

通常走行から緊急時に至るドライバの運転動作モデル

天野也寸志，羽田昌敏，土居俊一

A Model of Driver's Behavior in Ordinary and Emergent Situations

Yasushi Amano, Masatoshi Hada, Shun'ichi Doi

要 旨

車両の予防安全性を向上させるためには，車両単体だけではなく人間自動車系として性能を評価しなければならない。そこで，本研究ではその評価をコンピュータシミュレーションにより行うことを目的として，一般ドライバの運転動作の特徴を模擬するドライバモデルの構築を行った。本モデルは，レーンチェンジのような通常走行時から直進走行中に障害物が突然飛び出すようなあるいはカーブ路走行中に路面 μ が急変するような緊急時に至るドライバ挙動を模擬している。このモデル

の特徴は，1) ドライバの内部モデルの概念を導入することにより，試行錯誤的ではなくシステムティックにパラメータ調整をすることが可能なモデルを構成し，2) 操舵と制動を複合した緊急回避動作をモデル化した，さらに，3) 人間自動車系として不安定になるような運転動作をモデル化した点にある。次いで，このモデルを用いたシミュレーションにより，提案したモデルがドライビングシミュレータ等の実験におけるドライバ挙動の特徴を模擬できていることを確認した。

Abstract

To improve the active safety of vehicles, not only the stability of vehicles but the analysis of driver's behavior in case of emergency such as accidents is important. The purpose of this study is to construct a driver's behavior model in order to predict by computer simulation the performance of a man-vehicle system in case of the emergency. First, the fundamental model was constructed in ordinary situations such as lane change maneuver. The characteristics of the model was

that the parameters were possible to adjust systematically without trial and error. Second, the characteristics of the driver's behavior were derived from the results of the experiment using a driving simulator which reproduced an obstacle avoidance situation and a curve situation changing the road surface friction. Based on the characteristics of the driver's behavior and the fundamental model, a driver model in emergent situations was constructed.

キーワード

予防安全，モデリング，マンマシン系，予測制御，ドライバ特性，レーンチェンジ，緊急回避，スピン

1. まえがき

車両の予防安全性を考える上では、車両単体だけではなくそれを操縦するドライバの特性を考慮した人間自動車系としての性能評価する必要がある。従来、人間自動車系としての性能評価は、試作車を製作しそれを操縦することにより行ってきた。しかし、試作車を製作した後でしか評価が行えないことや安全性の面から事故に至るような緊急場面での評価は容易ではないことが課題である。それを解決する方法の一つとして、ドライビングシミュレータ（以下DS）¹⁾により性能評価する方法がある。この方法であれば安全に多くの一般ドライバ特性を計測でき、新しい装置の事前評価には有効なツールである。しかし、走行条件を再現する画像等の作成に多くの時間がかかることやデータの収集・処理には実走行と同じ手間と時間がかかることなど、誰でも何時でも使用できる評価用ツールには成りえていない。より簡便に事前評価を行う方法としては、車両のモデルと運転者の操縦動作を模擬するドライバモデルを結合して、コンピュータシミュレーションにより人間自動車系としての性能予測を行う方法が考えられる。もしこのようなツールが作成できれば、車両開発の初期段階で手法・装置等のマクロな方向付けが可能になり開発期間等の短縮にもつながると考えられる。

このようなツールを作成する上では、一般ドライバの操縦特性を考慮したドライバモデルの構築が鍵になる。ドライバモデルに関する研究は古くから数多くの研究がなされてきおり各種のモデルが提案されている²⁻⁴⁾。これらのモデルを用いたシミュレーションや解析により多くの知見が得られている。しかし、従来のモデルでは、1) モデルパラメータの設定は一般に試行錯誤的であると共に、走行条件、ドライバ特性（技能、年齢等）ごとにどのようにモデルのパラメータを設定すれば良いかが不明、2) 操舵と制動を併用するようなあるいは車両が不安定化するような状況におけるドライバの操縦挙動を模擬するようなモデルの構築方法は十分明らかになっていない等の課題が残されている。

