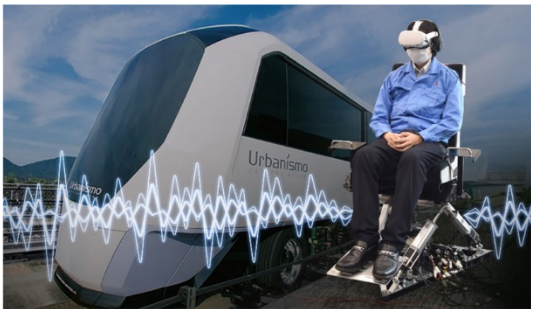
VR 技術を活用した新交通システム車両の乗り心地体感システムの開発

Development of Ride Comfort Experience System for Automated Guideway Transit Using Virtual Reality Technology



川内 章央 *1 Akihisa Kawauchi
和田 俊幸 *2 Toshiyuki Wada
矢延 雪秀 *3 Yukihide Yanobu
内田 浩二 *4 Koji Uchida
工藤 敏文 *5 Toshifumi Kudo

近年，各種乗り物の快適性向上に関するニーズは高く，三菱重工業株式会社（以下，当社）の製品であるAGT（Automated Guideway Transit）でも，種々の対策による車両の低振動化による乗り心地向上を実施してきた。これまではその効果を体感するために実車走行試験による検証が必要であったが，この度，VR（Virtual Reality）とモーションチェアを活用して実際に車両に乗車する体験を可能とする可搬型の体感システムを開発した。実車に近い乗り心地を再現することで，実車走行なしで様々な検証を可能としており，本報ではその取組みについて述べる。

1. はじめに

AGTはゴムタイヤで走行する新交通システムであり，一般の鉄道に比べて，小曲線カーブや急こう配を走行できるため路線計画の自由度が高いことから，空港内のターミナル間を移動する路線や，都市内交通システムとして，国内外で幅広く導入されている(1)。

当社ではAGTに対してMBD（Multi Body Dynamics）技術を活用した詳細数値シミュレーション等により，対象とする路線で走行中に車両に発生する振動加速度の予測や，乗り心地向上のための低振動化対策の検討を行ってきた。しかし，数値シミュレーション上で振動加速度の大きさを予測したとしても，体感上，どの程度の乗り心地となるかを設計者やお客様が想像するのは難しく，実車両を製作した上で実際に車両を走行させて確認する必要があった。

実車走行を体感するために，大手鉄道会社や自動車会社で利用されている実車大の設備を用いた大型シミュレータを活用する手法もあるが，開発に期間/コストがかかる。また，海外などの遠方のお客様に体験してもらうには，設備のある工場まで来て頂く必要があることから，可搬性に優れた乗り心地を体感できるシステムとして，VRとモーションチェアの組合せによる簡易的なシステムの構築を行った。本報ではその取組みについて述べる。

2. 乗り心地体感システムの概要

2.1 システム構成

乗り心地体感システムの全体構成を図1に示す。採用したモーションチェアは，6つの電動アクチュエータで座面を支持するスチュワートプラットフォーム型の装置であり，可搬性に優れ，家庭用電源（AC100V）で動作する装置となっている。モーションチェアの椅子には当社が設計・製造した東京臨海副都心を走る新交通システム“ゆりかもめ”7300系・7500系などのAGTに採用されているG-Fit(2)を，治具を介して設置している。制御用のPCからは，モーションチェア動作用の信

*1 総合研究所 知能化機械研究推進部 主席研究員　*2 技術戦略推進室 先進デザインセンター
*3 総合研究所 知能化機械研究推進部
*4 総合研究所 知能化機械研究推進部 主席研究員 技術士（総合技術監理部門，機械部門）
*5 総合研究所 振動研究部 主席研究員 博士(工学)/技術士(機械部門)

号出力と，VR 用の映像を映し出すヘッドマウントディスプレイ(HMD)の映像及び音の出力を実施する。モーションチェアを変位させるための入力データにはMBD解析によるシミュレーション結果が用いられるが，実車データを利用することも可能としている。基本的には市販の製品を組み合わせたシステムであるが，映像，振動，音の同期を正確に取ることで，高い没入感を感じられるシステムとなっている。

図1　乗り心地システムの構成図

2.2　検証のための実車データ取得

開発した乗り心地体感システムの検証を実施する上で必要な車両の振動及び VR 用の映像・音として，高速 AGT 車両[1]が MIHARA 試験線[3]を走行する際のデータを取得した。モーションチェアへの指令とする変位量を算出するために必要な振動データについては，ひずみ式加速度計と角速度計であるジャイロセンサを着座する G-Fit 座面の下に組み込み，その上に着座した状態で計測を実施して取得した。車内の映像取得用の 360°カメラ及び 360°サラウンドサウンドを録音可能なアンビソニック方式のバイノーラルマイクは図2に示すように，座席に座った際の目線位置にカメラ，耳元付近の位置にマイクを設置して走行中のデータ取得を実施した。このようにして取得したデータを乗り心地体感システムに反映することで，実車両に乗った時と同じような振動，映像及び音響で乗り心地を体感可能となる。

