

3次元没入型ビークルシミュレータのシステム開発と応用

System Development and Application of A Three-dimensional Immersive Vehicle Simulator

○ 山本 敬一 (慶大院) 森 幸弘 (慶大院) 西村 秀和 (慶大院)
立山 義祐 (慶大院) 小木 哲朗 (慶大院) 北村 憲康 (東京海上日動 RC)

Kei-ichi YAMAMOTO, Keio University, Hiyoshi 4-1-1, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa
Yukihiro MORI, Keio University
Hidekazu NISHIMURA, Keio University
Yoshisuke TATEYAMA, Keio University
Tetsuro OGI, Keio University
Noriyasu KIRAMURA, Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co.,Ltd.

We have developed a vehicle simulator consisting of a three-dimensional CAVE display and a steering system which considers a steering reaction force. The CAVE provides stereoscopic vision in real time according to the movement of an eye position of a driver. Experiments for test subjects are carried out to validate the vehicle simulator and analyze the driver's behavior. Also from the analyzed data the feasibility of contribution to the driver's safety utilizing the vehicle simulator are discussed.

Key Words: Driving Simulator, Virtual Reality, CAVE, Vehicle Dynamics, Driver-Vehicle System

1. はじめに

日本の死亡事故件数は年々減少しているが、65歳以上の高齢ドライバーが関係する死傷事故は増加している。そうした中、実走行に近い運転状況を再現することで、ドライバーの行動分析や安全教育、さらには予防安全技術の向上に資するドライビングシミュレータの開発が行われている。

須田らは、360度の映像を映写するスクリーンを用いたドライビングシミュレータを開発している [1]。ここでは、6自由度の運動が可能なターンテーブル機構により車両挙動を模擬し、車両のダイナミクスの研究などに用いている。秋田らは、前方3面スクリーンからなる定置型ドライビングシミュレータを用い、車線変更支援システムを対象に、支援システムに対するドライバーの信頼感を検証している [2]。しかし、2次元映像を用いたシミュレータが一般的であり、ディスプレイに表示される映像の視点位置は固定され、ドライバーの視点位置が反映されていない。一般的に運転に必要な情報の80%は視覚から収集されるといわれており、視覚の老化に伴う距離を把握する深視力、視野の広さなどが事故の要因として挙げられる。

そこで本研究では、ドライバーの視点の動きに応じて、投影する立体映像をリアルタイムに変化させることができる3次元没入型(以下、CAVE)ディスプレイを活用したビークルシミュレータを開発した。まず、CAVEディスプレイと製作した操舵系台上試験装置からなる3次元没入型ビークルシミュレータのシステム構成を示す。次に、狭い路地に進入するような右折場面を想定した被験者実験を行い、シミュレータの妥当性を検証すると共に、ドライバー行動を分析する。最後に、当該シミュレータの活用によるドライバーの安全教育や車両の予防安全技術に資するための技術的課題を論じる。

2. 3次元没入型ビークルシミュレータシステム

2.1. 3次元没入型ディスプレイ 図1に示すように、走行映像を映し出す3次元没入型ディスプレイ(A Cave at keio university, 以下 K-Cave)は、ディスプレイが正面、左面、右面、床面の4面で構成されている [3]。それぞれのスクリーンの大きさは、たたみ三畳分ほどであり、運転席は、4面のスクリーンで囲まれた空間の中に配置される。プロジェクタによる



Fig.1 K-Cave: A Cave at keio university

高精細の立体視映像を大画面スクリーンに投影することで、没入感、臨場感の高い仮想空間を生成することが可能となる。

図2に3次元没入型ビークルシミュレータのシステム構成を示す。ドライバーには、磁気センサが埋め込まれた3Dメガネを着用してもらう。この磁気センサにより、ドライバーの視点位置の動きを空間位置3自由度と回転角3自由度、計6自由度で検出することができる。検出された視点位置は制御用コンピュータに送られ、視点位置に対応した映像がリアルタイムに生成される。映像のレンダリングには、1スクリーンにつき1台のコンピュータが使用される。ポリゴン表示能力は、おおよそ2.5億/秒である。レンダリングされた映像は、液晶プロジェクタから円偏光フィルタを通してスクリーン背後から投影される。なお、床面スクリーンには、ミラーを介して投影する仕組みとなっている。スクリーン1面で、左目用と右目用の映像にそれぞれ1台ずつプロジェクタを使用する。

