

揺れの視覚刺激が VR 鉄道シミュレータの「乗車感」に与える効果

三浦百葉[†] 田辺弘子[†] 小宮山撰[†]

概要: バーチャルリアリティ (VR) を用いて鉄道を再現する VR 鉄道シミュレータにおいて、乗車感を高める目的で車両の揺れと車内の乗客や物の揺れをシミュレートするシステム「乗り鉄 VR」を実装した。当システムを用いて、HMD から発せられる音と映像だけで「乗車感」をどれだけ高められるかについて評価実験を行った。その結果、視覚誘導性自己移動感覚 (ベクシオン) を発生させる前進する映像に、車内の揺れを加えることによって「乗車感」が向上することが判明した。当システムを発展させれば、娯楽用や教育用への応用が期待できる。

1. はじめに

世の中に鉄道愛好家は多く存在するが、特に鉄道に乗ること自体を趣味とする人は「乗り鉄」と呼ばれる。この乗り鉄たちが抱える問題は主に 2 つある。1 つは、鉄道の利用には時間と費用のトレードオフの問題があるため、効率よく多くの路線を体験することが困難な点である。青春 18 きっぷなどの安価な切符を用いれば費用を抑えることができるが、これは普通列車しか利用できないため時間がかかる。逆に、新幹線や特急などを利用すれば時間は短くなるが、料金は高額になる。もう 1 つは、すでに廃止されてしまった路線や車両に乗ることはできない点である。2018 年 3 月に行われた JR 三江線の廃止や、特急「スーパーあずさ」で使用されていた E351 系電車の引退などは記憶に新しいが、それらには二度と乗ることができない。そこで、これらの問題解決の手段として、バーチャルリアリティ (VR) を用いて鉄道をシミュレートする方法が有効であると考えられる。

訓練用やエンターテインメント用として VR を用いた乗り物シミュレーションはすでに開発されているが[1][2]、いずれも振動を発生させるための大がかりな装置や高額の費用を必要とするため一般家庭での利用には馴染まない。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) のみで体験できるものとしては、(株) 神田技研がクラウドファウンディングを用いて、VR 空間に現実を模した車両や車窓風景からなる鉄道路線を構築する試み「VR 鉄道建設プロジェクト」を続けている[3]。しかし、HMD による視聴覚情報のみで電車に乗っている感覚が得られるかどうかは明らかではない。

本論文では、「実際の走行中の車両に乗車をしているような感覚」を「乗車感」と定義する。「乗車感」が高いほど VR による再現性が高いと解釈できる。この乗車感には単に進行方向と逆方向に進む車窓風景や走行音だけでなく、揺れが重要な要因であると考え、物理的な計算により、車

両と車内の乗客やつり革にこの揺れを与えることができる「乗り鉄 VR」を開発し、振動刺激を用いずに「乗車感」を高める方法を検討する。

2. 関連研究

自己が静止状態にあるにも関わらず、運動する視覚情報が与えられると身体が移動するように感じられる現象を視覚誘導性自己移動感覚 (ベクシオン) という[4]。ベクシオン強度は被験者を取り巻く環境を変化させることで調整が可能であることが知られている。例えば、視覚刺激に加えて聴覚刺激を与えることでベクシオンが促進されるという[4][5]。

ベクシオンを評価する手段としては、被験者に強度を評価させる主観的方法と、身体動揺や眼球運動を測定する客観的方法がある[6][7]。

3. 実験方法

3.1 実験の目的

HMD により呈示される映像と音だけで、「乗車感」をいかに高められるかを検討する。

映像として進行方向と逆に流れる車窓風景に加えて、車両の揺れにより発生する車窓風景の縦揺れ(車窓揺れ)と、車内の人や物の揺れ(車内揺れ)を加え、「揺れによってベクシオン及び『乗車感』を促進できる」という仮説を検証する。

3.2 実験装置

実験用仮想環境の作成のために Unity, VR の映像と音を流すために Oculus Rift (図 1)、計測のために加速度センサ ZMP IMU-Z Lite を取り付けた疑似つり革を使用した。



