

特集

運転環境模擬装置の開発と運転挙動解析への適用

土居俊一，水野雅彦，畔柳洋，本郷武朗，小島真一

Development of Driving Simulators and Their Application to Driving Maneuver Analysis

Shun'ichi Doi, Masahiko Mizuno, Hiroshi Kuroyanagi, Takero Hongo, Shin-ichi Kojima

要 旨

近年の交通安全意識の高揚とともに、車両のアクティブセイフティ（予防安全性）が強く求められている。車両の予防安全性の向上には、車両運動性能に加え様々な走行状況下でのドライバの運転，すなわち，認知判断および操作特性を十分に把握することが重要となる。そして、ドライバの運転操作挙動をつぶさに観察するために運転環境を模擬する装置が必要となる。一方、車両の走行状況は、高速道路や一般道などの走行環境，車両およびドライバの状態によって変化するので、運転環境の設定には工夫を要する。そこで本研究では、上記のような様々な走行状況に応じたドライ

バの運転挙動を計測解析する目的で、運転環境模擬装置（ドライビングシミュレータ）を開発した。製作した装置の形態は、ドライバの注視する前方視野の変化を模擬する視野画像を主体とする視野画像シミュレータと視野画像に加え車両の動揺を模擬する動揺付加型シミュレータである。後者については、特定の走行状態を対象とする2自由度の動揺を付与するものと、車両の全ての運動，すなわち、6自由度の動揺を付加するものを開発した。ここでは、これらの運転環境模擬装置の構成要素技術と各装置の性能およびドライバの運転挙動解析への適用例を示した。

Abstract

Prior to the passive safety, the active safety is now an urgent problem for vehicle safety. To improve the active safety performance of vehicles, it becomes more important to grasp the ordinary driver's behaviors for considering a driver-vehicle closed loop system. For observation of the driver's behavior, it is necessary to reproduce driving situations and analyze the driver's performance. In this study, three kinds of driving simulators were newly designed and developed for

examining the ordinary driver's maneuvers under various driving conditions. These simulators were classified into the standing type and the motion type. The latter type was divided into 2DOF and 6DOF according to the degrees of freedom for simulating the motion. The features of individual simulators and their application to driving maneuver analysis are shown in this paper.

キーワード

予防安全，人間自動車系，ドライバ操作挙動，ドライビングシミュレータ，視野画像，動揺付加

2.1 運転視野画像作成

運転における前方視野環境の模擬には詳細な画像再生、生成装置が不可欠となる。ここで製作した画像作成システムは、車両運動を計算するパーソナルコンピュータや他のコントローラとのインターフェイスと、データベースに基づき画像を生成する画像専用ワークステーションとを組み合わせで構成した。また、データベースはOpen Flight Formatとよばれる形式で作ることにより、移植性の高いものとした。さらに、ツールは道路画像作成に特化したものを用いることでデータベース作成の工数を低減できるようにした。ここで、ホストコンピュータの指令に対する画像の応答遅れは約80msecである。**Fig. 2**に構成を、**Fig. 3(a)**から**(d)**に製作した走行画面の一例を示す。

2.2 運轉操作環境模擬

ドライバ、乗員の運転挙動を調べるための運転操作環境の模擬には、従来より現実の車両もしくは車室を使用するもの、運転席と助手席の前2席を備えるいわゆるハーフカー形式のもの、更に、ドライバ・乗員のいずれかの席のみを模擬するいわゆるコクピット形式のものがある。ここでは、装置の規模や動揺形式とも関連して、(a)実車両利用方式と(b)車室利用方式とした。後者の方式で

