



在来線の加減速の乗り心地を評価するためのシミュレーターの開発 — 実車両の挙動分析と停車時の評価 —

Development of a simulator to evaluate the ride quality of acceleration / deceleration of conventional lines
-Analysis of actual vehicle behavior and to evaluate the ride quality of acceleration / deceleration of conventional lines-

江島寛人¹⁾, 高橋秀智²⁾

Hiroto ESHIMA and Hidetomo TAKAHASHI

1) 東京工科大学 工学研究科 サステイナブル工学専攻

2) 東京工科大学 工学部 機械工学科 (〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1, takahashihdtm@stf.teu.ac.jp)

概要: 現在の鉄道は最も身近で重要な交通手段の 1 つになっている。車両の乗り心地は主に定常走行について基準が設定されている。しかし在来線の乗り心地では加減速時が重要である。本研究では物理的挙動を実現でき、かつ最小構成で乗車感覚を実現できるシミュレーターの開発を目的として、実車両の挙動分析とモーションベースを用いた人の感覚の評価を行った。その結果から実際に開発していくシミュレーターの仕様を決定する。

キーワード: シミュレーター, 鉄道, 乗り心地

1. 研究背景

現在鉄道は最も身近で重要な交通手段の 1 つになっている。その中で車両の乗り心地は、世界各国で評価基準[1]が設定されている。しかし、これらの指標は、主に定常走行時についてである。1日あたりの利用者数が多い在来線の発車時と停車時は、挙動変化が大きいため、乗客への物理的・心理的な負荷が大きい。さらに、今後車両の自動運転化や乗客のさらなる高齢化への配慮も必要となる。そのため、鉄道車両の乗り心地の評価を手軽に行えるシミュレーターが必要になると考える。

2. 目的

本研究では物理的挙動を実現でき、かつ最小構成で乗車感覚を実現できるシミュレーターの開発を目的とし、実車両の挙動分析汎用性モーションベースを用いて人の加速度の感覚評価を行いシミュレーターの仕様を決定していく。

3. 関連研究

乗り心地の研究として鈴木は鉄道車両の乗り心地を評価するため、実際の車両で乗車試験を行い乗り心地の振動の要因について研究[2]した。また坂本らは実車両を利用した物理シミュレーターを開発し新幹線の乗り心地の評価[3]を行った。一方、三浦らは仮想現実技術を用いて視

覚と聴覚による乗車感を実現する手法の研究[4]について行った。上記 2 つの研究は大規模であるため容易に実現することができず、また三浦らの研究は実際の乗車感覚との比較ができていない。また濱らは電車の最適な停車の基準について研究[5]を行った。

4. 実車両データ

4.1 測定区間の選定

今回測定した路線は利用者数の多さと駅間の距離が短く発車・停車が繰り返される山手線を選択した。平坦で直線区間である秋葉原駅、ホーム進入時角度変化が大きい大崎駅、高低差がある鶯谷駅で計測を行った。時間帯は通勤通学の時間を避け計測を行った。測定に利用したセンサーは 3 軸の角度、角速度、加速度、方位を測定することができる WitMotion WT901C[6]と 3 軸の加速度計で校正書付き G-MEN GL01[7]を用いてデータの校正を行った。以下の表にセンサーの仕様を示す。

表 1 Wit MotionWT901C の仕様

項目	仕様	
可動範囲	加速度	±16G
	ジャイロスコープ	±2000deg/s
	角度	x,z軸±180deg,y軸±90deg
サンプリング	200Hz	



表 2 G-MEN GL01 の仕様

項目	仕様
加速度センサ	静的加速度:1G(±10%)
応答周波数	0~100[Hz]
最小サンプリング周期	1msec
測定分解能	0.01G

4.2 実車両の測定結果

図 1 は秋葉原駅の測定例である。Wit Motion のデータを G-MEN を用いて補正した。45 秒の時に秋葉原駅に到着し 85 秒で発車していることがグラフからわかる。停車動作に入る 22 秒の時に最大加速度が生じ、90 秒あたりで最小加速度が生じていることがわかる。表 2 は測定した 3 駅の最大最小の加速度、ロール角、ピッチ角を示している。

