad vehicle dynamics, Turnout, Wheel/rail contact, Contact geometry)

1. 緒言

鉄道車両の分岐通過解析は，車両の脱線に対する安全性，乗心地評価の観点から極めて重要である。しかしながら，図 1 に示すように，分岐器ではレール形状が長手方向に変化するため，多点接触を伴う不連続な接触点移動が発生し，従来の曲線通過および安定性評価を目的とした車両運動解析法では厳密に解析を行うことができない⁽¹⁾。これまで，動解析中においてレール長手方向にレール形状を内挿することにより分岐器内のレール断面に対する車輪／レール接触を取り扱った研究⁽²⁾や，分岐器内での種々のレール断面に対する接触テーブルを予め容易し，それらを動解析中で切り換えることにより分岐通過時の接触点位置の変化をモデリングした研究などが報告されている⁽³⁾。動解析中で車輪，レール間の接触点位置を探索することは煩雑かつ計算コスト

が高く，接触テーブルを用いた解析法が一般的に用いられている。一方，接触テーブルは分岐器内の種々のレール断面に対して生成する必要がある，ポイント部やクロッシング部など，レールの形状変化が大きい箇所では精度の良い接触点および接触力を算出するために多くの接触テーブルを準備する必要がある。

そこで本研究では，分岐器内での任意断面に対する多次元接触テーブルを自動生成し，車両動解析中にそれらをレール長手方向に内挿することによりシステムティックに車両の分岐通過解析を可能とする分岐通過シミュレーション法を開発する。

2. 車輪／レール座標系

〈2・1〉 輪軸座標系 図 2 に示すように，絶対座標系から見た輪軸上の接触点位置を次のように表す。

$$\mathbf{r}^{wk} = \mathbf{R}^{wk} + \mathbf{A}^{wi} \mathbf{u}^{wk} \quad (1)$$

