平成 16 年 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'04)

S8-1-6.

曲線通過状況の車体運動模擬を目標としたシミュレータ動作方式に関する定量的考察

[機]○平沢 隆之(東大生研) [機]林 哲也(JR東海)

[機] 須田 義大(東大国際・産学) 金保 忠正(東大院)

Numerical Analysis on Simulator Motion Algorithm for Cabin Motion Simulation at Curves HIRASAWA Takayuki (Institute of Industrial Science, the University of Tokyo) HAYASHI Tetsuya (Central Japan Railway) SUDA Yoshihiro (Institute of Industrial Science, the University of Tokyo) KANEYASU TADAMASA (Graduate School, the University of Tokyo)

Motion methodologies of moving-base simulator for curving situations of railway vehicles are examined through numerical simulations. Perfect motion representation is found to need wash-back strategies to cease large lateral movement. Cabin inverse inclination to save actuator strokes is found to have limits in representing particularly at transition curve situations. Blending movement between cabin inverse inclination and lateral moving base is found to be feasible in having potential to reduce passengers' sense of incongruity as long as the inclination is below threshold to rotational motion.

キーワード:鉄道車両、乗り心地、シミュレータ、曲線通過、緩和曲線、加速度 Keywords: Railway Vehicle, Ride Comfort, Simulator, Curving Situation, Transition Curve, Acceleration

1. はじめに

バーチャルリアリティ技術の向上を背景に、鉄道車両の 乗り心地研究目的でも視聴覚情報の呈示機能とモーション 発生装置を備えた高機能型のモーションシミュレータを適 用する検討が、近年数多く報告されている¹¹²¹³⁴⁰⁵。しかし、 アクチュエータストロークの限られたシミュレータでの忠 実な現象再現には本質的に多くの制約がある(図 1)。要求 模擬性能は対象とする乗り物によっても異なり、限られた 装置性能の範囲内でリアリティの高い模擬を行うため、 個々の模擬装置とシミュレータ総体それぞれの調整がつね に大きな課題となる。

鉄道に関しては、著者らによる一連の研究である、開眼 状態で各種姿勢の被験者に対する低周波ロール運動感覚閾 値の計測®と、それに基づくオフラインのシミュレータ波形 調整フィルタ導入の提案ⁿ、新幹線走行車内における乗客ア イマーク計測に基づく視野模擬方法の提案[®]、を除いては人 間工学的観点からのシミュレータ調整の検討がとくに報告 されていない。

本研究では、現車左右方向加速度の忠実再現を目標に定 めた場合のシミュレータ動作方法に関して、計算による基 礎的な定量的考察を与える。緩和曲線から円曲線を通って 緩和曲線に至る経路を定速走行する状況の、新幹線に代表 される高速鉄道の車体走行シミュレーションを行う。回転 中心位置の補正と遠心力・カント勾配を考慮して、現車と 代表的な3通りのシミュレータ動作方式における車体運動 を定式化する。キャビン傾斜と左右方向並動装置の動作プ レンディングと、着目点の再現目標点からの距離によるシ ミュレータ各方向成分の運動模擬再現性の差異を計算で視 覚的に示し、現車に代替する実験環境としてモーションシ ミュレータを活用する上での検討項目を定量的に整理する。



(a) General hexapod simulator Fig. 1 Hexapod

pod (b)Simulator with Large moving base Hexapod simulator



Fig. 2 Coordinates of running vehicle at curve with cant

2. 車内の体感加速度の定式化

カントの付いた曲線(入口緩和曲線-定常円曲線-出口 緩和曲線)を定速で走行する鉄道車両キャビンの重心位置 (床面位置に近似できると仮定する)および乗客頭部位置 での運動は、軌間中心に原点を定めた座標系(図1、表1・

平成 16 年 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'04)

2) で以下の通り表せる。簡単のため、ばね・ダンパの要素は無視し、左右・上下・ロール方向の運動のみを考え、計算に用いた緒元の値は、現実の値を参考に高速鉄道を想定して設定した。

Table 1 Description of vehicle cabin motion

軌道面に対する車体重心位置	$y_{\text{rbody}} \cdot z_{\text{rbody}} \cdot \phi_{\text{rbody}} (=0)$
軌道面に対する乗客頭部位置	$y_{ m rhead}$ • $z_{ m rhead}$ • ϕ rhead
軌道面から計測した軌道不整	$y_{ m shape}$ • $z_{ m shape}$ • $ heta$ shape
カント傾斜による座標原点シフト	量 y _{shift} · z _{shift} · θ shift