図 1 Oculus Rift

[†]青山学院大学
Aoyama Gakuin University

3.3 実験用の VR 世界の空間構築

以下は全て Unity を用いて行った作業である。

3.3.1 VR 空間の作成

作成した車両および周辺の環境は図 2 の通りである。この図に示すように地面として 1000m 四方の Plane を用意し、そこにシェーダを用いて白黒の市松模様を描いた。Plane の 1 辺を 16 分割し、市松模様の 1 マスを 62.5m 四方とした。

Plane 上両縦辺の 500m 地点に、プラットホームを模した Cube オブジェクトを設置した。これらを結ぶ 1000m の直線を、実際に電車が走る軌道とした。

軌道の傍には、250m おきに電柱を模した Cylinder オブジェクトを設置した。今回の実験は揺れの効果を検証するのが目的であるため、乗客に強い印象を与えてしまうリアルな風景は用いなかった。

電車の 3DCG モデルとしては、Unity のアセットストアから“Train”（販売者 RUSLAN）を入手し使用した。電車には Rigidbody と Collider を実装し、加速度を与えることで走行制御ができるようにした。

車内には、VR 空間内の視点となるカメラ、音源、つり革を模した Sphere オブジェクト、被験者の前に座る乗客を模した 3D モデル「ユニティちゃん」（ユニティ・テクノロジー・ジャパン合同会社）を設置した。カメラは被験者の身長に応じて位置を上下できるようにした。また、つり革と乗客は、動く設定をしないものと、Hinge joint を使用して車両と結合させ自由に揺れを与えられるようにしたもの 2 種類を用意した。揺れは Unity 内での物理演算により、Sphere オブジェクトはポールを支点に、乗客は臀部を支点に、電車の加速度に比例した振幅で微小な振り子運動をするように設定した。この 2 種類は、条件によって表示と非表示を切り替えた。

以上、車内の環境は図 3 の通りである。

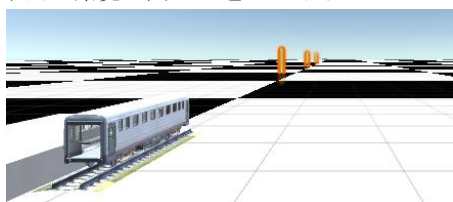


図 2 車外の様子



図 3 車内の様子

3.3.2 動作プログラム作成

電車を走行させるプログラムを 2 種類、C# を用いて作成した。どちらのプログラムも、始発駅から 20m/s (72km/h) になるまで加速度を与え、終着駅に近づいたら走行の向きと反対の加速度を与えてホームに停止させることで、1000m を約 1 分で走行するという点と、25m おき（走行位置の x 座標が 25 で割り切れる地点。以下、この地点を「線路の継ぎ目」と記述する）に「ガタンゴトン」という音を鳴らすという点では共通である。しかし、1 つは滑らかに進むだけであるが、もう 1 つは線路の継ぎ目を通るときの縦揺れを再現しながら進むという違いがある。

後者のプログラムは、線路の継ぎ目を通過した瞬間に、上方向に 30m/s² の加速度を与えている。これによって電車は 0.1m ほど浮かび上がるが、重力により直ちに着地する。加速度の数値は、浮上の加減が適当になるように検討を重ね、決定したものである。

3.4 実験環境

本実験では被験者がつり革につかまりながら HMD を用いて VR 世界を観ることで、現実の乗車に近い環境を与えた。一般的な通勤電車は床から 185cm 地点にあるポールからつり革が下げられているため[8]、これをもとに設置を行った。

床から 185cm 地点に突っ張り棒を設置しつり革をぶら下げた。つり革自体も、すべらないようにテープで棒に固定した。

被験者の身体の動揺を間接的に観測するために、つり革に加速度センサ IMU-Z Lite を取り付け、実験中、サンプリング周期 20ms で 3 軸の加速度を測定できるようにした。