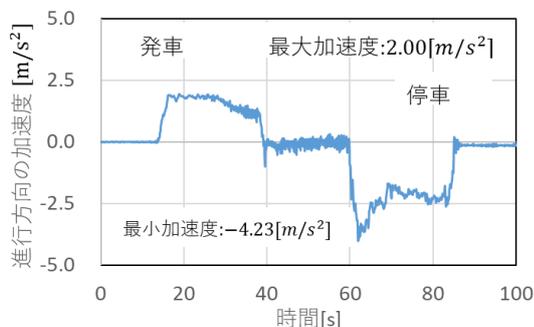


図 1 神田駅から秋葉原駅の進行方向の加速度の変化

表 3 測定値の最大と最小

		神田駅 秋葉原駅間	五反田駅 大崎駅間	上野駅 鶯谷駅間
進行方向の加速度 [m/s ²]	最大	2.00	2.03	2.09
	最小	-4.23	-3.99	-4.69
車体のロール角[deg]	最大	3.13	4.63	1.62
	最小	-2.79	-2.09	-1.57
車体のピッチ角[deg]	最大	6.40	6.60	6.51
	最小	-4.63	-4.74	-4.55

5. 人間の感覚特性の検証

開発するシミュレーターの仕様を決めるにあたって人間の並進加速度、角加速度の刺激に関する感覚特性の検証を 6 軸モーションプラットフォームで行った。被験者は 20 代男女 16 名である。

5.1 モーションベースについて

人間の感覚特性の検証を行うにあたって株式会社コスメイトの 6 軸モーションベース MB-200[6]を使用した。表 3 にはモーションベースの仕様を示す。モーションベースの動作指令は 4ms ごとの各座標の指定で行った。

表 4 MB-200 の仕様

項目	仕様	
可動範囲	x	±80mm
	y	±72mm
	z	±56mm
	ロール,ピッチ	±12.0deg
	ヨー	±15.0deg
最大速度	x(前後),y(左右)	241mm/s
	z(上下)	319mm/s
最大加速度	x(前後),y(左右)	0.5G
	z(上下)	0.4G

5.2 人間の感覚特性検証

1 自由度の並進と並進や傾きの合成の際に知覚される感覚の評価を行った。2 自由度での動きを与えたときにどのように知覚しているかを評価する。今回の実験では、車両の進行方向横向きに立っていることを想定して、進行方向を x+軸とし、正面を y 軸、上下を z 軸としている。また傾きについてロール角を x 軸まわりの回転、ピッチ角を y 軸まわりの回転としている。

5.2.1 1 自由度の速度・角速度の感覚強度特性

- (1) 被験者に目をつぶってもらい、1 自由の並進または傾きの基準の刺激を与える。今回の実験では並進の基準の刺激を 5cm/s とし、傾きは 3deg/s とした。
- (2) その後基準と異なる動きを体感して表 5 の質問に回答してもらう

1 自由度の感覚実験では、前後、左右、上下、前後の傾き、左右の傾きの 5 つの運動について行った。以下の表に実験で使用した速度、角速度と例として基準としいる。

表 5 質問の内容と評価方法

速度・角速度の強さ	5段階評価
動いた距離・角度	7段階評価
恐怖感	7段階評価
不快感	7段階評価

表 6 基準と比較対象

	速度	角速度
基準	5cm/s	3deg/s
1	10cm/s	6deg/s
2	2.5cm/s	1.5deg/1s

5.2.2 2 自由度での感覚の知覚の仕方の検証

この実験では、2 自由度の方向または方向と角度の組み合わせの運動を被験者に目を閉じたまま与える。その後、被験者はどのように動いたか、恐怖感や不快感、並進運動と傾きどちらを強く感じたかのアンケートに回答してもらう。回答の仕方は、回転運動が強いと感じた場合 1、水平運動が強いと感じた場合は 7 を選択する。1 つの加速度



を固定しそれに合わせて加えていくというものである. 以下に指示した運動の 1 例の表とグラフに示す.

表 7 2 自由度の組み合わせた運動の 1 例

x軸の並進運動	z軸の並進運動
2.5cm/s	10cm/s
2.5cm/s	5cm/s
2.5cm/s	2.5cm/s

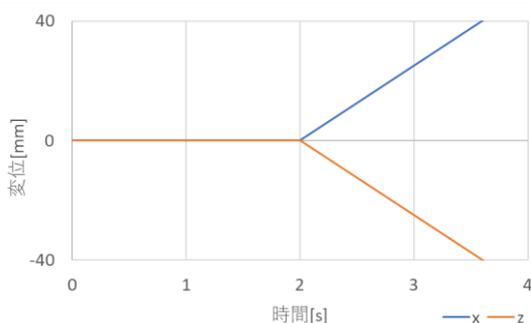


図 2 運動指示の 1 例

6. 測定結果

6.1 1 自由度の速度・角速度の感覚強化特性の結果

表 8 はどれだけ動いたと感じたか, 恐怖感, 不快感についての回答結果である. また図 3, 図 4 は結果の一部をグラフ化したものである.