Table 2 Parameters for Simulation of Running Vehicle

変数	記号	数值[単位]
車輪接触点間隔	G	1.5 [m]
走行速度	V	75[m/s]
床面高さ	H	1.3 [m]
緩和曲線長	L_t	600 [m]
曲線半径	R_0	3000 [m]
定常円曲線長	Lc	300 [m]
カント	C_0	200 [mm]

$$y_{rbody} = y_{shape} - H \cdot \sin(\phi_{rbody} + \theta_{shift})$$
(1)

$$z_{rbody} = z_{shape} + z_{shift} \tag{2}$$

$$\phi_{rbody} = \theta_{shape} \tag{3}$$

where

$$\theta_{shift} = \arctan(\frac{C(t)}{G}) \tag{4}$$

$$z_{shift} = \begin{cases} -\frac{1}{2} \cdot C(t) & (外軌上げ) \\ 0 & (外軌上げ・内軌下げ) \end{cases}$$
(5)

時刻 tにおけるカント C(t)と曲率半径 R(t)は、緩和曲線の 具体的形状に応じて求められる。一般的なサイン逓減曲線 の場合、入口緩和曲線内ではこれらは下記で表される。

$$C(t) = C_0 \cdot \left\{ \sin(\frac{V \cdot t}{L_t} - \frac{1}{2})\pi + 1 \right\} / 2$$

$$\frac{1}{R(t)} = \left\{ \sin(\frac{V \cdot t}{L_t} - \frac{1}{2})\pi + 1 \right\} / 2R_0$$
(7)

よって、慣性力と重力も加えて曲線通過時に車体重心位 置に作用する加速度は、方向別に下記で表される。ただし、 議論の厳密さより物理現象理解の容易さを優先して、微小 項を考慮しない線形近似の表現とした。

$$\ddot{y}_{tbody} = -\ddot{y}_{shape} + H \cdot \frac{d^2}{dt^2} (\sin(\phi_{teody} + \theta_{shgt})) + \frac{V^2}{R(t)} \cdot \cos(\phi_{teody} + \theta_{shgt}) - g \cdot \sin(\phi_{teody} + \theta_{shgt})$$
(8)

$$\ddot{z}_{rbody} = -\ddot{z}_{shape} - \ddot{z}_{shift} + \frac{V^2}{R(t)} \cdot \sin(\phi_{rbody} + \theta_{shift}) + g \cdot \cos(\phi_{rbody} + \theta_{shift})$$
(9)

$$\ddot{\theta}_{rbody} = -\ddot{\theta}_{shape} \tag{10}$$

同様に、床面から hp離れた乗客頭部に作用する加速度は、

$$\ddot{y}_{rhead} = \ddot{y}_{rbady} + hp \cdot \frac{d^2}{dt^2} (\sin(\phi_{rbady} + \theta_{shift}))$$
(11)

$$\ddot{z}_{rhead} = \ddot{z}_{rbody}$$
 (12)

$$\ddot{\phi}_{rhead} = \ddot{\phi}_{rbody}$$
 (13)

外軌上げ・内軌下げカント方式の車体重心位置における 左右・上下方向加速度を計算すると、カントの付与で遠心 力由来の左右加速度が逓減され、逆に上下方向加速度が大 きくなる様子が確認できる(図 3)。緩和曲線と円曲線の間 の不連続性は緩和曲線形状に起因する。現車では各種の減 衰要素で、体感されないレベルに鈍らされると考えられる。



Fig. 3 Simulated cabin motion of High Speed Railroad



Fig. 4 Coordinates of simulator with hexapod on large displacement moving base

3. シミュレータによる加速度の模擬とその課題

3.1 シミュレータの加速度模擬方式 高周波帯域の各方

- 88 -

平成 16 年 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'04)

向運動を模擬する 6 軸モーション装置を、低周波帯域の左 右方向運動を模擬する並動装置に乗せた大型シミュレータ (図 4、表 3)のキャビン運動を定式化する。双方の機能を フル活用した場合が忠実再現であるが、実際にはモーショ ン装置の制約によりその一部を利用することになる。