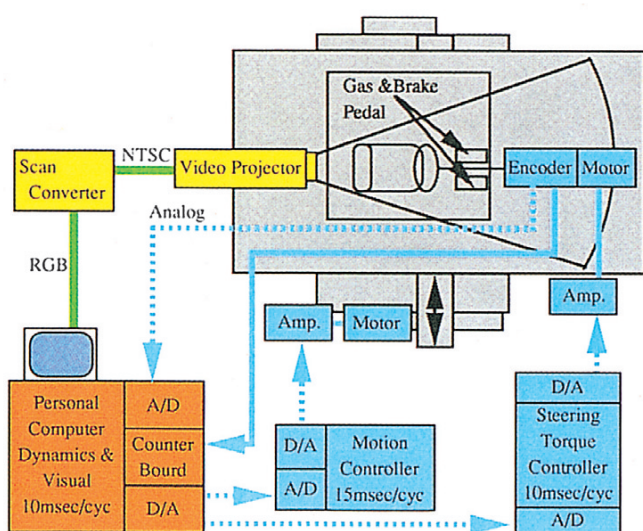
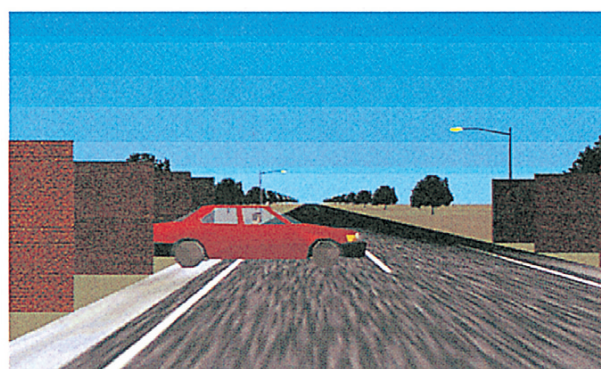


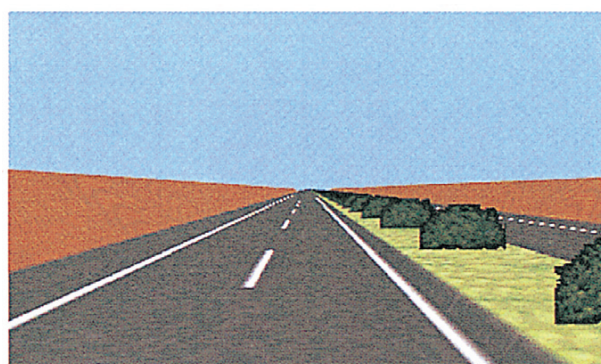
Fig. 2 Image generation system.



(a) Curved road



(b) Emergent situation



(c) Highway scene



(d) Crossing in town

Fig. 3 Example of front view for driver panel.

は、(b-1)前2席とインパネ、フロントガラス部を含むものと(b-2)ドライバ席とインパネ部のみのコクピット形式のものを製作した。**Fig. 4(a), (b)**にそれぞれの装置における運転状況を示す。

運転時の操作状況を模擬するため、ペダルやハンドルのような操作端の特性設定が必要となる。ここでは、ブレーキペダルやアクセルペダルについては、車載の油圧配管系を再現した油圧系や、踏力-ストローク特性を模擬したバネ系を介して特性を設定した。また、ハンドル操作力はドライバの操作し易さに大きく影響するので、サーボモータにより想定反力を設定可能とした。このハンドル反力-回転変位特性は、後述する車両モデルを通した信号処理により設定した。



(a) 2seats driving system



(b) Driving cockpit system

Fig. 4 Inside views of driving simulators.

2.3 車両動揺環境模擬

運転環境模擬装置における車両動揺の体感付与の必要性は、模擬対象とする走行状況によって異なる。すなわち視界に依存する走行環境を想定する場合は、いわゆる定置型シミュレータとして車両動揺を付与しない方式を用いる。この場合は、多くの場合と同様に実車両を用いる。一方、動揺付加型シミュレータとしては、(1)擬似動揺を付加する方式と(2)実車動揺を再現する動揺を付加する方式があり、この場合は、車室ないし運転席周りを模擬する閉空間、いわゆるキャビン形成する。ここでは、動揺付加方式は上記(1), (2)をそれぞれ製作し、2および6自由度の動揺付加方式を実現した。

2.3.1 2自由度動揺付加方式

車両の横並進と車室のロール運動を模擬する2自由度の動揺を付加する方式で、**Fig. 5**に示すような並進用のレールに沿った横方向の運動と運転席コクピットの下部に回転軸を持つロール運動をそれぞれのモータにより発生する。ここで、横方向の動きは、演算された車両運動の横方向変位に、またロール運動は、車両の速度と道路曲率から算定される横加速度に比例して制御される。すなわち、ドライバの操舵に伴う横並進運動と傾斜によるロール運動が合成され、**Fig. 6**に示すような走行車線変更時の横加速度が生成される。