表 8 前後方向の知覚感覚

速度		7段階評価						
		1	2	3	4	5	6	7
2.5cm/s	距離	0	1	2	2	7	3	2
	恐怖感	5	7	2	0	3	0	0
	不快感	4	10	1	2	0	0	0
10cm/s	距離	0	7	6	3	1	0	0
	恐怖感	0	0	2	2	7	4	2
	不快感	1	1	2	2	5	5	1

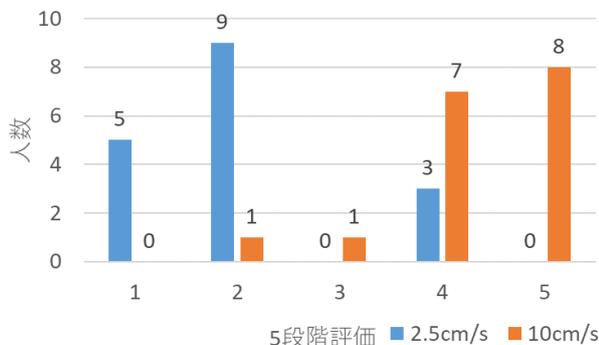


図 3 前後方向の速度感の知覚結果

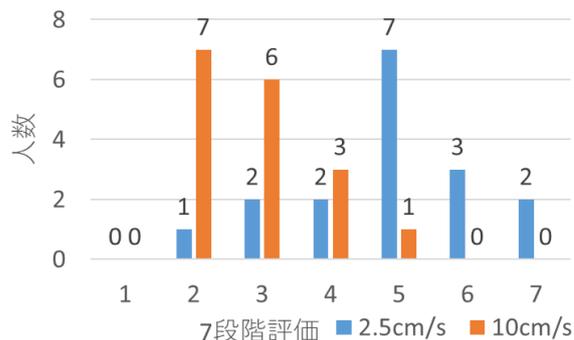


図 4 前後方向の距離感の知覚結果

6.2 2 自由度の合成した運動の知覚の検証結果

2 自由度での感覚評価の実験結果は, 1 つの基準の加速度に対して, 6 パターンの組み合わせを計 24 パターン行った. 図 5 と図 6 は速さが同じで, 方向の向きが異なる際の結果である. 図 7 は並進移動を組み合わせた際に生じる感覚の結果である.

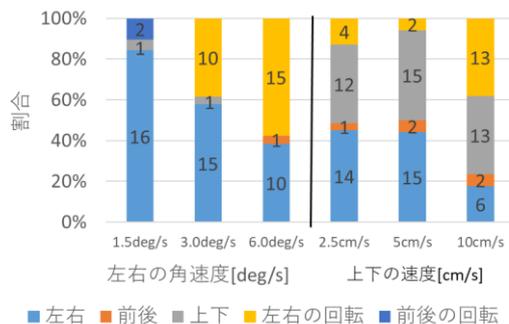


図 5 左右 10cm/s と他を組み合わせたときの知覚方向

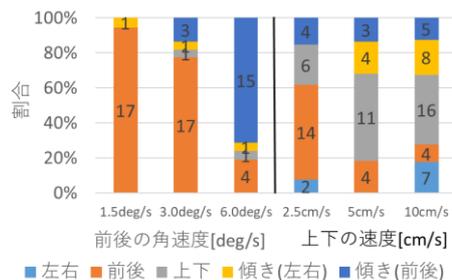


図 6 前後 10cm/s と他を組み合わせたときの知覚方向

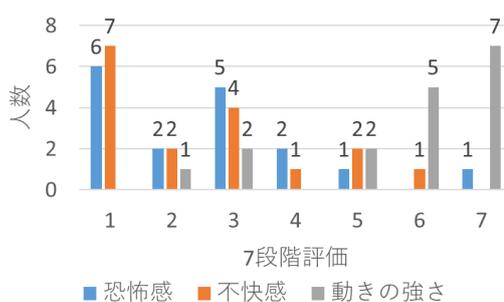


図 7 左右 10cm/s と上下 5cm/s の組み合わせの感覚



7. 考察

7.1 1 自由度の速度・角速度の感覚強化特性の考察

速度の感じ方について、ウェーバーフェヒナーの法則に基づいてべき乗係数を求めた。ロール角の運動とピッチ角の運動の実験結果である。べき乗係数では指数の値が大きいくほど感度が高い。図 8 は体の正面の姿勢変化、図 9 は体に対して横向きの姿勢変化の結果になっている。また表 8 はそれぞれの運動に対する実験結果を示している。表 8 から、今回の実験では回転運動と並進運動で比べたとき、回転運動が高い結果を示した。これはバランスを崩した際に対応できるようにするためなのではないかと考える。また回転運動の中でも人の正面の感度が一番高い。理由として正面での姿勢変化が一番対応できる箇所であるからではないかと考えられる。

