

ドライビング・シミュレータにおける 実車横運動の模擬評価の試み*

Trial to Evaluate Lateral Motion Characteristics of
Vehicle Simulated by Driving Simulator

荒木 一雄¹⁾・松浦 譲²⁾

KAZUO ARAKI and YUZURU MATSUURA

It is very effective to feed the accelerating feelings to the driver when the feeling perceived at driving is simulated by means of driving simulator. So the authors developed the equipments which could feed the forces to the driver on the simulator equivalent to the inertia forces during accelerating, braking and cornering. The performance of this simulator were examined and then some feeling estimations were performed for some subjects by using it. At the simulation of the feeling perceived at driving, it was found to be more necessary to feed the sense of sight depended on the motion of the steering wheel in addition to the inertia forces. So we developed the visual display unit which could simulate visually the lateral motion of the vehicle.

As the result of the feeling estimations, it was recognised that the sensuous characteristic of the visual display unit showed good fidelity to the actual one.

1. ま え が き

従来から各方面で視覚的、聴覚的に訴えるシミュレータには努力が払われ、かなり精巧で高級なものが見られる。シミュレータの使用目的が、単なる運転の訓練・教習からより高度な目的に移行しつつある現在、たとえばドライバの操縦特性を調べるためになると、視・聴覚の模擬に加え、物理的に力学的に等価な状態を模擬し付与する必要性が生じてくる。

ここ数年来、筆者らはドライビング・シミュレータにおいて加速度感・慣性力感を与える装置の開発研究を進めてきた。座席系移動回転法と重力加速度の応用によって、座席系の乗員の身体に直接運動を与え、実際の車両運動時に働く加速度と力学的に等価といえる状態を得た。また、それに基づきピッチ角、ロール角付与による加速度付与装置、ヨー角付与装置を設計・製作し、作動特性についても既に報告した。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ さらに加速度付与装置の実車操縦感模擬度について被験者ドライバによってある条件下でのフィーリング評価も行なった。⁽⁵⁾

横加速度模擬付与機構を持つ本シミュレータの実車横運動の模擬具合を評価するにあたって、視覚が体感におよぼす影響も大きいことから、模擬付与横加速度によく合ったフィードバック性を有するテレビ方式の模擬視覚表示装置を採用することにした。

またシミュレータの横運動模擬評価を試みるにあたって3名の被験者ドライバにおもにアンケート方式の模擬度の各項目別段階判定を行なわせ、補足意見を記述させて調べた。

*昭和53年1月17日原稿受理

1), 2) 大阪産業大学工学部交通機械工学科

2. 横加速度模擬付与装置

Fig. 1 に示すように基本的にPABQの4節回転連鎖機構を持ち、辺AB上に配置した座席系を移動回転させ、左右方向に傾斜を与える構造になっている。座席系を傾斜させることで座席上の乗員には傾斜面に沿って重力の分力成分が作用し、この力が実車旋回時などに乗員が受ける遠心力と等価となり、傾斜角およびその与え方を制御することによって実車旋回時の横加速度を模擬することができる。

機構の駆動源には圧縮空気を用い、ドライバのステアリングの左右の操作で副復動エアシリンダを伸・縮いずれかに作動させ、それに連結した主復動エアシリンダを左右に振り分けて、その後主復動エアシリンダを作動させる。またステアリング操作量に応じて圧力制御弁を働かせ、0から最大 20° のロール角を任意に付与することにより、0～約 $0.34g$ に相当する横加速度を与えることができる。

また本シミュレータには、横加速度模擬付与機構のほかに前後加速度を模擬するピッチ角付与機構と、鉛直軸まわりに座席系を回転させるヨー角付与機構も備えているが、今回の実験では使用しなかった。

また、運転室として軽自動車のボディキャビンの本装置上に積載し、座席、操縦装置、計器盤などを利用した。

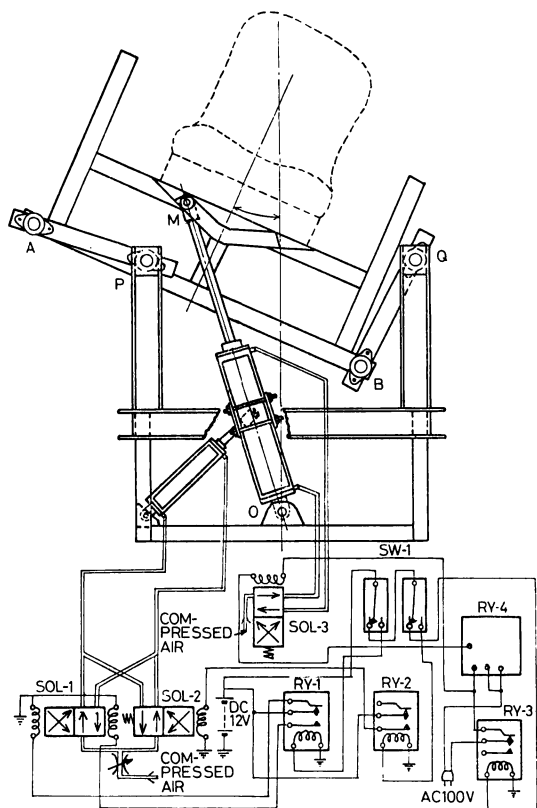


Fig. 1 Roll equipment and control circuit for its operation.