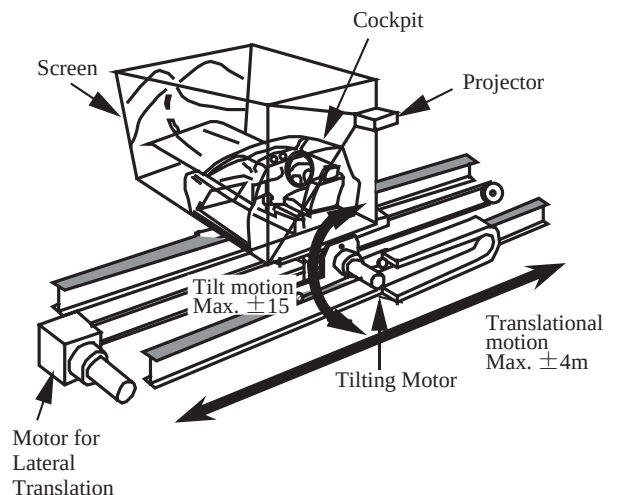


Fig. 5 Motion system of 2 degree of freedom.

2.3.2 6自由度動揺付加方式⁹⁾

車両の上下、前後、左右の並進運動とロール、ピッチおよびヨーの回転運動を模擬する6自由度の動揺を付加する方式で、Fig. 7に示すような3組の五角形型リンク機構を持ち、その機構を6台のサーボモータにより駆動する。この方式は、リンク構造を用いることにより極めてコンパクトで、また、油圧駆動方式に比べ高応答となり、装置の取り扱い性が著しく向上する。

2.4 車両モデルの構成

ドライビングシミュレータの車両運動計算に用いた計算モデルは、車両のヨー、前後、横方向の運動と前後輪の回転からなる5自由度の簡易モデ

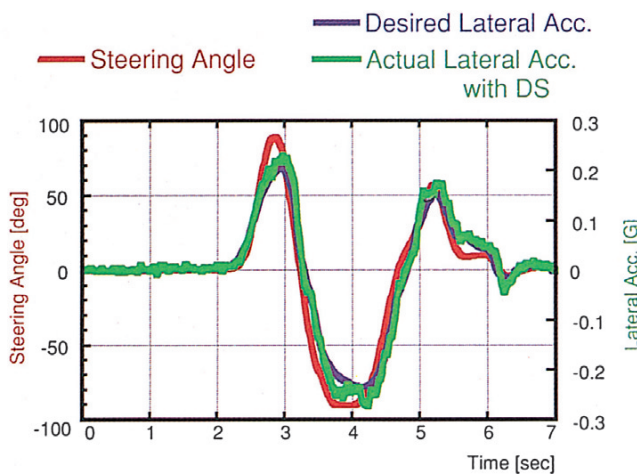


Fig. 6 Example of lane change motion.

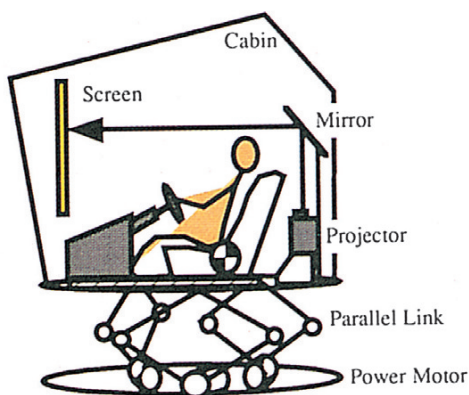


Fig. 7 Motion system of 6 degree of freedom.

ルである。ドライバの操作挙動を入力として、車両の姿勢角等を出力し、画像作成装置や操舵反力生成装置に出力する。

3. 運転環境模擬装置の性能

走行状況の模擬形式別の装置特性を、画像システム、操作環境、動揺付加性能の順で整理してTable 1に示した。なお、いずれの装置においても走行環境を模擬するエンジン音などの簡易音響システムを備えている。

3.1 定置型交通環境模擬装置

高速道路などの走行環境で、他車の存在を前提とした車載機器の性能評価を実施するためには、車群中での走行条件を様々に変化させる交通環境模擬が必要となる。ここでは、前方走行車両に追従走行する状況をはじめ、複雑な交通環境を詳細に提示するため、これらの設定が容易に実施可能な走行シナリオ設定ソフトを開発した¹⁰⁾。