Table 3 Description of simulator cabin motion

キャビン床面位置 (床面原点・床面方向)	$y_{dsfloor} \cdot z_{dsfloor} \cdot \theta_{dsfloor}$	
キャビン任意位置 (床面原点・床面方向、高さ <i>hp</i>)	Ydshead * Zdshead * $ heta$ dshead	
並動装置動作による左右変位 (地上原点・床面方向)	Ybaselil (i=2,3)	
6 軸モーション装置動作による変位 (床面原点・床面方向)	Yhexlil * Zhexlil * $ heta$ hexlil	
キャビン床面位置のキャビン方向成分 (床面原点・床面方向)	Ydsfloorcabin[i] * $ heta$ dsfloorcabin[i] * $ heta$ dsfloorcabin[i]	
キャビン任意位置のキャビン方向成分 (床面原点・床面方向、高さ <i>hp</i>)	Ydsheadcabinlil * Zdsheadcabinlil * $ heta$ dsheadcabinlil	
高周波成分として模擬するキャビン 床面位置のキャビン方向成分	Ydsfloorcabin(high[i]) * Zdsfloorcabin(high[i])	
中周波成分として模擬するキャビン 床面位置のキャビン方向成分	Ydsfloorcabin(middle2)	
低周波成分として模擬するキャビン 床面位置のキャビン方向成分	Ydsfloorcabin(low[i]) * Zdsfloorcabin(low[i])	
低周波成分として模擬するキャビン任意 位置のキャビン方向成分(高さ hp)	Ydsheadcabin(low[i]) * Zdsheadcabin(low[i])	

(*i*=1:キャビン傾斜方式、2:並動傾斜併用方式、 3:並動装置を主体とする方式)

キャビン傾斜方式とは低周波成分をキャビン傾斜で表す 並動装置のない場合、並動傾斜併用方式とはキャビン傾斜 で模擬する低周波成分をロール方向運動感覚閾値以下のも のだけに抑えて残りを並動装置で模擬する場合、並動装置 を主体とする方式とは低周波成分をすべて並動装置で模擬 する場合、とする。3通りの模擬方式に共通するモーション 模擬目標は、床面位置で現車の車体水平方向加速度成分を 模擬するようにシミュレータのキャビン水平方向加速度成 分を調整することである(次式)。

$$\ddot{y}_{dsfloorcabin} = \ddot{y}_{dsfloor} \cdot \cos(-\theta_{dsfloor}) + \ddot{z}_{dsfloor} \cdot \sin(-\theta_{dsloor})$$
(14)

3.2 加速度模擬各方式の課題 一般にシミュレータでは、 加速度模擬に必要なモーション装置アクチュエータ・スト ロークが不足するため、運動の忠実な再現が困難である。 そこで、定常状況(円曲線通過部分)については、キャビ ンの傾斜による重力加速度分力で持続加速度(低周波加速 度)を近似的に模擬する。この場合、絶対左右方向の加速 度を合わせられないので、現実的な代替案として、キャビ ン水平方向加速度成分を現車とシミュレータで合わせるこ とを目標に設定する。また、本検討のように過渡状況(緩 和曲線通過部分)の忠実な模擬も検討項目に加える場合、 キャビンの傾斜単独では体感上の違和感が大きいので、並 動装置を併用したモーション装置の動作ブレンディング方 法の検討が欠かせない。

なお、現車とシミュレータで座標原点(シミュレータで は一般に回転中心位置と呼称される)の相違に関する補正 も、車体床面測定加速度の再現に際しては必要である。

4. 計算によるシミュレータ動作方式の比較

A. 並動装置を主体とする再現方式 走行模擬状況によっ ては体感加速度をより忠実に再現できるが、本検討条件で は並動装置移動距離が大きくなり現実的な対応が必要とな る(図 5)。さらに、装置の一方向運動を止めるために反対 向きのカーブを走行する状況を組み合わせるか閾値以下で の中立位置への復帰させる(ウォッシュバック)などの工 夫も必要である。



Fig. 5 Simulator cabin lateral displacement at high-fidelity movement

$$\theta_{hex3} = \theta_{shift} \tag{21}$$

 $\ddot{y}_{dsheadabin3} = -\ddot{y}_{base3} \cdot \cos\theta_{hex3} - g \cdot \sin\theta_{hex3} + hp \cdot \ddot{\theta}_{hex3}$ (22)

 $\ddot{z}_{dsheadabin3} = \ddot{z}_{dsfloorcabin(high3)} + g \cdot \cos\theta_{hex3} - \ddot{y}_{base3} \cdot \sin\theta_{hex3} - hp \cdot \dot{\theta}_{hex3}^{2}$ (23)