K-Caveを活用することで、図1のように利用者が3Dメガネをかけて運転席に座ると、視野全体に立体映像が広がる。運転席の前方には自動車のボンネットが、左右にはサイドミラーが浮かび上がる。アクセルを踏み発進すると、視野全体に広がる映像が後ろに流れていく。

2.2. 操舵系台上試験装置 実車に近い感覚での運転を実現するために、図3に示すような実車に用いられるハンドル、アクセル・ブレーキペダルを用いて操舵系台上試験装置を製作した。

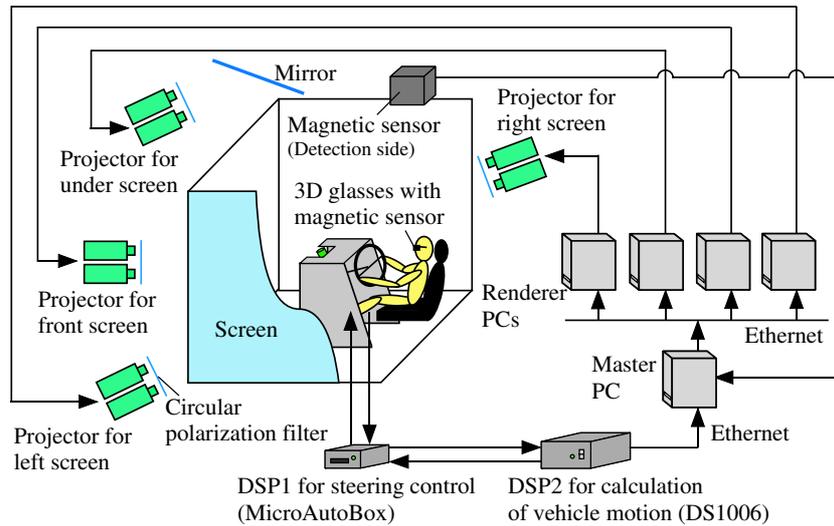


Fig.2 K-Cave-vehicle simulator system

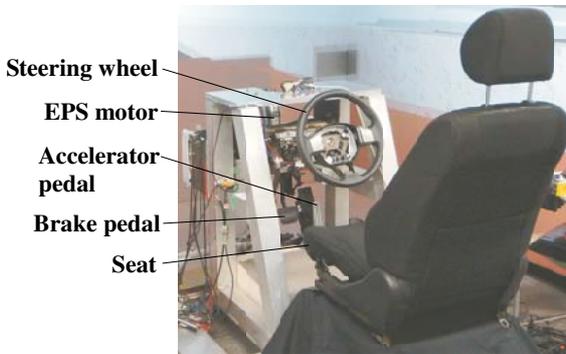


Fig.3 Experimental setup of steering system

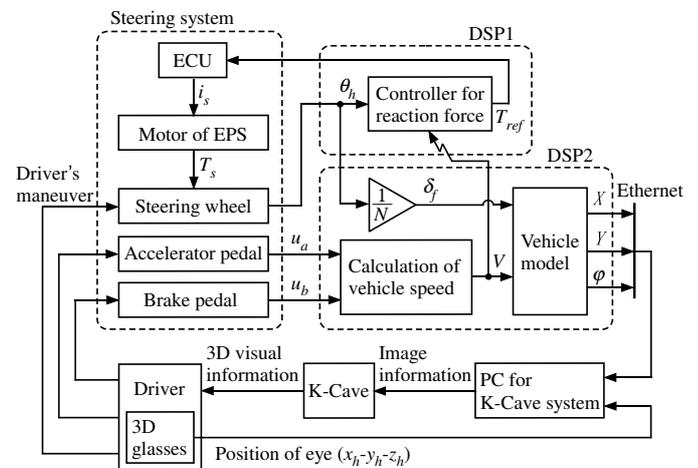


Fig.5 Calculation of vehicle motion by HILS



(a) Front view (b) Side view

Fig.4 Accelerator and brake pedal

ハンドルは、時計・反時計まわりに $\pm 565 \text{ deg}$ 回転することができる。また、ハンドルには、ハンドル角検出用のセンサが取り付けられており、検出したハンドル角は、ステアリング反力制御に用いられる。ステアリング軸には、ドライバーの操舵をアシストするために、通常用いる電動パワーステアリング (Electric Power Steering, 以下 EPS) 用モータが備え付けられている。本論文では、この EPS モータを簡易的にステアリング反力を生成するために用いる [4]。

