

# 小型可動式ドライビングシミュレーションシステム MOVIC-T4 の開発\*

Development of Moving Virtual Cockpit Driving Simulation System “MOVIC-T4”\*

平田輝満\*\*・山口晋弘\*\*\*・屋井鉄雄\*\*\*\*・高川剛\*\*\*\*\*

By Terumitsu HIRATA\*\*・Kunihiro YAMAGUCHI\*\*\*・Tetsuo YAI\*\*\*\*・Tsuyoshi TAKAGAWA\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

高密度化した都市内の地下道路は、通常の山岳トンネルと比べ交通量が多く、道路線形が急で、分合流部が頻発するなどドライバーに大きな負担を与えると想像される。このような懸念に対し、本研究ではドライビングシミュレーションシステム(DS)を活用した都市内地下道路の走行安全性分析を様々な視点から行っている。

これまでの研究では、Motion-base（動揺装置）を持たない Fixed-base 型 DS を使用し、単調な走行条件下における意識水準低下の可能性について考察してきた<sup>1)</sup>。このような単調な走行条件を想定した分析では、Motion-base による体感加速度の再現の必要性は比較的小さいが、より頻繁な加減速・旋回操作を伴い、大きな負担をドライバーに強い走行条件を想定した分析を行う場合、体感加速度の再現は被験者の運転操作、心的負担に大きな影響を与えると考えられる。近年、体感加速度の再現は 6 軸 Motion-base を擁する大型システムを活用することが多いが、本研究では走行安全性分析以外の様々な用途でも活用できる可能性を有する小型 DS とするため、体感加速度模擬を小型 2 軸 Motion-base で行い、さらに走行画面の表示はヘッドマウントディスプレイ(HMD)で行う新しいコンセプトの DS（以後、MOVIC-T4: MOving VIRTUAL Cockpit driving simulation system by Tokyo Tech & Trion for Tokyo highways）を開発しており、本稿では、その設計・開発に関して、体感加速度の再現方法及び本システムのパフォーマンス評価、さらに Motion-base による振動の再現に関する検討について報告を行う。

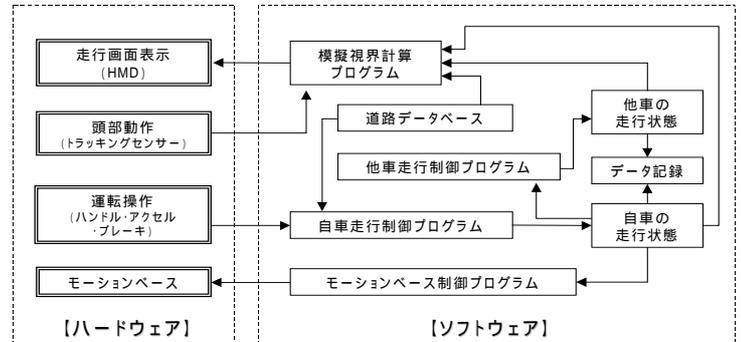


図 1. MOVIC-T4 のシステム構成

表 1. 2 軸 Motion-base の仕様

自由度	ピッチ（前後方向の回転） ロール（左右方向の回転）
アクチュエータ性能 （応答性）	最大角速度 40 deg/sec 最大可動範囲 ±15 deg（2軸共）



図 2. Movic-T4 の操作風景と走行画面

## 2. システム構成及び Motion-base の制御方法

### (1) システム構成

MOVIC-T4 のシステム構成を図 1 に示す。ドライバーの運転操作情報及び道路の幾何構造データから自車の走行状態を計算し、その情報をもとに Motion-base の制御を行っている。また周辺走行他車は現在約 60 台発生させることが可能であり、各車両に対して走行位置、基本走行速度、車線変更判断基準、車種等の属性を設定できる。個々の車両は他の車両との位置関係、相対速度等のデータから自ら速度調整、追従（車間距離は速度に応じて変化）、車線変更・合流（変更先車線の前後方車両との車間、相対速度から車線変更可否判断及び速度調整）を行う。記録データは、自車の走行軌跡・速度・アクセル開度・ブレーキ踏量・ステアリング角度・前車との車間距離及び他車の走行軌跡・速度である。走行画面は HMD