3. 模擬視覚表示装置

シミュレータの模擬視覚表示装置として要求される要素は、

- ① ドライバの操縦操作に対し、フィードバックされること。
- ② 被写体の形状が実際の形状とかけ離れていないこと。
- ③ 自動車運転時にドライバが感じる操縦感覚を模擬できること。

など、すなわち、ドライバに対していかに臨場感を与え得るかということである。現在、映画方式、スライド方式、かげ絵方式、電子回路方式、テレビ方式など各種の方式が採用されている。

従来から、本シミュレータでは簡易さ、画質、被写体の忠実度などの理由から8mmの映画方式を使用していた。ところが、シミュレータの操縦感覚を実車の場合と比較して評価するには、操縦操作による加速度付与装置の連成性および模擬視覚表示装置の対応性がとくに重要で、それぞれフィードバック性を有していることが要求される。そこで、映画方式にかわって操縦操作に対する制御性をもつリアルタイムのテレビ方式を採用した。これは道路模型をテレビカメラで撮影し、そのままテレビ受像機に映像を表示する方式で、ドライバが映像を見ながら操縦操作をすることで道路模型とテレビカメラの間に相対運動をもたらす、即、映像にフィードバックされる特徴を持っている。Fig. 2 に基本設計図、Fig. 3, 4 に製作した装置を示す。

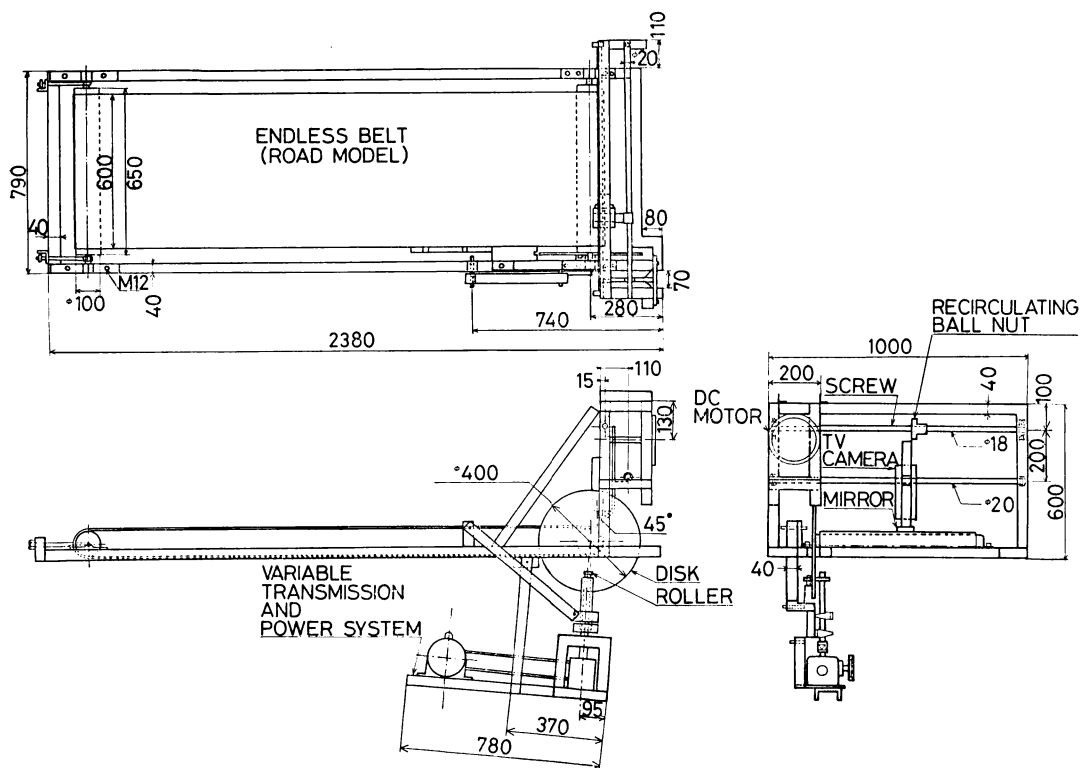


Fig. 2 Drawings of visual display unit.