図 4(a) にアクセル・ブレーキペダルの概観を示す。アクセルペダルには、ドライバーによるペダルの踏み込み量を計測するためのセンサが内蔵されており、踏み込み量を電圧として検出できる。ブレーキペダルには、図 4(b) に示すように、ペダル反力をドライバーに与えるためのばねが接続されており、踏み込み量の検出にはレーザー式変位センサ (KEYENCE 製 LB-080) を用いている。

2.3. 車両運動の計算 車両運動の計算にはデジタルシグナルプロセッサ (Digital Signal Processor, 以下 DSP) を用いる。計算は、操舵系台上試験装置と連携する Hardware in the Loop Simulation, あるいは人間の操作を介するという意味で Human in the Loop Simulation と呼ばれる HILS 環境で実行される。

図 5 に HILS 環境で車両運動を計算するシステム構成を示す。ドライバーは、K-Cave に映し出された 3D 映像からハンドル、アクセル、ブレーキの操作を行う。ハンドル角センサから検出されたハンドル角 θ_h は DSP1 (dSPACE 製 MicroAutoBox1401) を介して DSP2 (dSPACE 製 DS1006) に送られる。また、アクセルペダルの踏み込み量 u_a とブレーキペダルの踏み込み量 u_b は DSP2 に入力され、車速 V の算出のために用いられる。

DSP1 では、ハンドル角と車速を用いて、ステアリング反力を算出する。本論文では、簡易的にハンドル角に応じた剛性をステアリング軸に与え、車速が増加するにしたがい剛性を大きくし、ドライバーに手応えを与える工夫を施している。得られた指令トルク T_{ref} により、電子制御ユニット (Electronic Control Unit, 以下 ECU) を介して電流 i_s によって EPS 用モータを駆動する。ハンドルにはステアリング反力 T_s が与えられる。

一方、DSP2 ではハンドル角 θ_h をステアリングギア比 N で割った前輪実舵角 δ_f と車速 V を車両モデルに入力する。本論文では、比較的車速の変化が緩和である走行条件を設定し、図 6