\*キーワード：交通安全、ドライビングシミュレーションシステム、体感加速度模擬

\*\*学生員，修士（工学），東京工業大学大学院土木工学専攻  
（横浜市緑区長津田町 4259，Tel&Fax:045-924-5675，  
E-mail: hirata@plan.cv.titech.ac.jp）

\*\*\*学生員，東京工業大学大学院人間環境システム専攻

\*\*\*\*正員，工博，東京工業大学大学院人間環境システム専攻

\*\*\*\*\*非会員，株式会社トリオン

（世田谷区赤堤 1-35-17-209，Tel:03-3325-6405）

に投影し、トラッキングセンサーにより、ドライバーの顔の向きと表示する走行画面を連動させ、全方位を見ることが可能である。視界がHMDのみに限定されるためVR空間への没入感が高いと考えられる。

### (2) 2軸 Motion-base による体感加速度の再現方法

MOVIC-T4では2自由度を有する2軸 Motion-base を使用し(表1),その回転により生じるドライバーの自重の分力により体感加速度を再現している。ピッチ,ロール方向の回転角度の決定は図3のフローに従っている。ドライバーのアクセル,ブレーキ,ハンドル操作からシミュレーション内の車両に発生する前後加速度,遠心加速度を計算し,その大きさに比例してピッチ,ロール方向に回転させている。回転角度の大きさはスケールパラメータにより調整可能である。

### 3. Motion-base 回転角のスケール調整

MOVIC-T4では,Motion-base の回転運動により生じるドライバーの自重の分力により体感加速度を再現しているが,実際の車両ではピッチ,ロール運動は存在しないため,あまり大きく動揺させるとドライバーに違和感を与える。従って,回転運動の大きさはドライバーの感じる体感加速度の大きさ及び回転運動の違和感のトレードオフ関係を考慮して決定する必要がある。図4に Motion-base 回転角のスケールの決定フローを示す。本研究ではまず,8名の被験者に対して,様々なレベルのスケールパラメータを設定し,様々な運転行動をさせた時の体感加速度及び動きの違和感の2項目について5段階評価をさせて(図5),その2項目の関係から最適と思われるおおよそのスケールパラメータの範囲を抽出した。

その後,得られたスケールパラメータの範囲内でさらに細かく分割し,今度は筆者ら2名により詳細な運転挙動別(急加速,急ブレーキ,車線変更 etc)の体感加速度及び動きの違和感の2項目について5段階評価を行い,その結果から総合的に判断して本研究で使用するスケールパラメータを決定した。