以上、現実環境は図 4 の通りである。



図 4 つり革の設置

3.5 実験手順

20~22 歳の男女 11 人 (男 5 人, 女 6 人) を被験者とした。

実験前に、事前アンケートとして年齢、性別、身長、HMD 経験、電車に乗る頻度、酔いやすいか否か、を記入させた。

回答された身長を元に VR 空間内のカメラの位置を調整し、電車が静止した状態でつり革につかまらせ、1 分間つり革の加速度を測定したのち、映像を見る練習を行った。

本番では、足を肩幅ほどに開いて自然な姿勢で立ち、出来るだけ頭を固定し、つり革に右手でつかまった状態で、

HMD を装着するという体勢で行った (図 5)。車窓揺れの有無と、車内揺れの有無を組み合わせた 4 種類の映像を約 1 分ずつ HMD を用いて観察させ、1 種類観察する都度主観評価アンケートに答えさせた。被験者から見える映像のイメージを図 6 に示す。

アンケートは、乗車感に関する評価項目として、「進んでいる感覚 (進感覚)」, 「揺られている感覚 (揺感覚)」, 「本物の電車と似ている度合い (類似度)」の 3 項目を用いた。それぞれ 1 から 5 の 5 段階で評価させた。また、VR 酔いの程度を評価するために Simulator Sickness Questionnaire (SSQ: 映像酔いの主観評価で用いられる指標[9]) のスコアをつけさせた。SSQ 内の 16 個の項目に対し、4 つの選択肢「なし (0)」, 「わずかに (1)」, 「中程度 (2)」, 「激しく (3)」から 1 つ回答させた。映像を流している間は、同時につり革の加速度も測定した。

映像番号と条件は表 1 の通りである。(以下、それぞれの映像を①, ②…と表記する。) 被験者にはどの条件を組み合わせた映像を流しているかは伝えなかった。

最後のタスクが終了後、事後アンケートとして「一番ふらつきを感じた映像」, 「一番『乗車感』が高いと思った映像」を 4 つの中から 1 つ選ばせた。さらに、映像がどの条件を組み合わせたものかを答えてもらうクイズ (表 1 を空白にしたものを埋める) を実施した。

表 1 映像番号と条件の対応

	車内揺れなし	車内揺れあり
車窓揺れなし	①	③
車窓揺れあり	②	④



図 5 実験中の体勢



図 6 被験者から見える風景のイメージ

4. 実験結果

4.1 主観評価

主観評価の結果を図 7 から図 9 に示す。全被験者の平均を取ったところ、進感覚、揺感覚、類似度のすべてにおいて、最も高いスコアであったのは④ (車内揺れあり, 車窓揺れあり) であった。3 つの項目においてそれぞれ二元配置分散分析を行ったところ、揺感覚の「車窓揺れ」の各水準における「車内揺れ」の単純主効果の検定において、危険率 5% で有意差がみられた。