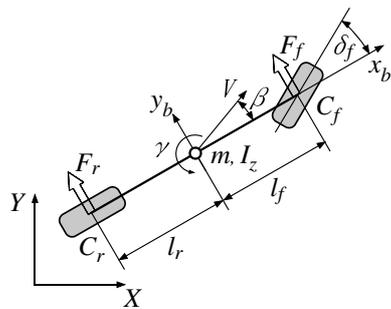


Fig.6 Vehicle model

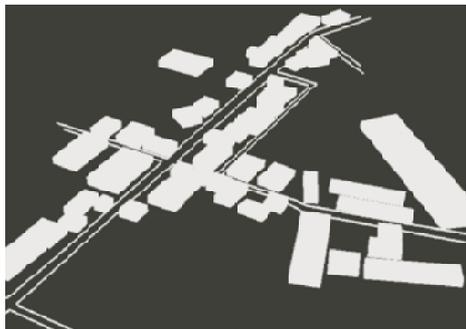


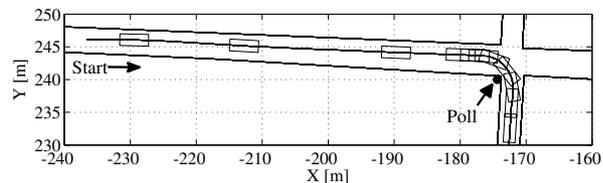
Fig.7 Overview of test course

に示す前後それぞれの左右輪が車軸の中心位置に集中しているとみなした二輪車両モデルで対応した。ここで、車両モデルの記号および諸元を付録に示す。車両状態から車両の X, Y 方向変位、およびヨー角 φ を求め、Ethernet 経由で K-Cave の制御用コンピュータに送信され、映像との同期がとられる。すなわち、車両軌跡とドライバの視点位置に応じた走行映像が K-Cave に映写され、3次元没入映像としてドライバに呈示される。

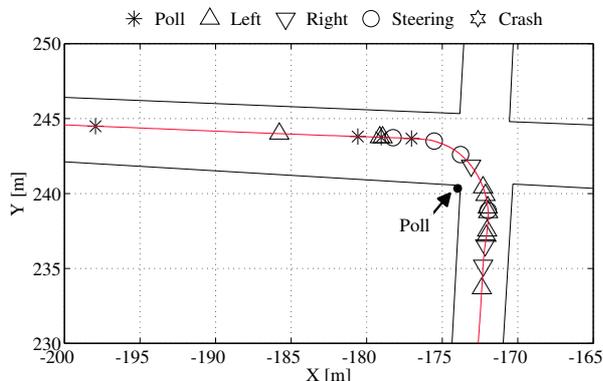
3. 被験者実験

3.1. 実験条件 当該シミュレータの妥当性を検証し、今後の応用の方向性を検討するために、被験者実験を試みた。走行してもらったコースは、実際に慶應義塾大学日吉キャンパス付近にある街中を、地図のトレースデータに建物の高さ情報を追加して作成した3次元の仮想空間である。そこでは、右折して道幅約 3.4 m の狭い路地に進入する場面を設定し、道の側面を壁として表現した。シミュレータに用いる車両サイズは車長 4.95 m、車幅 1.8 m である。また、被験者が注視した点を計測するために、被験者には 3D メガネの上から視線計測装置 (nac 製 EMR-9) が備え付けられた帽子を着用してもらった。3次元没入環境下であるため、より実際に近い視線位置が計測できると考えられる。

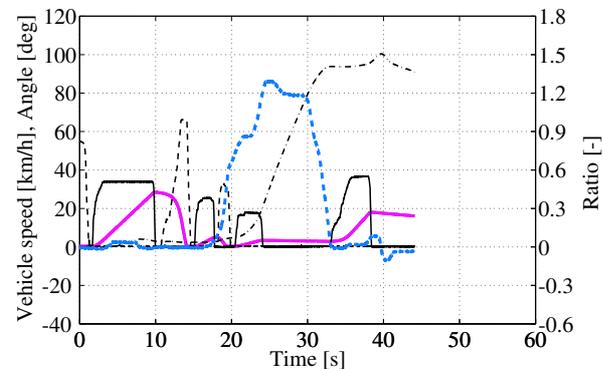
3.2. 実験結果 図 8 と図 9 にそれぞれ 20 代の被験者 1 と 40 代の被験者 2 による走行実験の結果を示す。図 8 と図 9 において、図 (a) は 3 s おきに車両を表示した走行軌跡、図 (b) は右折路付近でのドライバ行動、図 (c) はドライバ行動と車両状態の時刻歴応答をそれぞれ示している。ここで、図 (b) 凡例中の "Poll" はドライバが右折路の角に設けられたボールを注視した地点、"Left" は進行方向左側を注視した地点、"Right" は進行方向右側を注視した地点、"Steering" はハンドルを切り始めた地点 (保舵からの切り始めを含む)、"Crash" は車両が道側面の壁に接触した地点をそれぞれ表している。図 (c) 凡例中の "Accelerator" と "Brake" はそれぞれアクセル・ブレーキペダルの踏み込み量 $u_a \in [0, 1]$, $u_b \in [0, 1]$ である。"Steering angle" を $360 \text{ deg} = 1.0$ とした比で表している。