Fig. 8にその走行シナリオ例、Fig. 9に実験状況を示す。前方走行車両の急変や、追い越し後の急な割り込み等の実験環境が簡単に設定できる。

3.2 動揺付加型運転環境模擬装置

一般道路走行時を模擬する状況でドライバの走行予測に反した走行環境の変動、例えば、障害物の不意の飛び出しや天候の激変による路面状況の急変を模擬し、緊急時のドライバの反応や応答時間などの運転挙動を計測し、ドライバ操作を含めた車両の予防安全や事故回避性能の評価を実施するためには、通常運転状況と緊急事態の模擬が必

Table 1 Performance characteristics of three types of driving simulator.

	Standing Type	Motion Type	
		2 Degree of Freedom	6 Degree of Freedom
Visual System	View Angle: 110 degree Screen Area: 3m x 7m Distance from Screen: 2.5m	View Angle: 50 degree Screen Area: 1.5m x 2.6m Distance from Screen: 2.5m	View Angle: 150 degree Screen Area: 0.8m x 2.5m Distance from Screen: 1m
Cockpit System	Real Whole Body of Experimental Vehicle	Front Seats from Cut Body	Driver's Seat (Driving Cockpit)
Motion System	—	Lateral: 4m, 0.5G Rotation: 15deg., 130deg/s ² Power: 22Kw(lat.) 1.5Kw(rot.)	Lateral: 0.5m, 1G Rotation: 30deg., 100deg/s ² Power: 7.2Kw(AC200V)

要となる。ここでは、車両の運転時動揺を模擬的に付加する2自由度の動揺付加型シミュレータを製作した。**Fig. 10**にその外観を示した。本装置においては限られた作動範囲内で車両の横並進加速運動を体感として付与するため、速い動きは横並進運動で、大きな曲線路のような持続する横加速運動の模擬には傾斜運動で代用する。

つぎに、一般道路走行時の通常走行状況におけるドライバの挙動解析を正確に行うためには、車両の動揺や振動の体感を忠実に再現する必要がある。ここでは、車体の動揺状況を再現するため、6自由度の動揺付加型シミュレータを製作した。**Fig. 11**に、その外観を示した。動揺の応答周波数特性は約10Hzと高く、車両の運動や振動乗り心地の評価周波数領域をほぼ満足している。

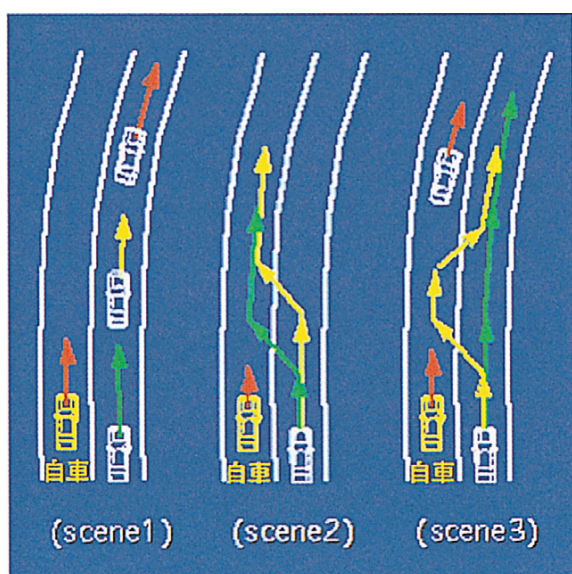


Fig. 8 Scenario examples for mixed traffic flows.



Fig. 9 Experimental scene of standing-type simulator.

4. ドライバの運転挙動解析への適用

上記に述べた3種類の運転環境模擬装置を用いて種々の交通環境を模擬し、ドライバの運転挙動解析を実施した。**Table 2**にそれらの実験項目をまとめた。ここでは、代表的な適用例について述べる。



Fig. 10 Experimental scene of 2 DOF driving simulator.