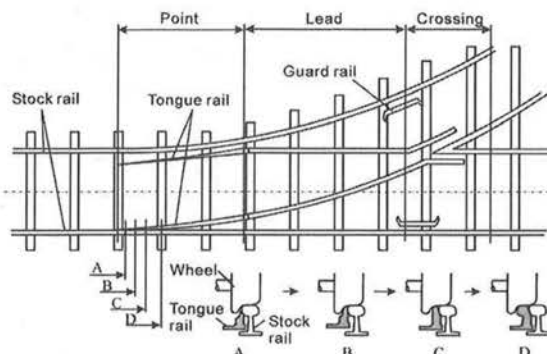


Figure 1. Wheel/rail contact in turnout section

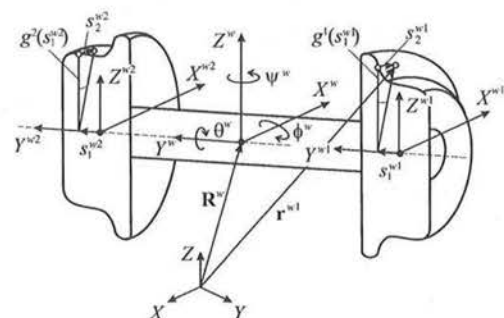


Figure 2. Wheelset coordinate systems

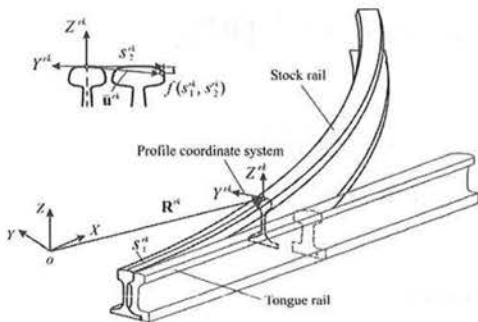


Figure 3. Rail coordinate system

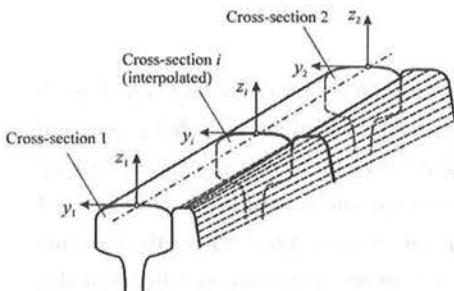


Figure 4. Interpolation of rail profile

ここで、 k は接触番号を表し、 $\mathbf{R}^w = [R_X^w \ R_Y^w \ R_Z^w]^T$ は絶対座標系から見た輪軸の重心位置を表す。 $\mathbf{A}^w$ は輪軸の姿勢行列を表し、輪軸のヨー、ロールおよびピッチ角に対してオイラー角 $\theta^w = [\psi^w \ \phi^w \ \theta^w]^T$ により表される。 $\mathbf{u}^{wk}$ は、輪軸座標系から見た左右車輪の接触点位置ベクトルである⁽³⁾。図 2 に示すように、左右各車輪のプロファイル座標系 $X^{wk}Y^{wk}Z^{wk}$ を定義し、その座標系から車輪形状を定義する。本プロファイル座標系から見た座標系 s_1^{wk} および s_2^{wk} を図 2 のように与え、その点における車輪半径を $g^k(s_1^{wk}, s_2^{wk})$ のように定義する。また、プロファイル座標系から見た車輪上の任意点の位置ベクトルが $\mathbf{u}^{wk}$ によって与えられるため、その点における車輪の左右方向、前後方向の接ベクトルおよび法線ベクトルは以下のように定義される。

$$\bar{\mathbf{t}}_1^{wk} = \frac{\partial \mathbf{u}^{wk}}{\partial s_1^{wk}}, \quad \bar{\mathbf{t}}_2^{wk} = \frac{\partial \mathbf{u}^{wk}}{\partial s_2^{wk}}, \quad \bar{\mathbf{n}}^{wk} = \bar{\mathbf{t}}_1^{wk} \times \bar{\mathbf{t}}_2^{wk} \quad (2)$$

〈2・2〉 レール座標系 図 3 に示すように、レール頭頂部にプロファイル座標系 $X^{rk}Y^{rk}Z^{rk}$ を定義することにより、左右レールの断面形状をこれらの座標系に関して定義する。レール上の接触点位置は、プロファイル座標系に対して定義されるレールの軸線に沿った座標 s_1^{rk} と、その点におけるレール断面の左右座標 s_2^{rk} によって与えられ、その点におけるレール形状が $f^k(s_1^{rk}, s_2^{rk})$ により与えられる。つまり、レール上の接触点位置は、レール軸線に沿った前後接触点位置 s_1^{rk} が与えられることにより断面形状が決定し、その断面内で左右接触点位置 s_2^{rk} が求まる。絶対座標系から見たレール上の接触点位置は、次のように定義される。

$$\mathbf{r}^{rk} = \mathbf{R}^{rk} + \mathbf{A}^{rk} \mathbf{u}^{rk} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{R}^{rk}$ は、絶対座標系から見たプロファイル座標系の原点位置を、 $\mathbf{A}^{rk}$ は、レールの姿勢行列を表し共に s_1^{rk} の関