図2　映像及び音の実車計測

2.3 実車振動の再現

実車での振動計測結果と，モーションチェアによる振動再現結果を，1/3 オクターブバンドごとの振動加速度で比較した結果の内，上下方向の加速度の例を図3に示す。JIS B 7760-2:2004 (ISO 2631-1: 1997)で加速度作用方向や姿勢等に応じて健康，快適性，振動知覚に対する人体への振動の影響が考慮されている周波数補正係数を適用した周波数補正加速度実効値では，実測±10%以内で再現できることを確認している。なお，10Hz 以上で再現精度が悪化するのはモーションチェアの制御周波数範囲外となるためである。

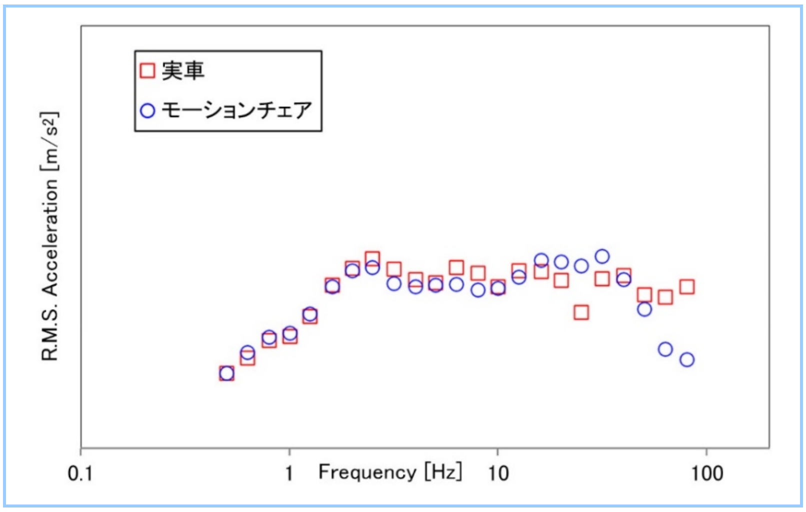


図3　モーションチェアによる振動再現結果

2.4 システムの没入感の評価

実車走行で取得した振動，映像，音を組み合わせたシステムを図4に示す。実車と同じ椅子に座って実車と同レベルの振動が発生している状態で，HMD とサラウンドヘッドホンで映像および音を流すことで，実車に近い乗り心地を体感できるシステムとしている。

本システムのどの項目が没入感向上への寄与度が高いかを確認するために，様々な年齢層の20 名を対象としてアンケート形式による評価を実施した結果を図5に示す。アンケートでは，前に体験した条件との没入感を比較する形式で実施し，質問に対して前ケースより没入感を感じた場合は 1，没入感を感じにくくなった場合は 5 として 5 段階での評価を実施した。モーションチェアを動作させる自由度について，6 自由度(並進 3 方向＋回転 3 方向)から 3 自由度(並進 3 方向のみ)とした場合は，没入感を感じる人の割合に有意な差はなく，大きな傾斜もなく走行する AGT においては，並進 3 方向の振動成分の再現のみでも問題ないことを確認した。ただし，6 自由度＋音から 3 自由度の振動のみとした場合は，没入感が低下し，また，映像と動きに違和感を覚える人の割合が増えていることから，乗り心地体感システムで没入感を向上させるには音が重要であることが分かった。

図4　実際のシステムの画面

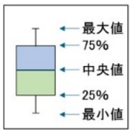
アンケート対象

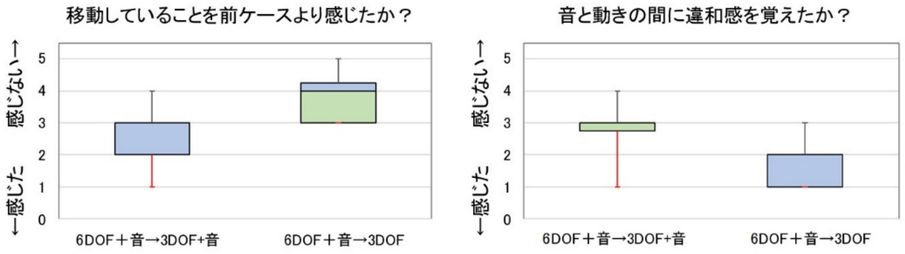
・ 性別

男性	女性
18人	2人

・ 年齢

20代	30代	40代	50代	60代
3人	4人	6人	5人	2人





モーションチェア自由度及び音響効果の影響について

図5　没入感に関する評価結果

3. 本システムの活用方法

本システムの構築により，実際の車両に乗車しなくても，簡易的に乗車体験をすることが可能となった。以下に本システムの活用例を示す。

(1)　走行シミュレーション結果の体験

車両に発生する振動加速度をシミュレーションで算出することが可能なMBDモデルの例を図6に示す。本モデルは，AGT の構成部品をモデル化して組み合わせたものであり，車体上下方向は空気ばね及び上下ダンパで支持，前後方向は平行リンクで車体と台車を結合している[4]。また，台車はモータからギアを介して駆動される車軸とタイヤを有し，タイヤを操舵する案内操舵機構を有している。また車両が走行する軌道のモデルは，実路線の軌道線形と，一般的な AGT 用軌道の路面凹凸状況，案内軌条の凹凸状況を反映してモデル化する。これらの車両モデルと軌道モデルを組み合わせて走行シミュレーションにて振動加速度を予測し，その結果をモーションチェアの指令としたうえで，更に，3D CG 等で作成した走行時の映像をHMD 上に映し出し，類似の車両の走行時の音と組み合わせることで，実路線や車両が完成する前に本システムで乗車体験が可能となる。