以上のことから本研究では、まず基本となるドライバモデルをできるだけ把握し易い構造で実現する。次に、DSにおいて行った障害物回避や路面 μ 変化を伴うようなカーブ路走行における一般ドライバの操縦挙動データに基づいて、緊急場面における操縦挙動を模擬するモデルを構築する。以上により構築されたモデルを用いたシミュレーション結果と実験結果の比較を行い、その有効性を確認する。

2. ドライバモデルの基本構成

本章では、各種走行条件下での運転動作を模擬するドライバモデルの基本構造について述べる。ここで構成するドライバモデルは、その特性が把握し易いことと解析的に人間自動車系を検討できる⁵⁾ようにモデルベース手法で実現するものとする。また、モデルのパラメータ調整はできる限り試行錯誤的にならないようにする。これらの方針に基づいて以下のようなモデルを構成する。

2.1 モデルの仮定

ドライバは車両を操縦する場合、進行方向の2秒程度先まで見えないと操縦しづらいこと⁶⁾が指摘されている。また、制御論的にみてもドライバが車両応答遅れや人間の操作遅れを補償していなければ的確に操縦をすることはできない。従って、人間は何らかの方法で車両の将来挙動に基づいた制御つまり予測制御と等価なことを行っている⁷⁾と考えられる。そこで、ドライバモデルは以下のような仮定の基に構築する。

仮定：ドライバは車両の将来挙動を予測し、その予測値と目標値との偏差を最小にするように操縦する。

上記の仮定に基づきモデルの基本構造（Fig. 1）を以下のように定める。

2.2 ドライバモデルの構築

ドライビングシミュレータ等を用いた各種の実験結果及びモデル予測制御手法⁸⁾に基づきFig. 1のドライバの操舵モデルの各機構を以下のように構成した。

2.2.1 予測機構

次式のように現在位置（ x, y ）、車速 v 、ヨー角 ψ から τ 秒後の車両位置の予測（Fig. 2）を行う。

$$\begin{aligned} y(t + \tau) &= y(t) + \dot{y}(t)\tau \\ x(t + \tau) &= x(t) + \dot{x}(t)\tau \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{y}(t) = v(t) \sin(\psi(t)), \dot{x}(t) = v(t) \cos(\psi(t))$$

2.2.2 目標生成機構

予測誤差 ε と τ 秒間に進む距離 L から、次式のように目標ヨー角 ψ_m を求める (Fig. 2)。

$$\psi_m = \tan^{-1}(\varepsilon/L), L = \dot{x}(t)\tau \quad (2)$$

Fig. 2における目標コース y_m は走行条件ごとに異なるのため次章で各タスクごとに示す。

2.2.3 制御機構

予測制御手法に基づいた操舵角の導出方法を示す。まず、ドライバは経験等によって操舵操作量に対する車両挙動量間の特性を表わす内部モデル⁹⁾を有していると考えられる。ここでは、その内部モデルを操舵角 u に対するヨーレート $\dot{\psi}$ 特性とし、Fig. 3のように1次遅れ近似特性で表わす。

$$\dot{\psi}(t) = \frac{K}{TS + 1} u(t) \quad (3)$$

K : ヨーレートゲイン, T : ヨーレート時定数

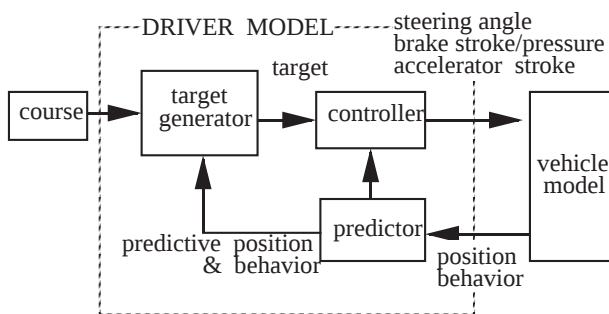


Fig. 1 Fundamental structure of the driver model.

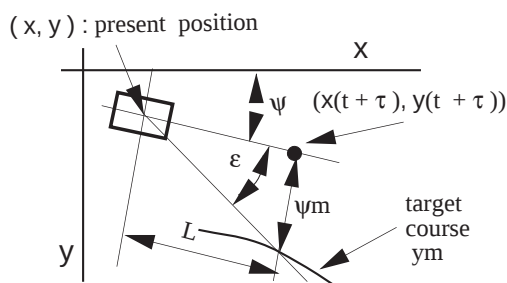


Fig. 2 Prediction.