(a) Vehicle trajectory Y-V



(b) View point and handling of driver

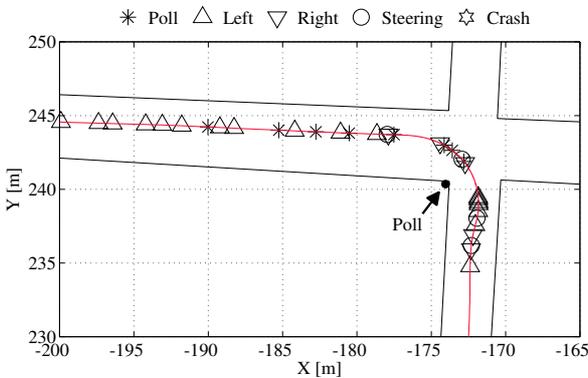
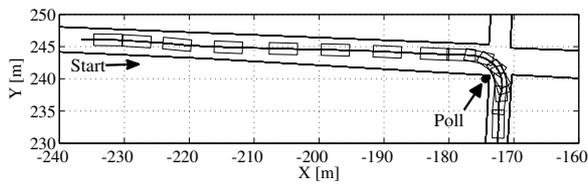


(c) Driver's behavior and vehicle state

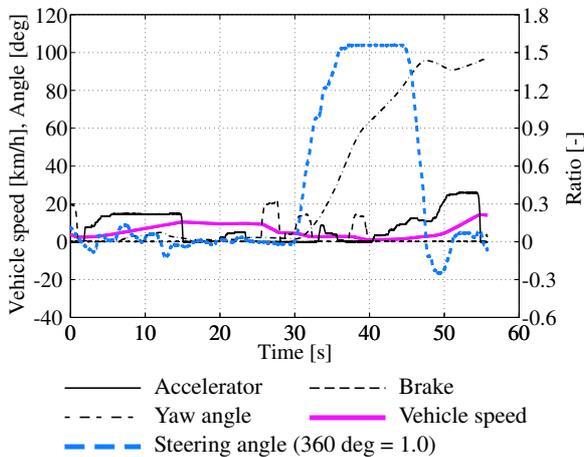
Fig.8 Experimental result to test subject 1

図 8(a) と図 9(a) から、被験者 1, 2 共に右折時に壁への接触はなく、右折できていることがわかる。図 8(b) と図 9(b) から、直進走行時では、被験者 1 に比べ被験者 2 は狭い路地への右折に配慮し、左方向を注視することで道の左側面と車両との間隔に注意を払い、右折に備えて運転していることがわかる。

右折時では、図 (c) から被験者 1, 2 共にほぼ同様の地点から操舵を始めているが、被験者 1 はアクセルを踏み、車速を調整しながら時刻 21.5 s 付近で一度保舵に入り、そこからハンドルを切り増し、ハンドルを切る量を走行状況に応じて調整している。一方、被験者 2 は操舵を始めてから一気にハンドルの最大回転角まで切っていることがわかる。これは、右折路が直角で狭いため、ハンドルを大きく切らないと右折できないという心理が働いたものと考えられる。しかしながら、図 9(a) に示す車両軌跡は若干大回りとなり、壁に接近している。これより、被験者 1 では操舵角の最大振幅が約 +463 deg であるのに対して、被験者 2 では約 +565 deg まで達していることから、単に注視回数が多いことが、理想的な運転を実現するとは限らないと考えられる。また、アクセル・ブレーキペダルの踏み込み量の応答から、被験者 2 は、小刻みに加速とブレーキを繰り返し、ドライバが目標とする車速を達成できていないと考えられる。