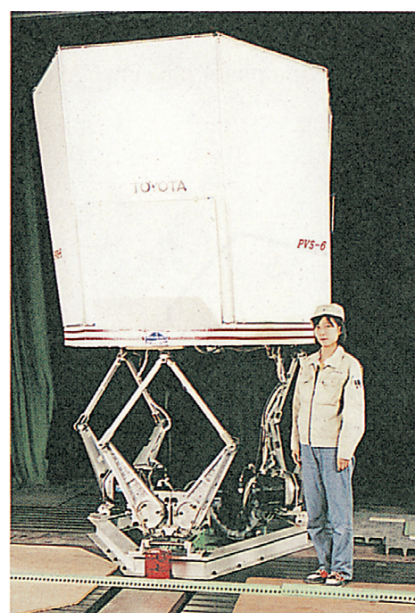


Fig. 11 Experimental scene of 6 DOF simulator.

4.1 交通環境模擬による運転挙動分析

定置型交通環境模擬装置を用いて、追従走行時のドライバの運転操作挙動を計測した。**Fig. 12**に追従走行時の発進、停止挙動の計測例を示した。これより、先行車のブレーキランプ点灯や車間距離に応じて運転操作を行い、交通環境の変化に伴う個々の運転者の詳細な挙動の解析が可能となった。そして、ドライバの運転に伴う意識低下をはじめ、ドライバの予期せぬ交通環境の変動を想定

Table 2 Applications for driver behaviour's analysis.

DS type	Theme of driver analysis
1) Standing type	1) Cognitive and visual ability of driver 2) Simulator sickness induced visual systems 3) Human error analysis during convoy system 4) Drowsiness estimation and evaluation
2) Half car 2 DOF	1) Emergency avoidance maneuver analysis 2) Emergency management due to control fails 3) Driver's aid system for emergency 4) Evaluation of human friendly operations
3) Cockpit 6 DOF	1) Cognitive sensibility analysis of driver 2) Motion induced sickness 3) Physiological analysis of driver's perception

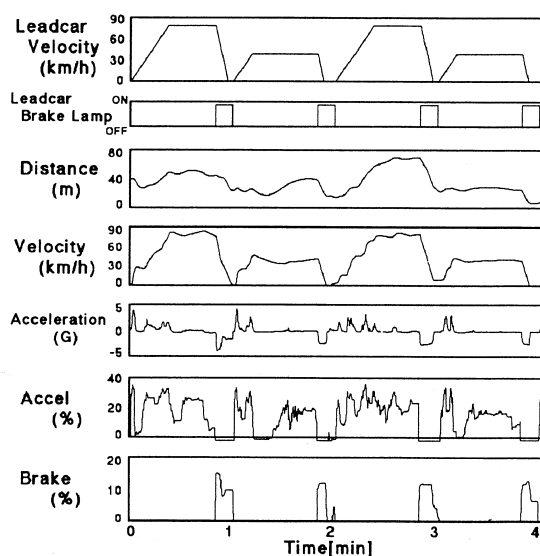


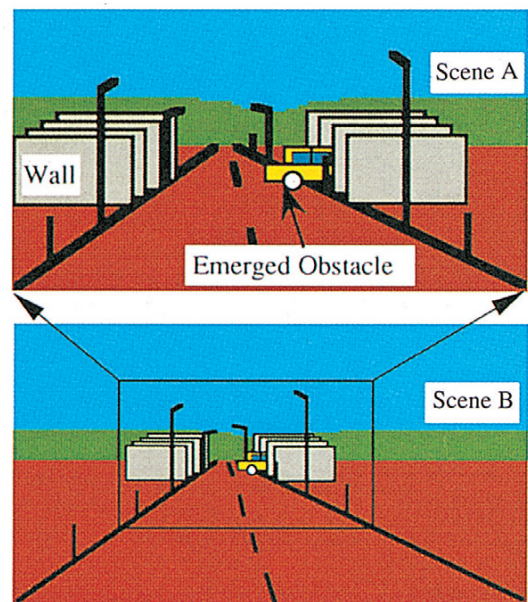
Fig. 12 Measured examples of following driving condition.