### 4. MOVIC-T4 のパフォーマンス評価及び振動の再現に関する検討

#### (1) パフォーマンスの主観評価

これまでに述べた調整を施した MOVIC-T4 について,そのパフォーマンスの主観的評価を行った。

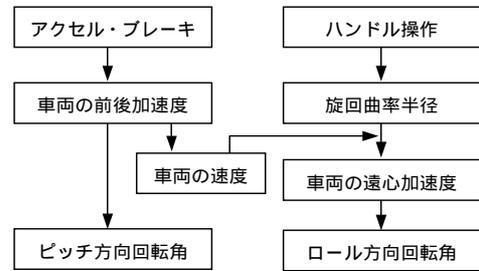


図3. Motion-base の制御方法

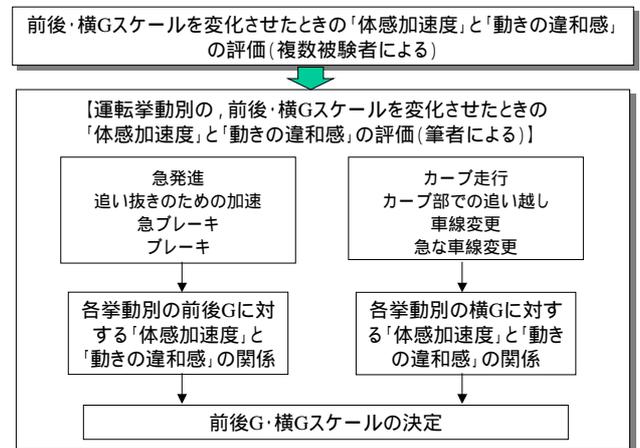


図4. Motion-base 回転角のスケール調整フロー

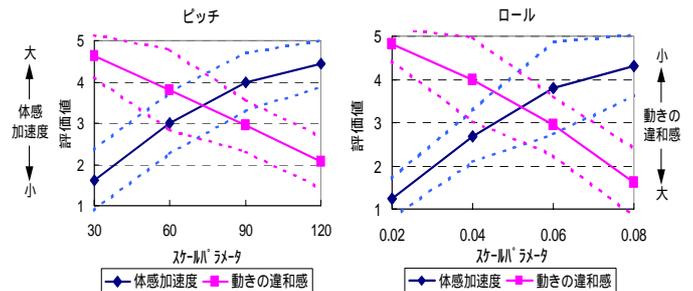


図5. 回転角の大きさを変化させた際の「体感加速度の大きさ」と「動きの違和感の評価」(平均)

評価は発話プロトコル法の考えに倣っている。被験者は管理者の運転する車両を追従し,管理者の車線変更や急ブレーキ等の運転行動と同じ行動をとらせた。その運転中に思ったことをその場で発言してもらい,発言内容から得た情報を用いて性能評価を行っている。運転終了後には,感性を評価するSD法や自由回答式のアンケートも行っている。走行中の発言や走行後のアンケートから,加速時や旋回時の体感加速度はリアリティが高いとの評価を得た。しかし,問題点としては減速時,特に急ブレーキ時の体感加速度が弱いことが挙げられた。図6にSD法による被験者9名の評価結果の平均と±標準偏差の範囲を示す。被験者が共通に抱く心象として「視野が狭い」,「疲れやすい」が挙げられ,これらはHMDの使用に起因しており,走行実験に向けてさらなる調査が必要であると考えている。

(2)映像表示装置による速度感の相違

スピードメータを隠した状態で 7 名の被験者に 60km/h, 100km/h だと感じる速度で等速走行を行うように指示し, HMD 装着の場合とプロジェクタ使用の場合との速度感の比較を行った. 表 2 に 7 人の平均速度を示す. プロジェクタの方が HMD に比べて速い速度で走行していることが伺える (60km/h, 100km/h 走行時共に 5%有意差). この結果より, HMD の方がプロジェクタよりも速度感があることが示唆される. スピード感には映像の画角等も影響しているので, この結果のみからどちらの表示装置が優れているかは一概に判断できないが, 一般的にシミュレータでは速度感が欠如する傾向があり, 仮にそうだとすれば, 速度感という点からは HMD の方が高い再現性を有すると考えられる.

(3)Motion-base による体感加速度模擬の効果

加速減速度及び遠心加速度が体感できることによる走行挙動及び生理データの変化について検討した. まず事前に想像され得る体感加速度の効果を以下に示す.

- 異常な急加速・急減速・急旋回の防止
- 曲率の大きいカーブ区間における適正な速度調整
- 横方向走行位置の安定化
- 急加速・急減速・急旋回時の心理的負担変動の再現

本稿ではこれらのうちその効果が比較的明確に確認された (急減速時のみ) について報告する. 被験者, 走行条件を以下に示す.

被験者	本学学生 5 名 (22~25 歳)
走行条件	被験者には約 8km の 3 車線道路中央車線で前方の大型車 (100km/h で走行) を追従走行し, なるべく車線内中央を走行するように指示. 途中, 前方車の急停止に応じて被験者も急停止. その他 2 箇所車線変更 (緩・急) も行わせている. 以上の走行実験を各被験者に対して Motion-base 有り で 2 回, 無しで 2 回, 順番はランダムに行った.

・横方向走行位置の安定性

遠心加速度を体感できることにより特にカーブ区間で横方向走行位置が安定する可能性がある. そこで横方向走行位置の標準偏差を直線区間, カーブ区間ごとに算出し, その全被験者平均を Motion の有無で比較した結果を表 3 に示す. 直線区間では差がないが, カーブ区間では Motion 有の方が若干ではあるが標準偏差が低く, 体感遠心加速度により走行位置が安定することが伺える.