表 8 運動方向とべき乗係数

モーションベースの動き方	べき乗係数
人の左右の並進運動	0.088
人の前後の並進運動	0.094
人の上下の並進運動	0.090
人の前後の回転運動	0.190
人の左右の回転運動	0.148

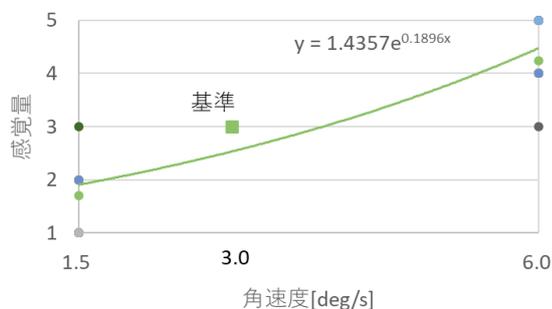


図 8 前後の回転運動での実験結果

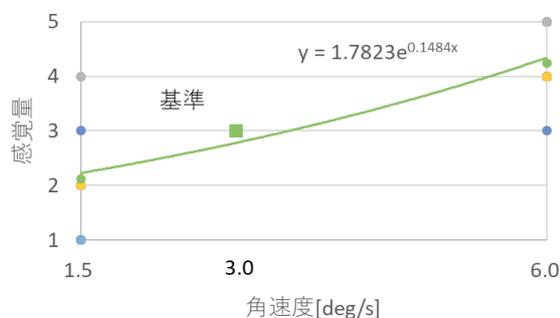


図 9 左右の回転運動での実験結果

7.2 自由度での感覚の知覚の考察

人は 2 自由度の感覚つまり同時に別々の刺激を与えるとき大きな変化を感じとり小さい変化は細かく知覚することが難しいということが分かった。これは人が合成された運動をそのまま感じ取っているのではなく、合成された運動の中で一番自分自身に影響する運動に絞って知覚している可能性がある。そのため小さい変化は大まかに知覚するため誤認していることがあると考えられる。

8. 結論

今回行った実車両の挙動分析結果よりシミュレーターにより実際の車両を再現するために必要な加速度や角速度、姿勢角の値を得ることができた。また最小構成で開発するにあたり、人の運動への知覚について調査し、正面の運動の知覚能力が一番優れているが、合成された運動になることで大きいものから知覚されることが分かった。

9. 今後の予定

加減速時の乗り心地を評価するためには、加速度と恐怖心の関係について調べることが必要である。今回行った合成された運動の知覚実験により、最小構成のシミュレーターを開発する際には回転運動での再現が適切であると考えられる。今後、実際に走行している車両の挙動を再現する機構システムを検討していく。

10. 参考文献

- [1] 吉田秀久, ほか: 鉄道車両のダイナミクスとモデリング, 日本機械学会, pp.107, 159, (2018)
- [2] 鈴木浩二: 鉄道車両の乗り心地を規定する振動要因に関する研究, 人間工学, Vol.33 No.6, (1997)
- [3] 坂上啓: 車両運動総合シミュレーターによる新しい乗り心地の研究, 日本機械学会誌 2003.7, Vol.106, No.1016
- [4] 三浦百葉, 田辺弘子, 小宮山 撰: 揺れの視覚刺激が VR 鉄道シミュレーターの「乗車感」に与える効果. 情報処理学会インタラクティブ 2019.3.6 1B-26
- [5] 濱圭吾, 高橋秀智: 鉄道車両の停車時の乗り心地再現シミュレーターの小規模化とデータ分析, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2021.9 2D3-4
- [6] WitMotionWT901C:https://www.amazon.co.jp/gp/product/B07RX6N4B1/ref=ppx_yo_dt_b_search_asin_title?ie=UTF8&psc=1(最終閲覧日 2021.12.27)
- [7] G-MEN GL01:<http://www.g-men.jp/dr/main.html>(最終閲覧日 2022.7.2)