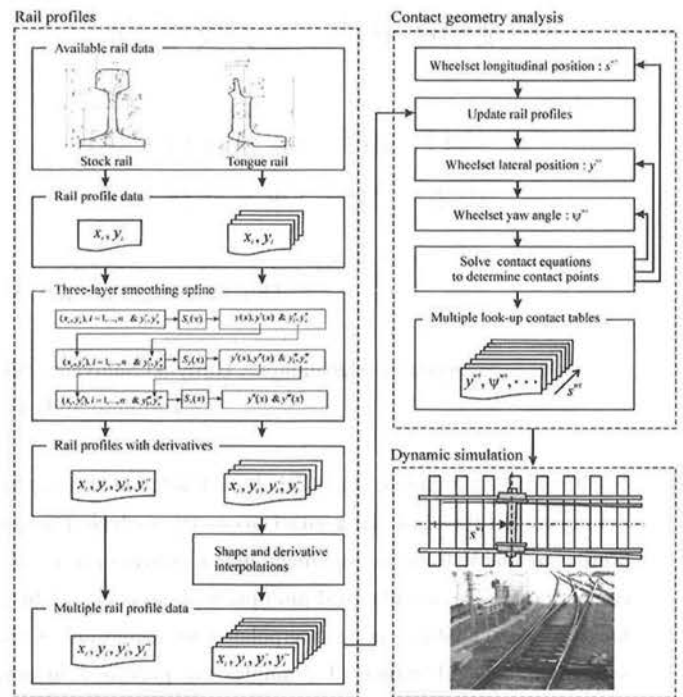


Figure 5. Proposed numerical procedure

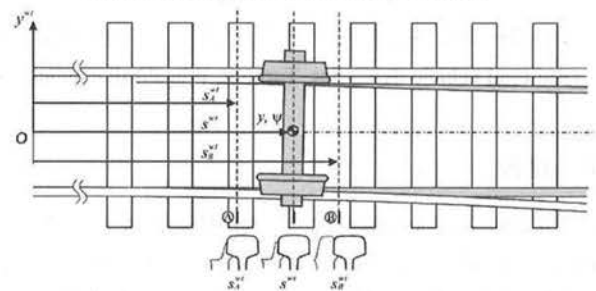


Figure 6. Contact search for vehicle/turnout

数として与えられる。また $\mathbf{u}^{rk}$ は、プロファイル座標系から見た接触点位置ベクトルを表す。さらに、式(2)と同様に、レール上の各接触点位置における前後方向、左右方向および法線ベクトルを求めることができる。

3. 接触幾何解析法

〈3・1〉 分岐形状データの生成 トングレールなどの分岐器内のレールは、図 1 に示すように長手方向に断面形状が変化するため、接触幾何解析を行う場合、非常に多くの断面形状データが必要となる。しかしながら、図面や実測データなどから得られるレール断面の数には限りがある。そこで、図 4 に示すように、既知断面からレール長手方向にレール断面形状を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⁽⁵⁾。

まず、図 5 の左側に示すように、図面や実測より得られる既知断面に対して、3 層のスム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 次スプラインで記述されたレール形状の点列データを生成する。これにより、接触幾何の収斂計算における収束性の向上および接触楕円の精度向上を図ることができる。次に、生成したレール形状データを、図 4 に示すように、レール長手方向に

内挿することで、任意断面 i 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内挿する。これにより、内挿によって生成された断面 i 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。

〈3・2〉 接触幾何解析 3・1 によって得られた形状および微分データを用いて接触幾何解析を行う。車輪とレールがある点で接触している時、その接触点位置において車輪とレールが位置および接平面を共有する(位置共有条件および接平面平行条件)ことから、これらの条件が満足された車輪/レール面上の点において 2 物体が接触していると考える。そして、図 5 右側に示すように、輪軸の左右およびヨー角を逐次更新した位置に対して、位置共有条件および接平面平行条件を満たした接触点位置を求め、接触テーブルを生成する。そして、これらの接触テーブルをレール長手方向に逐次生成していき、分岐器での多次元接触テーブルを作成する。

〈3・3〉 接触点探索 分岐通過解析を行う場合、レール形状が不連続に変化するため、輪軸の走行位置に応じたレール断面形状に対応する接触テーブルを用いる必要がある。そこで、図 6 に示すように、輪軸の軌道中心線に沿った前後位置を s^w とし、接触幾何により生成した接触テーブルが存在する s^w の前後にある位置を s_A^w および s_B^w とする。ここで、 $s_A^w < s^w < s_B^w$ とする。そして、動解析中に s_A^w および s_B^w にある既知接触テーブルを内挿することにより、輪軸の位置 s^w に応じた接触テーブルを動解析中で生成することができ、常に高精度な接触点位置情報を得ることができる⁽⁶⁾。そして、輪軸の位置に応じた、その前後の既知接触テーブルから内挿された接触テーブルを用いて、輪軸の左右およびヨー角変位を引数として、接触点位置、接触楕円の長径、短径などの接触に関する情報を得ることができる。本アルゴリズムを著者らが開発しているマルチボディダイナミクスに基づく車両運動解析コード⁽⁴⁾に実装した。