次に、ドライバが操舵を行う時の評価関数として、 t_n 秒先の予測偏差の2乗と修正操舵量 (Δu) の2乗の和である J 式(4)を導入する。

$$\begin{aligned} J &= (\psi_m - \psi(k + n))^2 + R\Delta u(k)^2 \\ u(k) &= u(k - 1) + \Delta u(k) \\ t &= \Delta T \times k, t_n = \Delta T \times n \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 R は重み定数、 ΔT はサンプリングタイムであり人間の制御周期に相当する。人間のむだ時間を τ_d 秒とすると t_n は $\tau_d < t_n$ となるように設定する

この時、上式の評価関数を最小にする Δu は $\partial J / \partial \Delta u = 0$ を解くこと⁸⁾により、次式のように求められる。

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= F(\psi_m - \alpha\psi(k) - \beta u(k - 1)) \\ \alpha &= T(1 - \exp(-t_n/T)) \\ \beta &= K(t_n + T(\exp(-t_n/T) - 1)) \\ F &= -\beta / (R + \beta^2) \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)より制御則は積分制御となっていると共に式(5)から明らかなようにフィードバック項とフィードフォワード項が同時に用いられる構成になっている。さらに人間のむだ時間 τ_d を考慮すると、車両への操舵角 δ_{sw} は次式のようになる。

$$\delta_{sw}(k) = u(k - kd), \tau_d = \Delta T \times kd \quad (6)$$

3. タスクに対応したモデルによる解析

本章では、前章で構築した基本モデルを基に各タスク別のモデル構成方法とそのモデルを用いたコンピュータシミュレーションの結果について示す。

3.1 レーンチェンジ

ここでは、Fig. 4に示すようなテストコース上に設定したレーンチェンジ試験におけるドライバ操舵挙動のモデル化について検討する。

Fig. 4のコースを車速80km/hで走行した時の一般

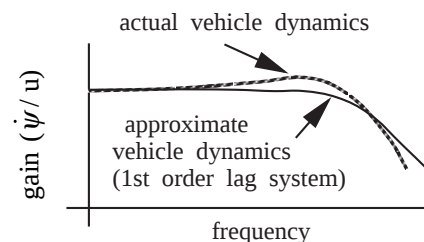


Fig. 3 Characteristics of internal model.

ドライバとエキスパートドライバの操舵波形をFig. 5に示す¹⁰⁾。図より，エキスパートに比べて一般ドライバは操舵のタイミングが早く，切り込み時に比べ切り戻し時の操舵周波数が遅くなっていることが分かる。

3.1.1 レーンチェンジモデル

Fig. 5で示されたような操舵の特徴を模擬できるようなドライバモデルの構築を行う。

まず，問題となるのはドライバがどのような目標軌道を定めているかである。この問題はドライバ特性研究の上で重要であり，人間の危険感と関連づけた興味深い研究結果¹¹⁾も報告されている。本研究では，人間の腕の操作等では移動時の躍度が最小になるように制御している¹²⁾と言う点に着目し，この結果を車両の目標軌道生成に適用することを試みる。ここでは，レーンチェンジ開始点から終了地点までの間の車両の横方向運動の躍度が最小になるような軌道を目標軌道とした。いま，目標軌道を表わす関数を y_m とし，パイロン規制区間の出入口A，B点での条件を式(7)のように定める。

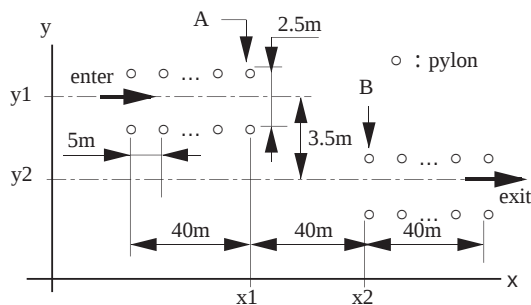


Fig. 4 Course in lane change maneuver.