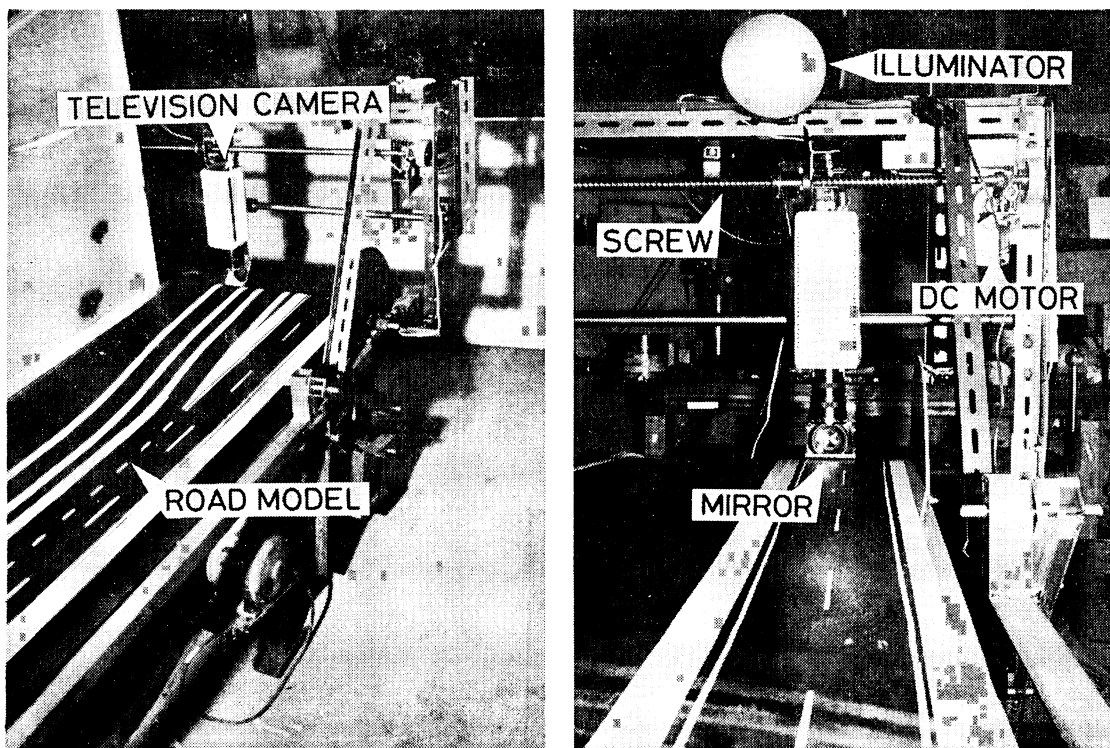
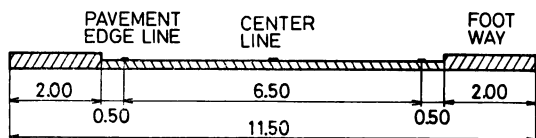


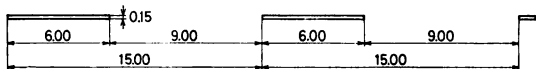
Fig. 3 Overall view of visual display unit.

3.1 道路模型

テレビ方式によってシミュレータの視覚表示をする場合、カメラを移動する方法と道路模型を移動する方法の二つがある。フライト・シミュレータなどの特殊な場合を除き、自動車用シミュレータには道路模型を移動する方法が一般的にとられている。今回製作した道路模型は図に示すように、全周長4m、全幅0.6mのゴム製のエンドレス・ベルトをコンベア状に水平に保持したものをを用いた。テレビカメラの倍率の関係から、 $\frac{1}{60}$ の縮尺でベルト上に道路模型を描いた。道路は3種類とし、2車線の直線一般道路、それに進入するS字をとまなうランプウェイおよびスラロームコースとした。道路模型



(a) Typical cross section of two lane road.



(b) Plane view of center line.

Fig.5 Dimensions of actual two lane road. (m)

3.2 道路模型駆動部

模擬視覚表示装置においてドライバに与える速度感を変化させるためには、テレビカメラに対して道路模型の移動速度を変化させればよい。この場合、模型比が $\frac{1}{60}$ であるから速度比も $\frac{1}{60}$ となる。Fig. 6に示す無段変速機を製作し、ベルト駆動用ローラの回転数を変化させた。これはモータとウォーム減速機入力軸をVベルトで結び、減速機出力軸に取付けた小径のゴム製ホイールでディスクプレート

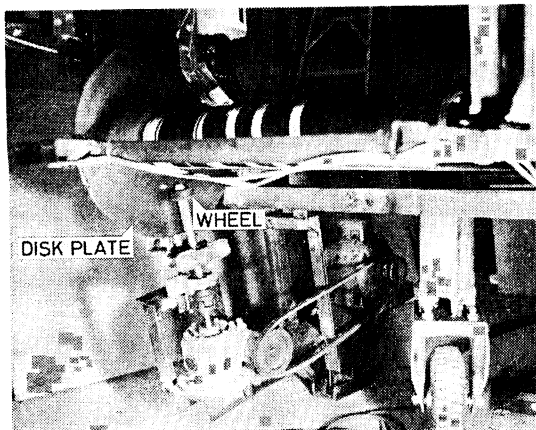


Fig.6 Variable transmission to operate road model.

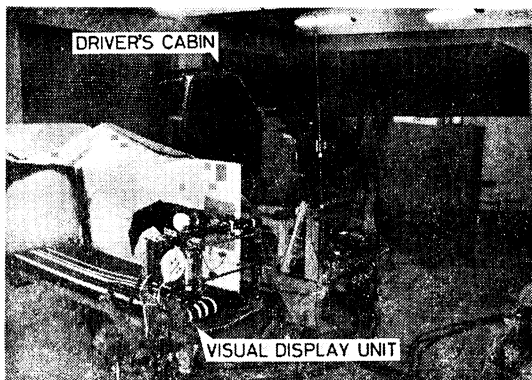


Fig. 4 Overall view of driving simulator system.