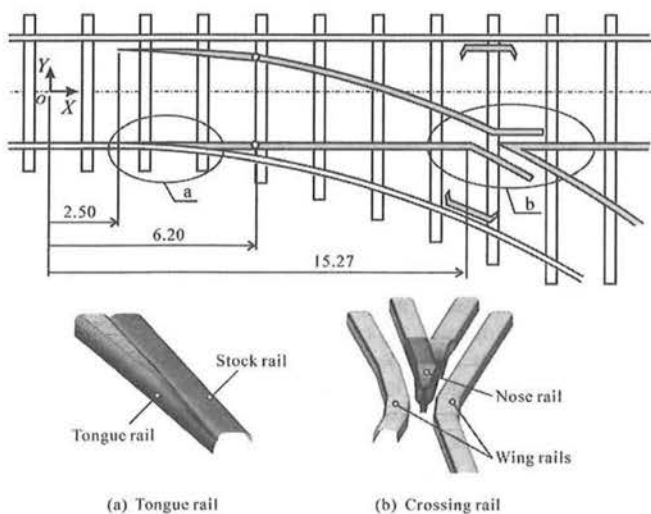


Figure 7. Track geometry for straight track scenario

4. 数値解析

〈4・1〉 基準線への分岐通過解析 本研究で開発した分岐通過シミュレーションによる数値解析結果を示す。本解析シナリオでは、図 7 に示すような右片開き分岐器を 2 軸台車が速度 2m/s で基準線方向に直進する。また、図 7(a)および(b)に、断面形状を長手方向に内挿することによって得られたポイント部およびクロッシング部の 3 次元レール形状を示す。本解析では、これらの断面形状を用いて、多次元接触テーブルを生成している。図 8 に前軸における左右変位およびアタック角を示し、図 9 に軌道中心から見た各レールの左右接触点位置の変化を示す。図 7 に示すように、右レールの基本レールは曲線レールであるため、図 9 に示すように、ポイント部において右車輪の接触点位置が、基本レールに沿って右側に移動していき、その後、トングレール上に飛び移ることが分かる。そのため、図 7 に示すように、分岐区間を直進しているにもかかわらず、接触点位置が飛び移るまで、前軸のアタック角は徐々に大きくなり、輪軸には左右変位が生じている。また、図 10 に示すポイント部における車輪とレールの接触状態から接触点位置が約