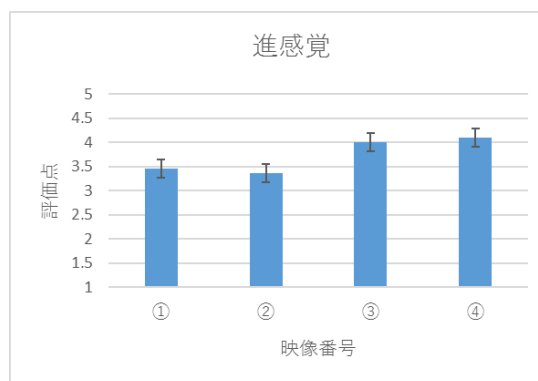


図 7 全被験者の進感覚の平均

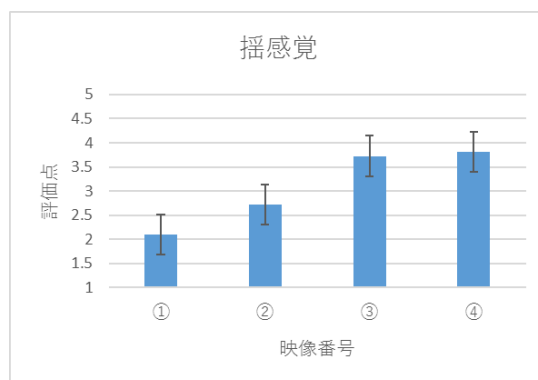


図 8 全被験者の揺感覚の平均

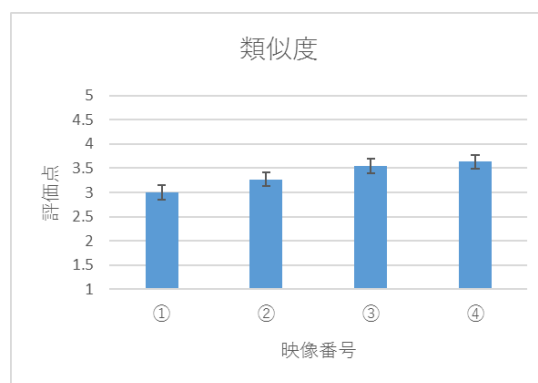


図 9 全被験者の類似度の平均

SSQ の回答に応じた得点に、各項目に「吐き気 (N)」, 「眼球運動 (O)」, 「ふらつき (D)」として与えられた重みをか

け、N、O、D、合計値の項目ごとに集計値を求めた。被験者の平均を取ったところ、吐き気 (N) のスコアが一番高いのは③で 13.88、眼球運動 (O) のスコアが一番高いのは②と③で 18.61、ふらつき (D) のスコアが一番高いのは③で 30.37、合計値が一番高いのは③で 235.06 あった。しかし、4 項目においてそれぞれ多元配置分散分析を行ったところ、「車内揺れ」の各水準における「車窓揺れ」の単純主効果の検定、「車窓揺れ」の各水準における「車内揺れ」の単純主効果の検定のどちらにも、危険率 5% で有意差がみられなかった。

事後アンケートにおいて、「一番ふらつきを感じた映像」で最も多く選択されたものは④、「一番『乗車感』が高いと思った映像」で最も多く選択されたものは③であった。

クイズの正解率は、全問不正解が 3 人、1 問正解が 2 人、2 問正解が 3 人、3 問正解が 0 人、全問正解が 3 人であった。

4.2 つり革の加速度

加速度データは、1 人の被験者につき、静止時の加速度と 4 種類の揺れ条件の計 5 回計測した。それぞれ 5 つの加速度データの全被験者平均を取り、左右方向 (Y 軸) をまとめたグラフが図 10、前後方向 (Z 軸) をまとめたグラフが図 11 である。

車内揺れを加えた③と④は、明らかに変動が増大している。

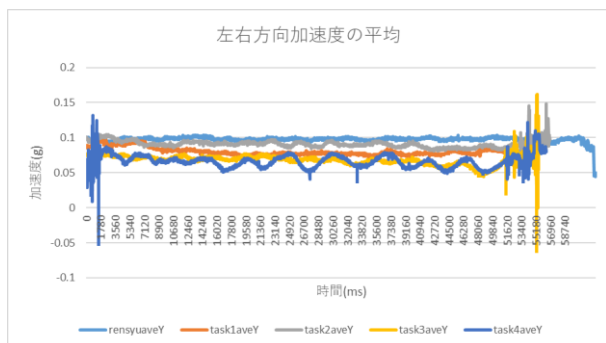


図 10 左右方向加速度の平均

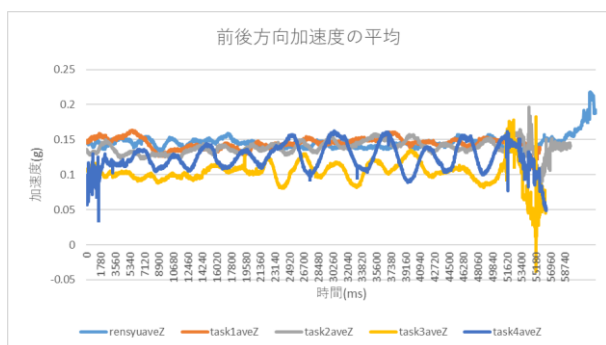


図 11 前後方向加速度の平均

5. 考察

ベクションを想起させる映像に車内揺れを加えることで、主観的には進感覚と揺感覚および乗車感を高められるという結果となった。

しかし、車窓揺れに関しては大きな効果がみられなかった。アンケートの自由記述欄において、「車窓揺れがあることに気が付かなかった」と記述した被験者が多かった。原因としては車窓揺れのパラメータを小さくしすぎたことが考えられる。被験者の頭にも揺れがあるため、それによって車窓揺れが打ち消されてしまった可能性がある。今後、パラメータを変更して実験する必要がある。