を描く際に参考とした実際道路の寸法を以下に示す。2車線の直線一般道路は、Fig. 5(a)に示すような一車線3.25mの幅員で両側に0.5m幅の側帯と2m幅の歩道をもつ総幅11.5mの道路構成とし、車道中央線にはFig. 5(b)のような15mを1ピッチとする幅15cmの破線を引き、また側帯と直線車線区分には幅15cmの実線区分標示とした。S字路は幅員4.25mとし、スラロームコースは40mおきにポイントマークを一直線状に並べたものとした。

Table 1 Speed range of road model corresponding to each pair of pulleys. プーリの交換による道路模型速度範囲

モータ側 プーリ寸法 (in.)	減速機側 プーリ寸法 (in.)	道路模型 速度範囲 (km/h)
2.5	7.0	9.8~20.6
2.5	3.5	19.6~41.1
5.0	3.5	39.3~82.3

が変化できる。このホイールの回転方向が常にディスクの接線方向を保持するように案内棒を取付けてある。また、ホイールのディスク上の半径方向位置を変化することによって得られる変速比は最大1:2.2であるため、それ以上の速度の変更はVベルトのプーリを交換することで行なう。Table 1 に各種のプーリを使用した場合の速度範囲を示す。

3.3 視覚表示装置

テレビ方式の模擬視覚表示装置に使用したテレビカメラおよびモニターテレビシステムの仕様を Table 2 に示す。

Table 2 Specifications of television camera and television used for visual display unit.

テレビカメラおよびビデオ受像機の仕様

型 式	WV-1000 (ナショナル製テレビカメラ)	型 式	WV-721 (ナショナル製ビデオ受像機)
電 源	AC100V 50/60Hz	電 源	AC100V 50/60Hz
消 費 電 力	約10W	消 費 電 力	約78W
撮 像 管	20 PE13A 17mm(2/8)セパレートメッシュ形ビジコン	ブ ラ ウ ン 管	114° 偏向 20型 500B×B4
レンズマウント	Cマウント(テレビカメラ用)	映 像 入 力	インピーダンス:75Ωまたはハイインピーダンス (スイッチ切替式)M形接栓 信号レベル:VS1.0Vp-p/75Ω M形接栓(コンジット信号)
同 期 方 式	電源同期	解 像 度	水平:600本以上(中心部にて) 垂直:850本以上
走 査 方 式	ランダムインターレース	水平走査周波数	15.75 kHz
水平走査周波数	15.75 kHz	垂直走査周波数	50/60 Hz
垂直走査周波数	50/60 Hz	映 像 帯 域 幅	8MHz±8dB
映 像 出 力	VS1.0Vp-p/75Ω (コンジット信号)(M形接栓)	音 出 出 力	最大2W
映 像 帯 域 幅	7MHz±8dB	ケ ー ブ ル	S:補償なし M:6MHzにて+4~+7dB L:6MHzにて+7~+10dB (8段スイッチ切替式)
S N 比	42dB	音 声 入 力	インピーダンス:ハイインピーダンス 信号レベル: 0dB ¹⁾ 回路
解 像 度	水平:550本(中心部にて) 垂直:300本(中心部にて)	V T R 入 力	映像入力:VS1.0Vp-p/ハイインピーダンス回路 音声入力:0dB/ハイインピーダンス1回路 (8pコネクタ)
感 度 調 整	自動(10000:1)のみ	切 割 温 度	-10℃~+50℃
最 低 照 度	101ux (F1.6にて)白熱灯	寸 法	90(幅)×96(高さ)×214(奥行)mm (レンズを除く)
推 奨 照 度	1001ux以上(F1.6以上にて)	重 量	約1.6kg
バックフォーカス	背面にて調整可		
切 割 温 度	-10℃~+50℃		
寸 法	90(幅)×96(高さ)×214(奥行)mm (レンズを除く)		
重 量	約1.6kg		

自動車走行時にハンドルを操作すると、自動車は操舵方向へヨー角を変化しながらその方向へ進行する。したがって、この状態を模擬するためには、テレビカメラを模型道路移動方向と直角方向へ移動させると同時に移動方向へカメラを向けるヨー変化を与えなければならない。これを容易にするため、カメラを模型道路と垂直となる立形とし、45°に配置した反射鏡を介して前方の道路風景を撮影する方式をとった。この方式では、カメラ-反射鏡システムをカメラ光軸まわりに回転させることにより、ヨー角変化が模擬できる。ヨー角変化付与にはかなり高度な制御系を必要とすることや、前述した程度のコースをもつ道路模型では予備実験を行なったところ、ヨー角変化を与えなくてもあまり異和感がないことから今回はヨー角変化は行なわないことにした。カメラの横移動には Fig. 7 に示すように直流12V 3000rpm