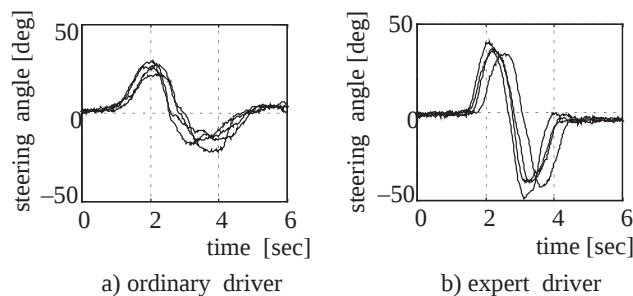


Fig. 5 Experimental results of lane change.

$$\begin{aligned} y_m(x_1) &= y_1, \dot{y}_m(x_1) = \dot{y}_m(x_1) = 0 \\ y_m(x_2) &= y_2, \dot{y}_m(x_2) = \dot{y}_m(x_2) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$J_c = \int_{x_1}^{x_2} (\ddot{y}_m)^2 dx, \ddot{y}_m = d^2/dx^2 y \quad (8)$$

このとき，式(7)の条件を満たし，評価 J_c 式(8)を最小にするような x に関する多項式は次式のように求められる¹²⁾。

$$\begin{aligned} y(x) &= y_1 + (y_2 - y_1)(6s^5 - 15s^4 + 10s^3) \\ s &= (x - x_1)/(x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (9)$$

次に，モデルを構成する上でもう一つの重要なパラメータである予測時間はコースに対する操舵開始時間や予測点表示実験¹³⁾等からエキスパート0.6秒，一般ドライバ0.8秒程度に設定した。

3.1.2 シミュレーション結果

上記の予測時間と式(9)の目標軌道を用いてシミュレーションを行った結果をFig. 6に示す。図より，シミュレーション結果と実験結果は良く対応していることが分かる。制御理論的にも予測時間を長くすることは目標コースに滑らかに追従，つまり操舵角，操舵角速度も小さくなることに相当し，一般ドライバの操舵特性と対応していることが分かる。これらの結果は，予測時間の調整が運転技能差を表現する一つの方法になり得ることを示している。

3.2 障害物回避

人間の緊急時の挙動を検討する有効な試験法として障害物回避試験がある。この実験に基づいて人間自動車系を解析した研究例も多く，回避しやすさに関する各種の知見が得られている¹⁴⁾。ここでは，Fig. 7のような直線路においてコース端から障

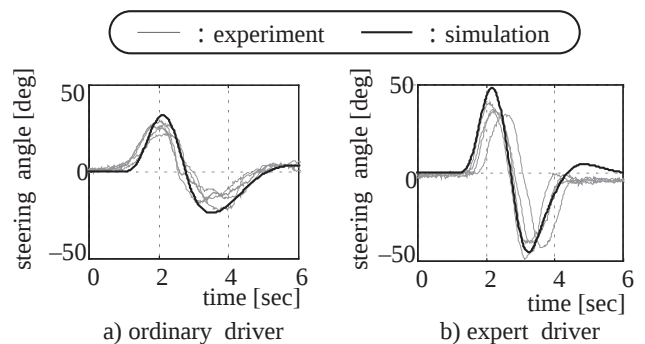


Fig. 6 Comparison of simulation and experiment.

害物が飛び出して来る場合を想定し，従来あまり行われていない操舵と制動を併用する障害物回避時の操縦挙動を模擬するドライバモデルの構築方法を示す。

3.2.1 障害物回避モデル

障害物回避のような状況では，反応するまでの時間とどのように回避するかを認知・判断する機構が重要である。しかし，そのような認知・判断機構をモデル化することは現状では困難である。そこで，本研究では一般ドライバの数多くのデータを取り¹⁵⁾，その認知・判断の結果としてのデータベースを持つことにより，統計的な意味での一般ドライバの認知・判断パターンを考慮したシミュレーションを行えるようにする。

1) 操舵モデル

まず，目標軌道の設定方法を検討するために，ドライバの操舵挙動と注視挙動の関係を計測した。その結果をFig. 8に示す。Fig. 8b)は操舵波形を示し，Fig. 8a)はその各点(A～D)での車両位置と注視点(矢印の先)を示す概略図である。図より，ドライバは回避できる直前まで障害物を見ており，回避できたと判断した直後に前方へ注視点が移動することが分かる。