車内揺れがある条件では、つり革の加速度にも大きな変動が現れているため、被験者が揺れを感じてつり革に身体を預けた様子が伺える。身体感覚でも加速度を感じたとみなすことができよう。

また、「窓の外に現実味がない」「景色にバリエーションがほしい」という意見もみられた。今回は実験のため景色を極力簡略化する必要があったため、このような感想を抱くのはごく自然なことである。車窓の CG を作りこめば、さらに乗車感が向上すると考えられる。

6. おわりに

「乗り鉄 VR」の用途は、娯楽用と教育用の 2 点考えられる。

まず、娯楽用について記述する。序論で述べたように、HMD さえあれば時間や場所を問わず乗車ができる。実際に乗車に行く費用や時間、体力は必要ない。また、CG を変更すれば、時間を遡って懐かしい列車に乗車ができる。あくまで疑似体験であるが、時間と費用が不足している人、病気などで外出が困難な人、廃止された路線や車両に乗ってみたい人などの用途に適している。

次に、教育用について記述する。電車の運転士の育成用に運転シミュレータを使用している鉄道会社は多いが[10]、これにも「乗り鉄 VR」が応用できると考える。CG で運転台を再現し、手にトラッカーをつけることでマスコン等を操作できるようにする。走行速度が高速になったり、急ブレーキをかけたりするときに、映像の揺れを大きくすることでリアリティが増大するであろう。このシステムは HMD のみを用意すればいいため、コストを抑えることができる。

今回は実装していないが、現実には走行している電車の加速度を測定し、それを元に映像を制御することで、車種や路線ごとの個性を表現することも期待できる。

参考文献

- [1] 片柳亮二. 航空機開発に必須なフライトシミュレータ. 日本バーチャルリアリティ学会誌 Vol. 16 No. 2 pp. 6-7, 2016
- [2] “鉄道業界初！ヘッドマウントディスプレイを用いた運転シミュレータを開発 | 2015 | 更新情報 | 東急テクノシステム”. <https://www.tokyu-techno.co.jp/news/2015/0410/>, (参照 2018-

12-20)

- [3] “株式会社神田技研／VR 鉄道建設特設サイト”.
http://www.kanda-giken.co.jp/vr_train.html, (参照 2018-12-20)
- [4] 妹尾武治. 効率的なベクション駆動に関する知見と脳イメージング研究から得られたベクションの知見の VR コンテンツへの活用可能性. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌. 2009, Vol. 14, No. 4, pp. 481-490.
- [5] 崔 正烈, 柳生 寛幸, 坂本 修一, 岩谷 幸雄, 鈴木 陽一. 回転運動する聴覚刺激が回転ベクション感覚に及ぼす影響. 電子情報通信学会論文誌 D. 2014, Vol.J97-D, No.4, pp.891-894.
- [6] 矢野澄男, 清水俊宏. 視覚情報による身体動揺-臨場感の計測-. 光学. 2001, 30 巻, 5 号, pp.316-322.
- [7] 玉田靖明. 近年のベクション研究の動向. 視覚の科学. 2017, 第 38 巻, 第 1 号, pp. 5-10.
- [8] 鉄道図書刊行会. 鉄道ピクトリアル 8 月号. 電気車研究会, 2014
- [9] 氏家弘裕. 知っておきたいキーワード 映像酔い. 映像情報メディア学会誌. 2007, 61 巻, 8 号, pp. 1122-1124.
- [10] 宮下 直人. JR 東日本(株)の運転士養成における安全教育, 体験教育. 安全工学. 2008, 47 巻, 6 号, p. 416-420.