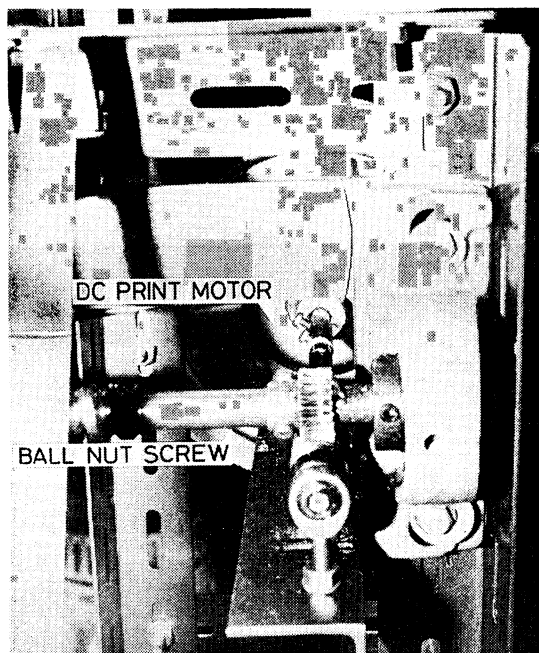


Fig. 7 Drive train to move television camera.

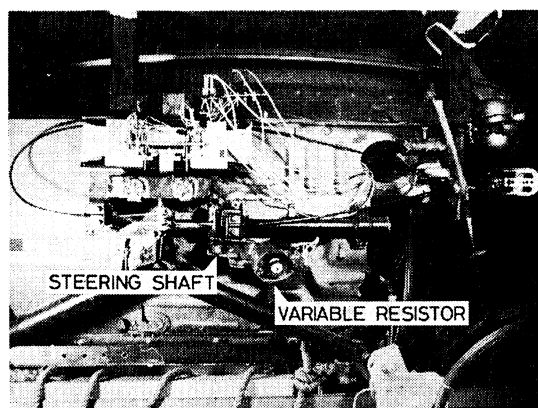


Fig. 8 Variable resistor connected with steering shaft.

150W のプリントモータを使用し、その回転をウォームホイールを介してボールナットスクリュに伝える機構とした。この場合、モータへの供給電圧を変化することでカメラの横移動速度を変化することができる。このため、操舵角に応じた運動をカメラに与えるべく Fig.8 に示すように可変抵抗器をステヤリング軸に連結した。

Fig. 9 にカメラを任意の速度で横移動させるための制御回路を示す。また、光学系が模型道路ベルト幅から逸脱しないようにリミットスイッチを設けた。カメラで撮影した映像をシミュレータのフロントウインド部に設置したモニタテレビ (Fig. 10) に写し、視覚情報とした。

Fig. 11 にモニタテレビに写し出された各種道路を示す。

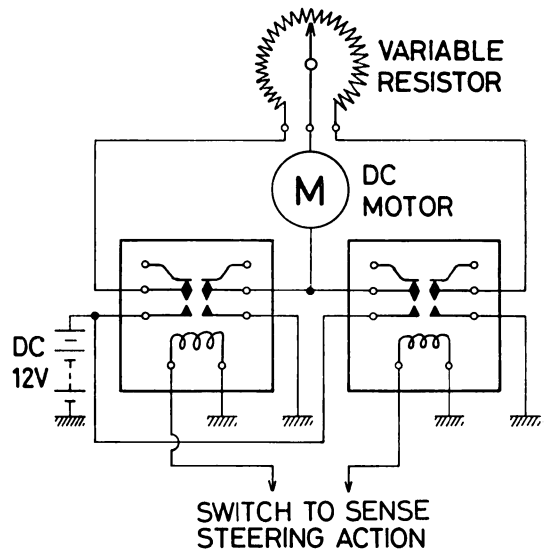


Fig. 9 Electric circuit to control motion of television camera.

4. 横運動の模擬評価の試み

4.1 方法

シミュレータの模擬視覚表示装置の実車模擬忠実度を評価する場合、その忠実度は Table 3 のように物理的な特性と知覚的な特性に分類される⁽⁶⁾。前者は本質的、客観的なものであり、後者は人間の錯覚も利用した主観的なものである。理想的にはこれらすべての項目を実車と同一に再現できれば良いわけであるが、規模と費用の関係から一般的には使用目的に応じて無視してもよいか、あるいは重視しなくてもよい項目は割愛もしくは最小値に収める方法がとられている。したがって今回の評価に関しては表より基本的な評価項目を選び、3名の被験者ドライバに対して実車横運動に対する模擬具合を5段階評価で回答させた。また、シミュレータの実車感模擬度の評価基準・評価方法を確立することを目的として各評価項目の評価選択理由を補足意見の形で詳しく記載してもらう方式を採用した。