B. キャビン傾斜方式 周波数成分で分離する一段のウォ ッシュアウトフィルタを通して、キャビンの傾斜として模 擬すべき現車重心位置のキャビン水平方向低周波加速度は、

$$\ddot{y}_{dsfloorcabin(low1)} = -g \cdot \sin \theta_{hex1} \tag{15}$$

となる。キャビン上方に hp の位置のシミュレータキャビン で模擬される低周波成分は、

$$\ddot{y}_{dsheadcabin(low1)} = \ddot{y}_{dsfloorcabin(low1)} + hp \cdot \theta_{hex1}$$
(16)

$$\ddot{z}_{dsheadcabin(low])} = \ddot{z}_{dsfloorcabin(low])} - hp \cdot \dot{\theta}_{hex1}^{2}$$
(17)

着座する乗客の頭部位置(たとえば hp=1.2 とする)のキャビン左右・上下方向成分とも、キャビン傾斜の結果、距離 Hの位置の場合(hp=0)に比べてわずかに減る(図 6)。 とくに、上下方向成分については遠心力が模擬できないため、現車の現象とは反対に曲線部で値が減少し、左右加速度との合成加速度も減少する。よって、計算条件では、並動装置を併用して違和感を軽減する必要性が示唆される。

- 89 --



(b)Vertical acceleration Fig. 6 Simulator Cabin motion at inverse inclination (Ti=1.0[s], hp=0.6[m])

C. 並動傾斜併用方式 模擬すべき低周波成分をキャビ ン傾斜と並動装置で分担させる方法を検討する。ロール角 速度が θ_µ以下の成分をキャビンの傾斜で模擬するために、 閾値フィルタ^ηを導入する。閾値フィルタの実装方式は多種 考えられるが、物理的な理解を優先し、前節で低周波にフ ィルタされた波形をさらに周波数成分でフィルタする 2 段 ウォッシュアウトフィルタ(図 7)の 2 段目として検討する。



Fig. 7 One way of two-step wave filter considering threshold to rolling motion

閾値フィルタで高周波側にフィルタされた中周波成分 をキャビン傾斜、低周波側にフィルタされた極低周波成分 を並動装置、でそれぞれ表現する。

 $\ddot{y}_{dsfloorabin(middle2)} = -g \cdot \sin \theta_{hex2} \tag{18}$

where

 $\left|\dot{\theta}_{hex2}(t)\right| \le \dot{\theta}_{th} \tag{19}$

$$\ddot{y}_{dsfloorcabin(low2)} = -\ddot{y}_{base} \cos\theta_{hex2}$$
(20)

ウォッシュアウト時定数 72 を大きく取れば、並動装置の 必要ストロークが減らせるが、キャビン傾斜の分担が増し てロール方向運動感覚閾値に達するので、あまり大きな値 に設定できない、というトレードオフが確認できる(図8)。



Fig. 8 Simulator Cabin lateral motion at blending movement $(T_i=1.0[s])$

5. 考察

平成 16 年 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'04)

前章のシミュレーション結果を比較すると、各動作方式 の特徴が以下の通りまとめられる。

- 遠心加速度を並動装置を使用して再現する場合、原理的には忠実な体感加速度の再現が可能だが、走行条件によっては巨大な装置スペックが必要である。
- キャビン傾斜のみで低周波加速度を模擬する場合、緩和 曲線通過時の過渡特性表現に課題があり、並動装置を併 用することで改善される。
- キャビン傾斜と並動装置を併用する場合、それぞれの単 独利用の得失を補完できるため、現実的な装置運用とし て優れた方式と考えられる。

6. まとめ

高速鉄道の乗り心地評価などを目的とする、曲線通過状況の体感加速度を模擬するシミュレータについて、カントや遠心力による加速度、車両動揺による加速度を再現する動作方法を検討し、現車運動波形の再現装置としてのシミュレータ使用方法に関する定量的な指針を得た。6軸モーション装置によるキャビン傾斜と並動装置を併用することにより、優れた体感模擬が実現できることを具体的に示した。

シミュレーション検討にご助言いただいた、須田研究室 の道辻洋平氏(現東京農工大)に御礼申し上げます。 参考文献

- 1) 平沢ほか、Translog2001、383-386.
- 2) 平沢ほか、JRAIL2002、129-132.
- 3) Kufer and Förstber, WCRR2001 (CD-ROM) 200-210.
- 4) 鈴木、RRR、2002-10、32-35.
- 5) 林ほか、機械 2003 年次講演、213-214.
- 6) 林ほか、JRAIL2002、619-622.
- 7) 平沢ほか、D&D2003、(CD-ROM) 142.
- 8) 平沢ほか、機械 2002 年次講演、178-179.