した様々な状況下での適切な運転支援の在り方などの検討が可能となった。一方、ドライバの運転挙動のうち、ブレーキ、アクセルやハンドル操作に先行する認知判断行動についても、画像処理によって、様々な前方視野を想定することにより検討できる。

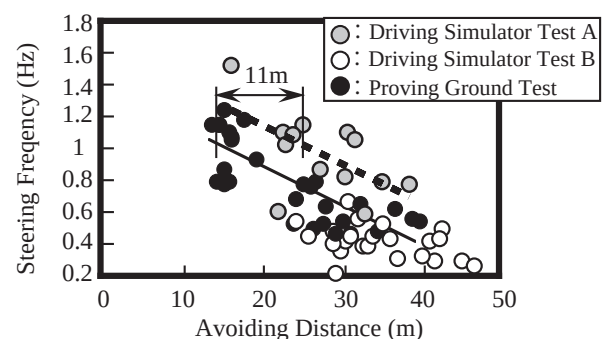
4.2 緊急時の運転挙動解析

2自由度動揺付加型運転環境模擬装置による運転挙動解析の一つとして、緊急障害物回避時のドライバ挙動計測について述べる¹¹⁾。

物陰からの不意の障害物の飛び出しを想定した**Fig. 3(b)**のような走行状況下で一般ドライバの操作反応時間を計測した。**Fig. 13(a)**, **(b)**に提示画



(a) Examples of experimental scenes for emergency avoidance



(b) Experimental results of avoidance maneuver analysis

Fig. 13 Measured examples of emergency avoidance.

像の例, および緊急回避行動の余裕距離とハンドル操作の速さの指標である操舵周波数の関係を示した。ここでは, 画面(A)と画面(B)を提示した場合の操舵開始時の障害物への距離は, 仮想画面上での描画距離の差約10mに等しく, また, 操舵操作の速さも画像(A)の場合の方が速くなる傾向があることがわかる。ちなみに, 同様な設定条件による実車両での回避実験結果と比較するとFig. 13(b)中の実線との比較となり, 条件を限定すれば実車両との対応関係を検討することができる。

4. 3 路面段差走行時の体感振動再現

運転時のドライバには, 前方視野からの情報と車両動揺からの体感情報とが同時に認識される。運転操作に伴う視野の変動や操作に応じた手応えやそれに続く動揺変化はドライバの状態フィードバック操作行動を計測するうえで重要となる。ここでは, それらのドライバの行動計測から, 人間の知覚特性を詳細に検討するための体感振動再現を試みた例について示す¹²⁾。

6自由度動揺付加型運転環境模擬装置による運転挙動解析の一つとして, 路面段差乗り越し時の車両の過渡的な振動を例に車室動揺の詳細な模擬状況について述べる。Fig. 14(a), (b)に路面段差乗り越し時の車室振動の解析結果とその模擬装置による動揺再現状況を示した。図(a)に示す車室フロア上下加速度の計算値に対し, 図(b)に示すようなコクピット床状での加速度波形となりほぼ動揺再現が可能となった。このように, 並進運動と回転運動が同時に付与される多自由度の動揺が再

現できる。これにより, 走行中の乗員の振動や動揺感受特性を明らかにすることができ, さらに人間の認知判断特性や認識いき値の課題についても同様に現象再現実験を実施することができる。

5. まとめ

種々の走行環境を想定したドライバ運転挙動を計測解析する目的の運転環境模擬装置を開発した。一般的な通常走行時はもとより, ドライバが予期せぬ緊急時の運転挙動を調査するため, ドライバの前方視野を主体とする模擬環境から, ドライバへの体感情報を模擬する動揺付加型にいたる3種類の形態の運転環境模擬形式のドライビングシミュレータを開発した。以下に検討結果をまとめる。

1) 実際の交通環境をより詳細に再現し, その状況下でのドライバの認知判断行動を観察するため, 定置式の視野環境模擬型シミュレータを開発した。この形式の模擬装置により, 高速道路走行中を想定し先行する車両や先行車両の急激な車線変更などの様々な交通環境を模擬することが可能となった。

2) 一般道路走行中の様々の事故に至る状況の運転環境模擬を視野画像により行い, 運転時の動揺感覚を簡易な動揺にて模擬する2自由度動揺付加型環境模擬装置を開発した。ドライバは, 障害物や急激な路面状況変化には模擬環境においても, 実際の走行時とほぼ同様な対応を示すことより緊急な操作行動を把握する実験においてはドライバ挙動を適確に計測することができる。この装置により, 予防安全機器の特性設定に不可欠な人間の瞬時の反応特性など基礎的な行動データを収集することができた。

3) 運転状況下での乗員の体感特性を詳細に検討するため, 応答性の高い6自由度動揺付加型運転環境模擬装置を開発した。車両走行時の車室の多自由度の動揺状況を正確に再現することにより, 乗員の振動感受特性をはじめ, 人間の機能特性に立脚した性能評価基準を明らかにすることができた。