上記の結果と前節のレーンチェンジモデルを拡張して以下のように目標軌道を定めた。障害物が飛び出す以前は現在走行しているレーンの中央を目標軌道とし，飛び出し後は操作を開始した時点での車両位置と障害物の横でかつ回避可能な位置とを結んだ躍度最小曲線为目标軌道とする。回避後は，回避が完了した車両位置と40m程度先の元のレーン中央とを結ぶ躍度最小曲線为目标軌道とする。

2) 制動モデル

次に，緊急時の制動モデルについて示す。まず，

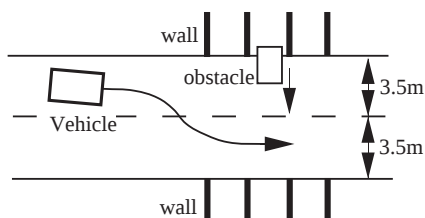


Fig. 7 Obstacle avoidance.

緊急時制動の特徴を調査し，その結果，Fig. 9に示すようにドライバは個々のブレーキ操作パターンを有している。さらに他の実験結果より走行条件は変化しても，ほとんどその固有の制動パターンが変化しないことも分かった。

そこで，ブレーキストローク θ_b を式(10)のような最大ストローク量を θ_{bm} として時定数 T_b の1次遅れとむだ時間系 τ_b として緊急時の制動動作をモデル化した。

$$\theta_b(t) = \frac{1}{T_b s + 1} e^{-\tau_b s} \theta_{bm} \quad (10)$$

3.2.2 シミュレーション結果

実験結果の中で制動反応時間 τ_b のみが異なり，他の条件は同一であるような場合を選び出す。ここで，制動反応時間が0.9秒である場合を実験1(E1)とし，制動反応時間が0.7秒である場合を実

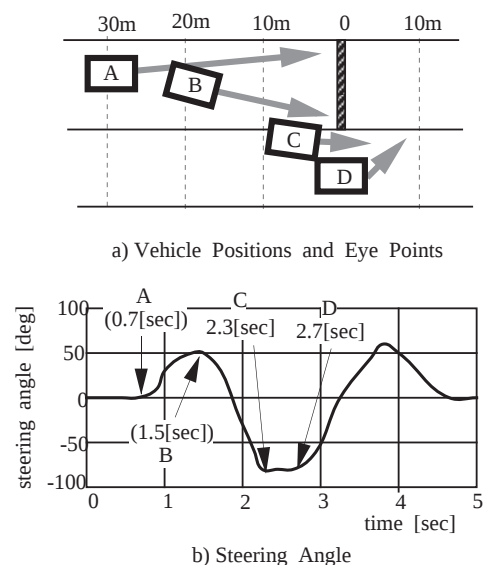


Fig. 8 Relations between steering angle, vehicle positions and eye points.

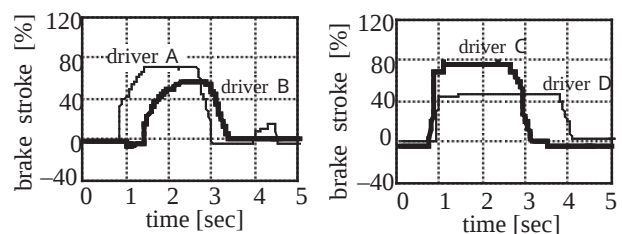


Fig. 9 Braking patterns.

験2 (E2) とする。その結果をFig. 10 a)に示す。図より、ブレーキの操作が遅くれた実験1の場合は、操舵角はほぼ同じであるにもかかわらず車速が高いため障害物近くを通過していることが分かる。次に、この実験に対応するドライバパラメータ (操舵反応時間、最大操舵速度、ブレーキ最大ストローク等) をモデルに入力し、シミュレーションを行った結果をFig. 10 b)に示す。図より、制動が遅れることにより障害物近くを通過する点等、実験結果とほぼ対応した結果が得られた。