(b) View point and handling of driver



(c) Driver's behavior and vehicle state

Fig.9 Experimental result to test subject 2

このことが的確に舵を定められない要因の一つであると考えられる。

4. ビークルシミュレータの応用と技術的課題

3章の被験者実験では、3次元没入環境の利点を活かした視線計測結果およびドライバ行動と車両の走行軌跡の関係から、ドライバの運転特性を分析した。被験者からは、見通しの悪い交差点に差し掛かったとき、前方に身を乗り出すことにより、視界が広がり周囲の安全確認がしやすいというシミュレータへのコメントが寄せられた。得られたデータから、優良ドライバ、事故リスクの高いドライバ、高齢ドライバの特徴的な行動を抽出して安全教習に役立てたり、利用者に具体的な改善アドバイスを与えたりすることが可能となる。また、安全教育のみならず、例えば、低摩擦路でタイヤが滑るのを防止するアンチロック・ブレーキ・システム (Anti-lock Braking System, ABS) の効果を確認するなど、安全な制御システムの設計・開発段階の機能評価への応用の可能性が広がると考えられる。

今後は、操舵時にタイヤからステアリング軸に作用する路面反力を忠実に再現するためのアクチュエータを操舵系台上試験装置に取り付ける予定である。そして、EPS モータを操舵アシ

スト制御用として使い、操舵感の向上を図る。また、車両の内装を実車に近い映像で再現し、歩行者、他車を想定した実路の交通環境を模擬した実験を行う映像づくりが課題である。

5. まとめ

ドライバの視点の動きに応じて、投影する立体映像をリアルタイムに変化させることができる3次元没入型ディスプレイを活用したビークルシミュレータを開発した。CAVEディスプレイと製作した操舵系台上試験装置からなる3次元没入型ビークルシミュレータシステムの構成を示した。そして、狭い路地に進入するような右折場面を想定した被験者実験を行い、ドライバ行動と車両の走行状態の関係から、ドライバの運転特性を分析した。

今後は、歩行者、他車を含む実路に近い交通を模擬したシミュレータ環境での被験者実験を通して、安全教育や車両制御システム設計の指針を検討する予定である。

謝辞

本研究の一部は文部科学省グローバルCOEプログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」に依るものであることを記し、謝意を表す。

付録

車両モデルに用いた記号ならびに諸元を示す。

C_f, C_r	前輪, 後輪のコナリングパワー
F_f, F_r	前輪, 後輪のコナリングフォース
i_s	EPS モータへの指令電流
I_z	車両のヨー慣性モーメント
l_f, l_r	車体重心から前輪および後輪までの水平距離
m	車両質量
N	ステアリングギア比
u_a, u_b	アクセルペダル, ブレーキペダルの踏み込み量
T_{ref}	指令ステアリング反トルク
T_s	ステアリング反トルク
V	車速
$X-Y$	路面固定座標系
x_b-y_b	車両固定座標系
$x_h-y_h-z_h$	K-Cave でのドライバの視点位置
β, β_f, β_r	車両の横滑り角, 前後輪の横滑り角
δ_f	前輪実舵角
γ	ヨーレート
φ	ヨー角

$$C_f=76744 \text{ N/rad}, C_r=119320 \text{ N/rad}, I_z=2243.1 \text{ kgm}^2, \\ l_f=1.1281 \text{ m}, l_r=1.4719 \text{ m}, m=1422 \text{ kg}, N=16$$

文献

- [1] 山口大助, 須田義大, 織田利彦, 大貫正明, 石川裕記, 洪一基, 研究用ユニバーサルドライビングシミュレータの臨場感向上の取り組み, 自動車技術会春季学術講演会前刷集 No.61-09, pp.11-14, 2009
- [2] 秋田時彦, 堤成可, 和田隆広, 土居俊一, センサ認識信頼度を考慮した車線変更支援システム, 自動車技術会春季学術講演会前刷集 No.61-09, pp.1-6, 2009
- [3] Tateyama, Y., Ogi, T., Nishimura, H., Kitamura, N., Yashiro, H., Development of Immersive Virtual Driving Environment Using OpenCABIN Library, 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (INVITE'2009), pp.550-553, 2009
- [4] 森野大介, 小嶋英一, 西川昌宏, 山崎徹, ステアリングシミュレータによる操舵フィーリング向上制御の検討, Dynamics and Design Conference 2010 CD-ROM 論文集, 2010