Table 4 に被験者の構成を示し、Table 5 に評価項

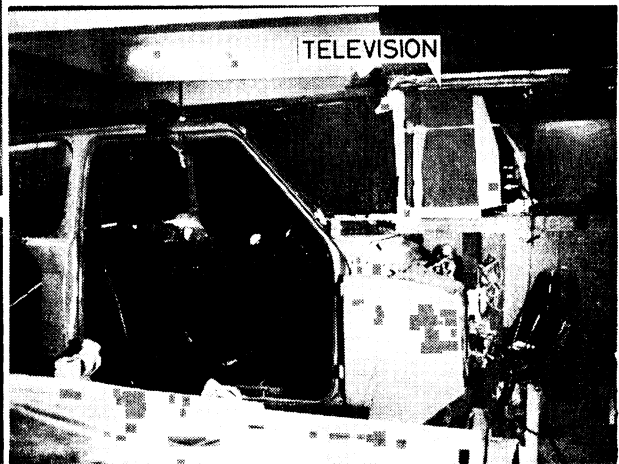


Fig. 10 Television installed at front windshield.

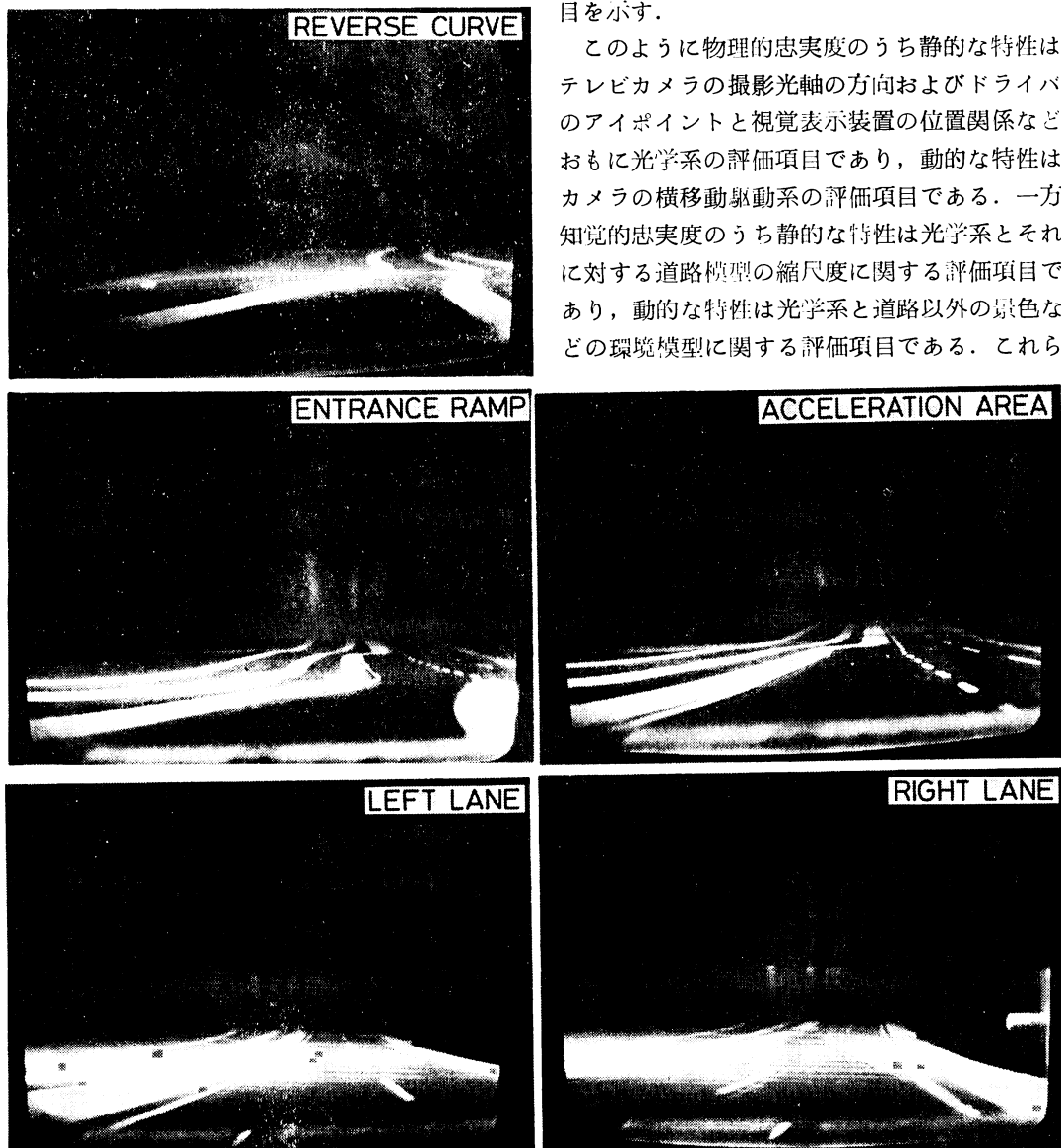


Fig. 11 Simulative roads shown on television.

Table 3 Physical and sensuous fidelities of visual information.