3.3 路面 μ 変化を伴うカーブ路

人間の操縦能力と車両性能が密接に関係した事故として、車両特性変化によりドライバが車両を制御できなくなり最終的にスピンあるいはコースアウトする場合がある。そのように車両が制御困難になるような状況下でのドライバの操縦挙動をモデル化することは車両の予防安全性を考えるうえで非常に重要である。そこで、操縦困難な状況を引き起こす一つのトリガーとして後述するようにカーブ路途中で路面 μ が低下する場合を想定する。このような状況に対しては適応制御理論を適用したモデル化手法が提案されている¹⁶⁾が、車両が不安定に至るような過程については言及されていない。本研究では、予測時間に着目し、人間自動車系として不安定化するような操縦挙動のモデ

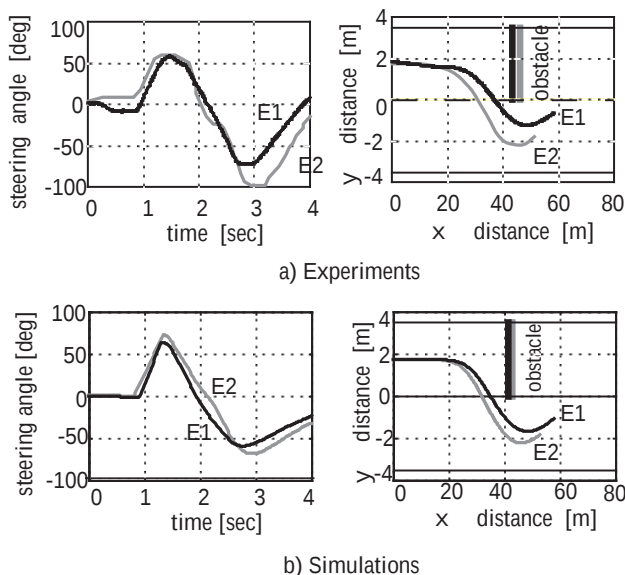


Fig. 10 Comparison between experiments and simulations.

ル化方法を提案する。

3.3.1 姿勢安定化モデル

このような状況では、路面 μ が低下 (約3秒間、 $\mu = 0.4$) している区間ではレーンから逸脱しないようにハンドルを切り増す。その結果、高 μ 路に入ると車両挙動が大きく変動し、その挙動を抑えようとしている内にスピン、あるいはコースアウトしている。その実験結果における典型的な操舵挙動をFig. 11に示す。図は3名の結果を示したものであり、低 μ 路への進入車速は約60km/hである。

これは車両挙動を抑えつつコース逸脱を避けようと操縦している内に不安定化してしまうものと考えられる。多少のコース逸脱を許した実験では、上記のような条件設定でもドライバは問題なくこの状況を回避できることも分った。これは、このような状況でのドライバ挙動は、モデルのコースへの追従性を高めることにより再現できると考えられる。本モデルにおけるコース追従性は、予測時間を短くすることにより達成できる。これは、車両挙動が急変する状況下では車両の将来挙動を予測しながらではなく、現時点での車両挙動を立て直そうとして操縦していることに相当し、実際に操縦しているときの感覚とも良く対応する。

3.3.2 シミュレーション結果

以上の検討に基づき、実験と同条件下で予測時間を一定にした場合と低 μ 路に入った後に予測時間を短くした場合 (0.8秒→0.4秒) に対するシミュレーション結果をFig. 12に示す。図より、予測時間を短くすると操舵周期等が実験結果と良く対応する結果が得られた。

以上の結果から、予測時間を短くすることで緊急時の挙動を模擬できることが分かる。

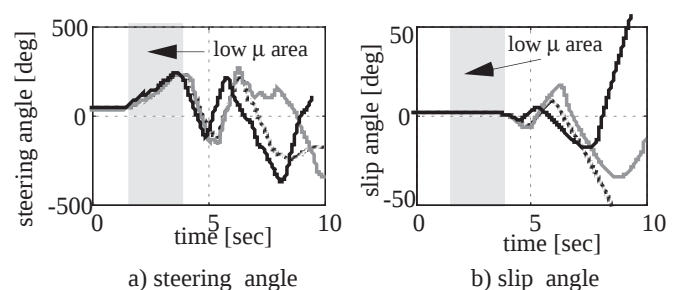


Fig. 11 Results of experiments with DS.