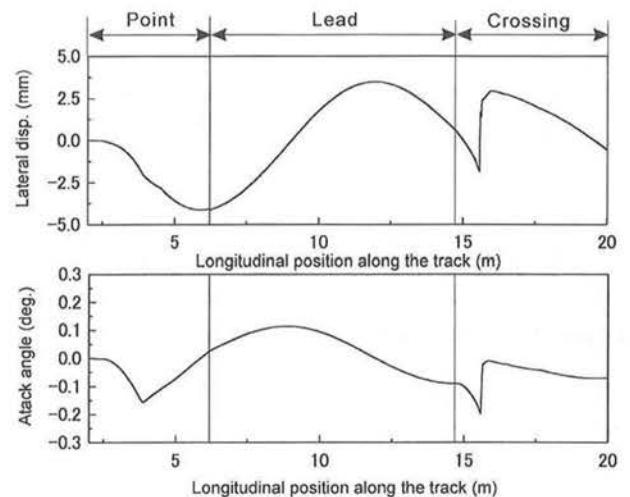


Figure 8. Wheelset lateral displacement and angle of attack

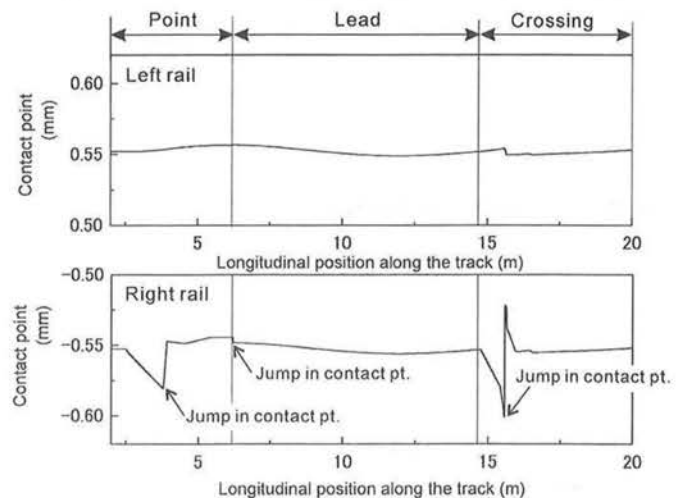


Figure 9. Lateral location of contact points

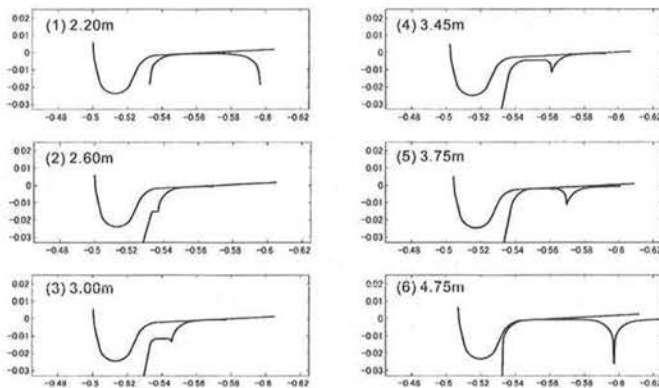


Figure 10. Wheel/rail contact in point section (main line)

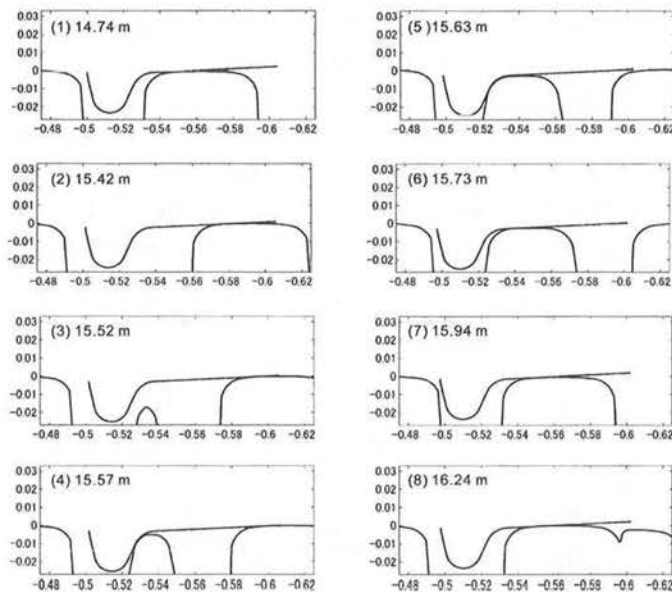


Figure 11. Wheel/rail contact in crossing section (main line)

3.75m 付近で飛び移ることが確認できる。さらに、図 9 から、70S のトングレールと 50N のリードレールの継ぎ目においてわずかな接触点位置の飛び移りが確認できる。図 9 のクロッシング部における接触点位置を見ると、右接触点位置は、まず、ウイングレールに沿って移動するが、その後、ノーズレールに接触点位置が飛び移っていることが確認できる。この時の車輪とレールの接触状態を図 11 に示す。本図から、まずフランジ喉部がノーズレール先端と接触し、その後、車輪踏面で接触しながらクロッシングを通過していく様子が確認できる。

〈4・2〉 分岐線への分岐通過解析 次に図 12 に示すような、左片開き分岐器を 2 軸台車が通過する場合の解析を行う。レールプロファイルと多次元接触テーブルは 4・1 における解析と同様のものを用いた。図 13 に車輪とレールの接触状態を示す。本図より、トングレール形状が次々刻々と変化し、曲線部で車輪フランジがトングレールコーナー部と接触しながら乗り移りが起きていることが確認できる。