視覚模擬対象の物理的および知覚的忠実度

物理的忠実度		知覚的忠実度	
静 的	動 的	静 的	動 的
<ul style="list-style-type: none"> ○ 分解能 ○ 歪と視野との幾可学的関係 ○ 背景 ○ 遠近による濃淡 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 車体姿勢・運動との幾可学的関係 ○ 時間関数としての特性 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 鮮明さ ○ シャープ ○ きめの細かさ ○ 被写体の忠実度 ○ 遠近感 ○ 距離感 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 車体姿勢 ○ 運動の知覚 ○ 視野の流れ ○ 速度感 ○ 旋回感

目を示す。

このように物理的忠実度のうち静的な特性はテレビカメラの撮影光軸の方向およびドライバーのアイポイントと視覚表示装置の位置関係などおもに光学系の評価項目であり、動的な特性はカメラの横移動駆動系の評価項目である。一方知覚的忠実度のうち静的な特性は光学系とそれに対する道路模型の縮尺度に関する評価項目であり、動的な特性は光学系と道路以外の景色などの環境模型に関する評価項目である。これら

Table 4 Composition of subjects for feeling estimation.

被験者の構成

被験者	性別	年齢	免許歴	比較対象車
A	男	22才	2年10ヶ月	ランサー
B	男	22才	3年1ヶ月	バイオレット
C	男	22才	2年2ヶ月	サニー

Table 5 Items of feeling estimation to evaluate physical and sensuous fidelities of visual display unit.

模擬視覚表示装置の実車模擬忠実度

評価項目		異なる	-4	-3	-2	-1	0 同等	意見
物理的忠実度	静的	視 点	_____					
	動的	視角の方向	_____					
	動的	操縦操作との対応性(応答性)	_____					
知覚的忠実度	静的	距離感	_____					
		遠近感	_____					
	動的	道路の幅員	_____					
		視野の流れ	_____					
総合評価			_____					

感覚および体感について実車操縦時と比較させ、5段階評価で回答させた。Table 6, 7 に評価項目を示す。

シミュレータの模擬状態はつぎの3通りとし、それぞれの場合について評価をさせた。なお実験は1), 2), 3)の順で行なった。

Table 6 Items of feeling estimation to evaluate feeling perceived at driving.

シミュレータの操縦感覚

評価項目		異なる	-4	-3	-2	-1	0 同等	意見
緊張感			_____					
走行感			_____					
速度感			_____					
方向変換感	移動感		_____					
	回転感		_____					
総合評価			_____					

の項目に対する評価を知ることにより、模擬視覚表示装置の基本的な特性を知ることができる。

製作した模擬視覚表示装置は進行速度を変化させることができるが、今回は第1段階として実車横運動のみの模擬度について評価させたため、30km/h一定とし、シミュレータのアクセルペダルやブレーキペダルとは連動させなかった。また、模擬視覚表示装置の評価を対象としているため、加速度付与機構のうちピッチ角付与機構およびヨー角付与機構は作動させず、操舵角に対応した横加速度の得られるロール角付与機構だけを作動させた。また、このときのシミュレータの操縦

Table 7 Items of feeling estimation to evaluate bodily sensation.

身体に作用する力の感覚

評価項目	異なる	-4	-3	-2	-1	0 同等	意見
操縦操作との連成性		_____					
身体の回転移動具合		_____					
身体のふられ具合		_____					
上下肢部への力のはり具合		_____					
腰部の安定性		_____					
頭部の安定性		_____					

- 1) 模擬視覚表示装置で30km/h走行時の画像を付与し、聴覚的に走行音を付与した場合。
- 2) 模擬加速度(ロール角0~±20deg.)を付与した場合。
- 3) 1)の画像および走行音と2)の模擬加速度の両者を付与した場合。

また、模擬視覚表示装置作動時の走行条件はつぎのように設定した。

- ① 車線内直線走行の保持。
- ② 2車線内での自由な車線変更。
- ③ ポイントマーク間のスラローム走行。
- ④ S字カーブを含む一般道路走行後、入口ランプより本線に流入し、その後自由走行。

なお、被験者には道路模型および撮影部を見せないようにし、被験者間の会話もさせないよう配慮した。

4.2 結果および考察

被験者ドライバーに対してアンケート方式に加えて補足意見を書かせる形式のフィーリング評価を

行なったところつぎのような結果を得た。

模擬視覚表示装置の実車模擬具合の評価結果として、静的な物理的忠実度のうち「視点」に関しては、2名が「わずかに差がある」「差が感じられない」と評価しており、撮影光軸の方向が実車の場合と同等であることがわかる。「視角の方向」については、評価がばらついた。「差を感じた」という理由の一つは眼の位置に対するテレビ画面の設置位置が不適切であることで、このことは被験者Cから補足意見として指摘された。

また、動的な物理的忠実度である「操縦装置との対応性」については、2名が「わずかに差がある」とかなり良い評価をしており、今後、制御回路を精密なものに改良することによりさらに実車感が得られると考えられる。