・急減速時の心理的負担変動

心理的負担の測度は RR 間隔 (心電波形の R 波の間隔で値が小さいほど負担大) を使用し, この分析

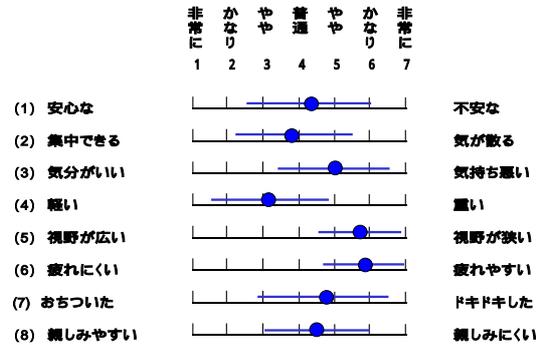


図 6. SD 法による評価

表 2. HMD とプロジェクタ使用時の走行速度

推奨走行速度	60km/h		100km/h	
	HMD	プロジェクタ	HMD	プロジェクタ
表示装置				
平均値 (km/h)	50.9	65.4	72.8	82.2
標準偏差 (km/h)	16.4	11.4	13.4	13.8

表 3 Motion の有無による横方向走行位置標準偏差 (単位 m) の平均値比較

	Motion有	Motion無	一対標本t検定 (片側) による差の検定結果
直線区間	0.572	0.575	t=0.23, P<.41
カーブ区間	0.473	0.509	t=1.91, P<.05

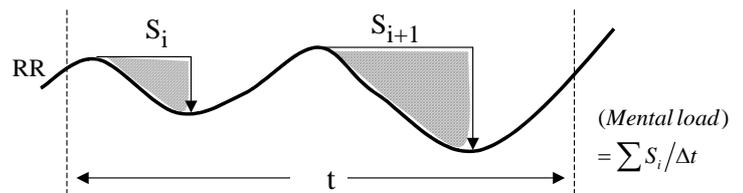


図 7 心理的負担量の指標

表 4 Motion 有無による心理的負担変動の比較

	Motion有	Motion無	一対標本t検定 (片側) による差の検定結果
心理的負担量	0.0188	0.0115	t=1.98, P<.04

\* RR, 時間の単位はsで計算

では心理的負担の変動傾向をみるために, RR が低下した量を低下していた時間で累積し, 分析対象時間で除した値 (図 7) を心理的負担量の指標として用いた. 表 4 より Motion 有の方が心理的負担量が大きく, 体感減速度により心理的負担の変動量が增大することが伺える.

この実験中では, その他の効果については体感加速度模擬の有無で明確な変化は確認されなかった. 詳細については発表時に報告したい. また, これらの分析はあくまで Motion の有無によって走行データにどのような変化が現れるかを検討したものであり, どちらの場合がより現況再現性が高いかは言及できないため, 今後実走データを活用しながら再現性の検討も行う必要がある.

(4) 振動模擬に関する検討

Motion-base のもう 1 つの活用法として, 走行中の

車両振動の再現が考えられる。今後、振動の模擬によるリアリティの向上効果、運転挙動の再現性向上効果、シミュレータ酔いへの影響等を検討するため、本研究ではまず、実走時の振動データの取得及びスペクトル解析による振動成分の抽出を行い、さらに2軸 Motion-base 上で幾つかの振動データを再現し、複数の被験者によるリアリティの評価を行った。

実走実験より得られた振動加速度のスペクトル解析結果を図8に示す。卓越周波数としては、速度によって変化の無い1.5Hz付近の振動(この周波数帯の振動は車両のサスペンションの固有振動数に対応しているため一定と考えられる)及び、速度に比例して大きくなる11~17Hz付近の振動(この周波数帯の振動はエンジンの振動や路面の細かな凹凸に対応しているため速度に比例して変化すると考えられる)が観測され、この2種類の振動成分をもとに運転中に感じられる振動が模擬できるものと思われる。そこで、2軸 Motion-base により5つの振動(1.5Hzのみの振動、14Hzのみの振動、1.5Hzと14Hzの合成による振動、減衰を考慮した合成波の振動(一定間隔)、減衰振動をランダムに発生させる振動)を模擬し、被験者9名に対して5つの振動ケースに関して最もリアリティの高いものを挙げてもらった。その結果、14Hzのみの振動と減衰を考慮した合成波の振動がリアリティの高い振動として挙げられた(表5)。