4. まとめ

本研究では、コンピュータシミュレーションあるいは解析により人間自動系としての挙動予測が可能となるようなドライバモデルを構築した。

本モデルの特徴は以下のとおりである。

- 1) 内部モデル(ドライバが経験等により得た車両特性)を導入することにより、構造を把握し易くかつパラメータ調整をシステムティックに行える。
- 2) データベースに基づいてモデルのパラメータを設定できる。
- 3) 操舵と制動を複合操作する障害物回避や人間自動車系として不安定化する挙動を模擬可能である。

コンピュータシミュレーションにより、本モデルがドライビングシミュレータと実車を用いた実験時のドライバの運転動作の特徴を模擬できることを確認した。

参考文献

- 1) 三木一生: "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
- 2) 吉本堅一: "人間自動車系のシミュレーション", 自動車技術, 25-10(1971), 1058
- 3) 安部正人: "ドライバの制御動作モデルの動向", 自動車

技術, 38-3(1984), 293

- 4) 柚原直弘: "人間オペレータの制御動作モデル", 日本機械学会第3回交通物流部門大会, 940-57(1994), 21
- 5) 原田宏: "操縦性・安定性技術を振り返る - 操安性定量評価の試み - ", 自動車技術, 49-12(1995), 34
- 6) Mclean, J. R. and Hoffmann, E. R.: "The Effects of Restricted Preview on Driver Steering Control and Performance", Human Factors, 15-4(1973), 421
- 7) 伊藤宏司, 伊藤正美: "予見制御系における人間の追従機能について", 電気学会論文誌C編, 95-2(1975), 30
- 8) 藤井省三: "ディジタル適応制御", コンピュータロール, 27(1988), 28
- 9) 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御, (1991), 179, 計測自動制御学会
- 10) 天野也寸志, ほか2名: "運転技能差の操舵挙動への影響とそのモデル化について", 日本機械学会第3回交通物流部門大会, 940-57(1994), 163
- 11) 影山一郎: "人間・自動車・環境系からみたドライバモデルについて", 自動車研究, 14-4(1992), 135
- 12) 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御, (1991), 190, 計測自動制御学会
- 13) 羽田昌敏, ほか2名: "コース追従時のドライバの予測時間に関する検討", 日本機械学会全国大会講演論文集, 96-15(1996), 413
- 14) 入江南海雄, ほか2名: "緊急回避時における人間 - 自動車系の挙動について", 日産技報, 12(1977), 3
- 15) 名切末晴, 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", 自動車技術会講演会前刷集, 941(1994), 1
- 16) 永井正夫: "異常事態下における人間 - 自動車系について", 自動車研究, 7-2(1985), 47

著者紹介

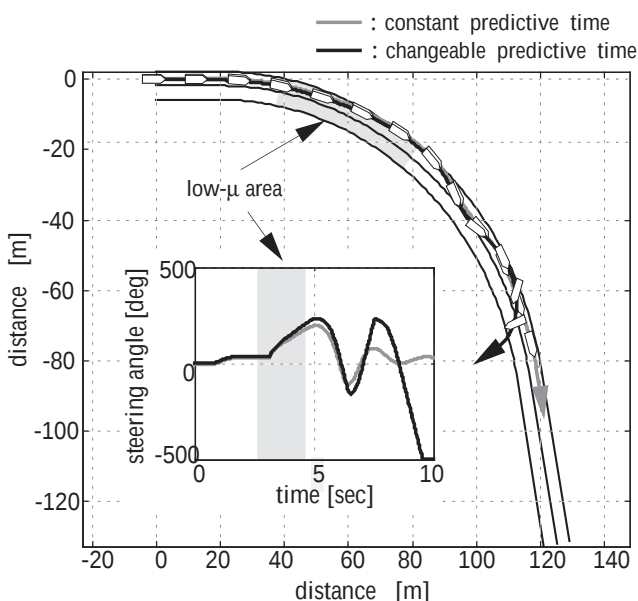


Fig. 12 Results of computer simulations.



天野也寸志 Yasushi Amano

生年: 1957年。

所属: 人間工学研究室。

分野: 人間機械系及び車両制御に関する研究。

学会等: 計測自動制御学会, 日本機械学会, 自動車技術会会員。
工学博士。



羽田昌敏 Masatoshi Hada

生年: 1967年。

所属: 機械力学研究室。

分野: ドライバモデルおよびタイヤ特性のモデル化に関する研究。



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。