静的な知覚的忠実度のうち「道路の幅員」については2名が「わずかに差がある」、1名が「差が感じられない」と評価しており、道路模型の縮尺とカメラの倍率が良く調和し、かなり忠実に実物を模擬していることがわかる。一方、「距離感」については「明らかに差がある」が2名、「わずかに差がある」が1名であり、「遠近感」については3名中2名が「かなり差がある」と評価している。このことより、「距離感」はある程度つかめるものの「遠近感」がつかみにくいことがわかる。この理由として被験者Cは「視界が前方のテレビだけであるため視野が狭く、さらに道路以外の景色がないため」と述べている。それには、電柱、樹木などの環境模型を設けることで「距離感」「遠近感」の向上がはかれるであろう。

動的な知覚的忠実度である「視野の流れ」に関しては3名中2名が「差がある」と評価しており、これは今回環境模型を持たない平面的な道路パターンだけをベルトに描いた道路模型を採用したためであり、今後、道路以外の環境模型と対向車や先行車などを組み入れることによってさらに効果が上がると考えられる。

また、シミュレータの操縦感覚に関する評価結果のうち、「方向変換感」については画像および走行音だけを付与した場合に比べ、それに加えさらに模擬加速度を付与することにより両者を付与したことによる相乗効果が見られ、評価結果が向上している。しかし、「走行感」「速度感」に関しては逆に評価結果が低下し、また「緊張感」に関しては変化がなかった。この理由として、被験者の意見からもわかるが、現在、本機のロール角付与機構におけるハンドルの切れ角とそれによって得られる横加速度の対応が適切でないこと、およびハンドルを操作することによるロール角付与機構の作動時のショックなどが影響し、操縦感覚を低下させたと考えられる。

一方、模擬加速度だけを付与した場合の操縦感覚は、めくら運転と同様であるため「緊張感」「走行感」「速度感」などの項目の評価結果はあまり良くなく、「方向変換感」だけが他に比べやや良い結果を得た。さらに画像と走行音を加え付与した場合はすべての項目において評価結果は良くなった。

つぎに、乗員が実走行時に身体に受けている諸力と、シミュレータ上で模擬された加速度すなわち力との差異について体感の感覚評価を行なった。この結果、模擬加速度だけを付与した場合とさらに画像および走行音を加え付与した場合は、あまり違いは見られず、「腰部の安定性」についてだけは両者を付与したことにより評価結果が若干悪くなった。この理由として被験者AおよびCは「模擬視覚表示装置だけでもかなり実車操縦感があるため、模擬加速度付与機構の応答性の悪さ、作動時のショックなどが実車感を損ねている」と述べており、このことから、体感も視聴覚によって影響されることがわかる。したがって、模擬加速度付与機構の作動も模擬視覚表示装置と連動させる必要がある。

5. ま と め

ドライバの操縦操作に対し、フィードバック性を持つテレビ方式の模擬視覚表示装置を製作し、その実車模擬忠実度についておもにアンケート方式で評価を試みた。さらに、ドライバに体感として加速度を与えることのできる装置を持つドライビング・シミュレータと組合せ、模擬加速度または画像

・走行音のどちらか片方，あるいは両方ともを付与した場合における実車感模擬度についても評価を試みた。

その結果と今後の改良点についてまとめるとつぎのようになる。

- 1). 模擬視覚表示装置の物理的な実車模擬忠実度はかなり良く，カメラ駆動制御回路を精密にすることによりさらに忠実度が増すと考えられる。
- 2). 模擬視覚表示装置の知覚的な実車模擬忠実度については，道路模型の縮尺と光学系の調和はかなり良いことがわかった。さらに，環境模型や他の自動車を組入れることにより，かなり模擬忠実度が高まると考えられる。
- 3). シミュレータの操縦感覚のうち，「方向変換感」は模擬加速度を付与することにより，視・聴覚だけよりも両者の相乗作用により実車感が強くなった。またその他の項目の評価結果より模擬加速度付与機構の作動時の円滑さ，操縦操作との対応性を改良する必要があることがわかった。
- 4). 走行時に身体に作用する感覚評価についても視・聴覚は影響をもたらすため，前述と同様に視・聴覚に対応した模擬加速度を与える必要がある。

今後の課題として，前述した以外にアクセルペダルやブレーキペダルと連動して道路模型の速度を変化させ，さらにカメラの駆動に関しては撮影光軸の方向を実車操縦時の車両の向きと同一になるようにヨー変化をさせる必要がある。

このような装置の物理的な特性の改良と並行して，シミュレータの操縦感についてドライバーの知覚的な要素を求明することも必要であり，力学的な量と人間の受感度の対応について，工学的と医学的の両面から考えていかなければならない。

参 考 文 献

- (1) 浅野・松浦，日本自動車研究所研究速報第27号(昭49-9)。
- (2) 浅野・松浦，自動車技術会学術講演会前刷集，No.742(昭49-10)，523。
- (3) 松浦・浅野・荒木，自動車技術会学術講演会前刷集，No.762(昭51-11)，762。
- (4) 松浦・荒木，大阪産業大学論集，自然科学編52号(昭52-10)，38。
- (5) 荒木・松浦・浅野，自動車技術会学術講演会前刷集，No.772(昭52-12)，385。
- (6) 栗山・永田，シミュレータとその利用に関する講習会教材(昭50-3)，9，自動車技術会。