車両の予防安全に関わる課題は, 操作者たるドライバの運転挙動を考慮した解析がますます重要

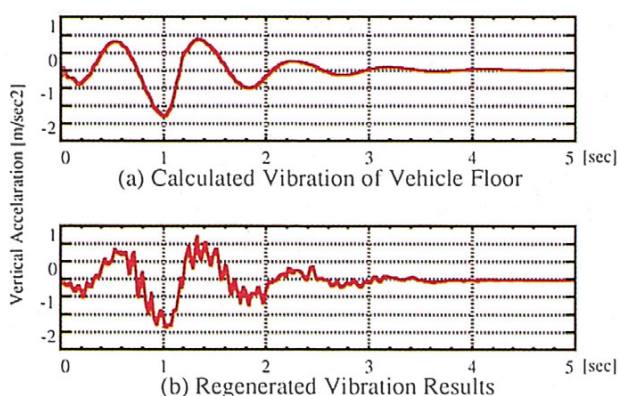


Fig. 14 Simulated motion by 6 DOF simulator.

となっており、さらに詳細な運転行動および運転における情報処理エラー発生の機構解明等が必要となる。今後、将来の情報化社会でのドライバ支援の在り方を含めた人間・自動車・情報システム系解析技術への積極的展開をめざしたい。

参 考 文 献

- 1) 福井, 林: "ドライビングシミュレータを利用した人間-自動車系の解析", 自動車技術, **42**-3(1988), 342
- 2) 三木: "ドライビングシミュレータの開発動向", 電気学会誌, **117**-8(1997), 516
- 3) 相馬, 佐藤, 平松: "研究用ドライビングシミュレータの開発", 自動車研究, **17**-11(1995), 34
- 4) Kading, W., et al.: "The Advanced Daimler-Benz Driving Simulator", SAE Tech. Pap. Ser., No.950175, (1995)
- 5) Bertollini, G., et al.: "The General Motors Driving Simulator", SAE Tech Pap. Ser., No.940179, (1994)
- 6) Greenberg, J. A., et al.: "The Ford Driving Simulator", SAE Tech Pap. Ser., No.940176, (1994)
- 7) Freeman, J. S., et al.: "The Iowa Driving Simulator; An Implementation and Application Overview", SAE Tech Pap. Ser., No.950174, (1995)
- 8) 松浦: "道路環境・車・ドライバ系の相互作用の調和", 自動車技術, **45**-10(1991), 80
- 9) 三村: "電動6軸パラレルリンクマニピュレータとその応用", 日本機械学会論文集, **62**-597(1995), 218
- 10) 丹下: "ビデオ画像による先行車両位置計測", 豊田中央研究所R&Dレビュー, **32**-3(1997), 111
- 11) 名切ほか3名: "ドライビングシミュレータによる緊急時の回避運転挙動の解析", 自動車技術会学術講演会前刷集**941**, 9432543(1994), 17
- 12) 安田ほか3名: "人体の振動特性を考慮した乗り心地解析", 日本機械学会講演論文集, No.96-20(1996), 216

著 者 紹 介



土居俊一 Shun'ichi Doi

生年：1947年。

所属：人間工学研究室。

分野：車両運動・予防安全および人間機械系解析分野の研究。

学会等：日本機械学会，計測自動制御学会，自動車技術会会員。

1985年 IR100選入賞。

1993年 計測自動制御学会技術賞武田賞受賞。

工学博士。



水野雅彦 Masahiko Mizuno

生年：1959年。

所属：機械力学研究室。

分野：車両運動解析（タイヤ力学解析）。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。



畔柳洋 Hiroshi Kuroyanagi

生年：1966年。

所属：制御研究室。

分野：パラレルメカニズムの機構，制御法に関する研究。



本郷武朗 Takero Hongo

生年：1956年。

所属：機械認識研究室。

分野：運転支援，情報機器とのインターフェースの評価に関する研究開発。

学会等：計測自動制御学会，自動車技術会会員。



小島真一 Shin-ichi Kojima

生年：1964年。

所属：機械認識研究室。

分野：ドライバの認知行動の解析。

学会等：システム制御情報学会会員。