5. 結言

本研究では、分岐器のレール形状変化に伴う接触点移動

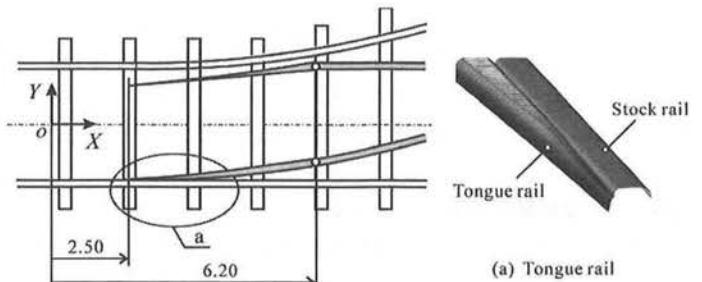


Figure 12. Track geometry

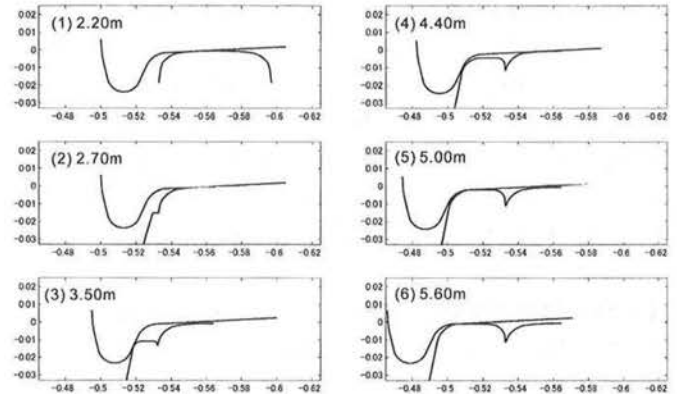


Figure 13. Wheel/rail contact in point section (branch line)

を効率的かつ厳密に考慮した分岐通過シミュレーション法を開発した。接触幾何解析において、既知のトングレール断面形状データおよびその微分値をレール長手方向に内挿することにより、任意位置における断面形状データおよび微分値を自動生成し、多次元接触テーブルを生成する方法を示した。さらに、動解析中に、輪軸の位置に応じて、該当する多次元接触テーブルを内挿し、分岐器内での車輪とレール間の接触点位置および接触情報を求める方法について示した。ポイント、リードおよびクロッシング部を考慮した片開き分岐器に対する動解析を実施し、提案手法の有効性を示した。今後、試験データとの比較により、解析手法の精度検証を行う。

参考文献

- (1) Shabana, A. A., Zaazaa, K. E. and Sugiyama, H., *Railroad Vehicle Dynamics: Computational Approach*, CRC Press, (2007).
- (2) Schupp, G., Weidemann, C. and Mauer, L., Modelling the Contact between Wheel and Rail within Multibody System Simulation, *Vehicle System Dynamics*, Vol.41, pp. 349-364, (2004).
- (3) Kono, H., Suda, Y., Yamaguchi, M., Yamashita, H., Yanobu, Y. and Tsuda, K., Dynamic Analysis of the Vehicle Running on Turnout at High Speed Considering Longitudinal Variation of Rail Profiles, *Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering Conference*, United States, (2005).
- (4) Sugiyama, H. and Suda, Y., On the Contact Search Algorithms for Wheel/Rail Contact Problems, *ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 4, pp. 041001-1-8, (2009).
- (5) Sugiyama, H., Tanii, 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).
- (6) Sugiyama, H., Matsumura, R., Yamashita, S. and Suda, Y., Wheel/Rail Contact Dynamics of Turnout Negotiations in the Analysis of Multibody Railroad Vehicle Systems, *Proceedings of Joint International Conference on Multibody System Dynamics 2010 (IMSD2010)*, Finland, (2010).