また、11~17Hz付近の振動に関して、速度に比例して周波数を上げるようなシステムを作成する必要があるかどうかを検討するために、被験者9名にランダムに振動を与え、その変化に気が付いたかどうかを、運転中及び座っているだけ(助手席を想定)の2ケースで5段階評価をしてもらった。その結果を図9に示す。ほとんどの被験者が振動の変化に気づいておらず、速度に応じて振動の周波数を変化させる必要性はさほど大きくないと推察される。

## 5. おわりに

本研究では、2軸 Motion-base 及び HMD を活用した小型可動式ドライビングシミュレーションシステム MOVIC-T4 の開発を行い、主に体感加速度模擬のための Motion-base 制御方法に関して検討を行った。また、MOVIC-T4 のパフォーマンス評価として、被験者の主観評価、映像表示装置の速度感、Motion-base による体感加速度模擬の有無による走行データの変化に

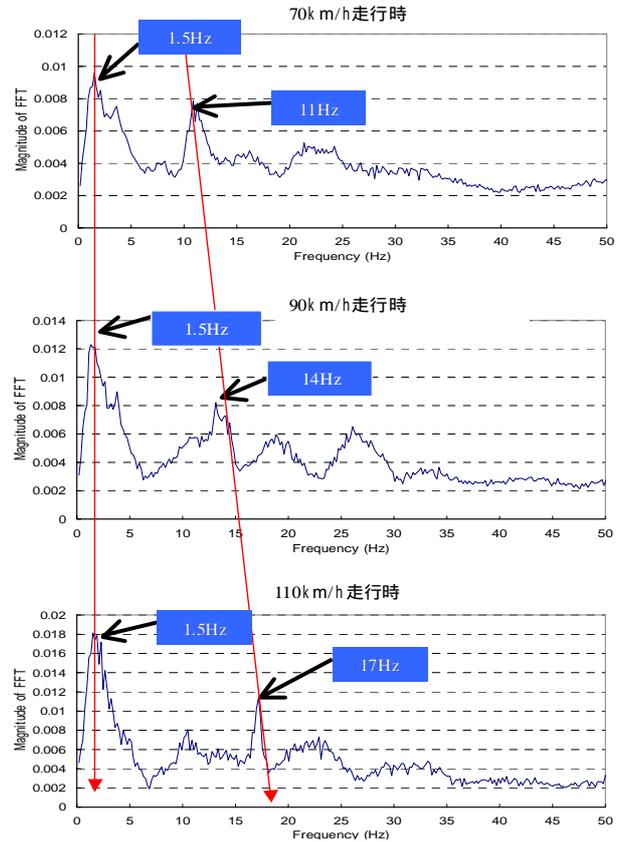


図8. 実走時の振動加速度スペクトル

表5. 振動の波形別リアリティの評価

	最もリアリティが高いと評価された回数
1.5Hzのみの振動	1回
14Hzのみの振動	4回
1.5Hzと14Hzの合成振動	0回
減衰を考慮した合成振動(一定間隔)	3回
減衰を考慮した合成振動(ランダム)	1回

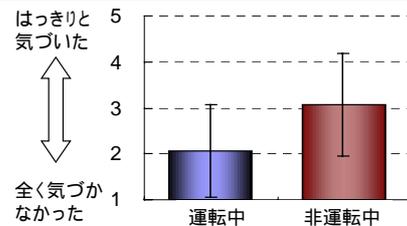


図9. 運転中と非運転中における振動変化の知覚

に関して分析し、さらに車両運転時の振動に関する検討を行った。今後は、実走行データとも比較しながら現況再現性分析を行い、都市内地下道路の走行環境分析へ適用したいと考えている。

## 参考文献

- 1) 平田輝満, 飯島雄一, 屋井鉄雄: 都市内地下道路における意識水準低下に関する分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.28, 2003.
- 2) 宇野宏・平松金雄・佐藤健治: 運転シミュレータにおける加速度模擬の効果, 自動車研究, Vol.19 No.3 1997.
- 3) 椎葉太一・須田義大: ドライビングシミュレータを用いた自動車乗り心地評価, 日本機械学会論文集(C集), 68巻670号 No.1-1405 2002.
- 4) Driving simulator validation for speed research: Stuart T.Godley・Thomas J.Triggs・Brian N.Fildes Accident Analysis & Prevention Vol.34 589-600 2002.