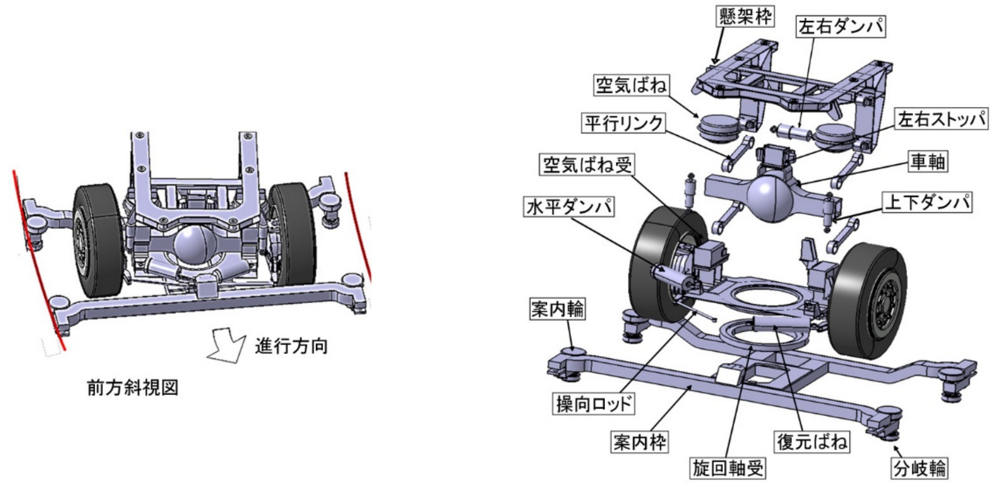


図6　車両の MBD モデル

(2) 乗り心地向上効果の体験

実車製作・改造前に，走行シミュレーションによって検討した乗り心地向上対策による車両の振動加速度の変化を本システムで再現，体感することで，実際に乗車している人が感じることが可能な乗り心地向上に必要な振動特性を，数値のみでなく，体感上でも評価することが可能となる。これにより，効果的な対策案の検討が可能となり，走行試験費用の削減が可能となる。

また，AGT の場合，長年の運用により軌道の走行路面が劣化し，補修による改善が必要になることがあるが，この補修による車両の振動加速度の低減効果を数値のみでなく，本シミュレータでその効果を体験することで，軌道補修の必要性を理解しやすくすることが可能となる。

(3) VR 映像を用いた遠隔地での乗車体験

本システムで乗車体験をした際，HMD に映し出される映像は体験者の頭の動きに合わせて変化することになる。この HMD に表示されていた映像を録画しておき，この動画をモーションチェアがない状態で HMD と音のみで体験することでも，簡易的に乗車体験することが可能である。この活用方法の場合，モーションチェアの設備のある地区への訪問が難しい遠隔地のお客様であっても，実際の車両の振動も考慮したような目線の動きとなる映像を体験できるため，通常の HMD に映し出す動画のみの場合に比べて没入感を向上させることが可能となる。

4. まとめ

実車両で計測した車両加速度を市販のモーションチェアで精度よく再現した上で，走行時に取得した 360° 映像及び音声を HMD 及びヘッドホンに出力することにより，実車に近い乗り心地を体験可能なシステムを構築できた。本システムを活用することで，実車完成前であっても MBD 解析による走行シミュレーション結果を再現することによる乗り心地向上効果の検証も可能となった。

今後，本格的に実工事への適用を進め，実車走行試験にかかる期間，費用の低減を図るとともに，お客様へのアピールも進めていく。また，VR とモーションチェアを組み合わせた技術については，新交通システム車両のみでなく，当社の他の船，航空機などの乗り物製品への適用も推進していく。

参考文献

(1) 星ら，高速新交通システム，三菱重工技報 Vol.52 No.1 (2015)
(2) 鉄道車両用シート“G－Fit”が 2014 年度グッドデザイン賞を受賞 乗客の疲労軽減やマナー向上に寄与，三菱重工ニュース 2014-10-01 発行 第 5576 号
(3) 総合交通システム検証施設“MIHARA 試験センター”の設備の充実，拡張と活用について，三菱重工技報 Vol.53 No.3 (2016)
(4) 増川ら，新交通システム車両向け新形式ボギー台車の開発，日本機械学会誌 2014.9 117 巻 1150 号