緊急時におけるドライバの運転動作モデル*
(障害物回避時および車両特性急変時への適用)天野 也寸志^{*1}, 名切 末晴^{*1}
羽田 昌敏^{*2}, 土居 俊一^{*1}A Driver Behavior Model in Emergency Situations
(An Application of the Driver Model to Cases of
Obstacle Avoidance and Sudden Change of Vehicle's Characteristics)Yasushi AMANO, Sueharu NAGIRI,
Masatoshi HADA and Shun-ichi DOI

The purpose of this paper is to propose a driver model in emergency situations. The emergency situations are cases that an obstacle ran out of the lane and friction between tire and road surface changed suddenly. So far it has not been clarified yet the influences of slip angle of on the driver's behavior and modeling of the combined use of steering and braking in the situations. Results of computer simulations using the driver model are correspond to driver behaviors obtained by experiments with driving simulators. It is verified from the results that the driver model is useful tool that predict behaviors of man-vehicle system in emergency situations.

Key Words: Automobile, Modeling, Maneuverability, Human Engineering, Obstacle Avoidance, Curve, Road Surface Friction, Braking, Slip Angle, Predictive Time

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で評価する必要がある。そのような人間自動車系としての性能評価は、一般的に試作車両を製作してエキスパートドライバが操縦することにより行われている。しかし、試作車を作成した後でしか評価できないことや安全上の問題から事故に至るような状況を再現することは容易ではない。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ツールには成りえていない。一方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を構築することが鍵になる。ドライバモデルに関する研究は古くから行われてきており緊急回避挙動を対象にした各種のモデルが提案されている。急なレーンチェンジ⁽²⁾⁽³⁾、障害物回避^{(4)~(8)}、カーブ路における道路環境変化時⁽⁹⁾等に対するモデルが提案され、人間自動車系に対する多くの知見が得られている。しかし、緊急回避時における制動と操舵を併用する回避挙動や車両が不安定になる状況、例えばスリップ角の操縦挙動に与える影響等のモデル化等は必ずしも十分に行われてはいない。さらに、緊急状況下でドライバモデルのパラメータをどのように設定して行けばよいかも明らかになっていない。

以上のことから本研究では、DSにおいて行った障害物回避や路面摩擦係数の急変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の収集結

* 原稿受付 1997年11月25日。

*¹ 正員, (株)豊田中央研究所(☎480-1192 愛知県愛知郡長久手町字横道41-1)。*² (株)豊田中央研究所。

E-mail: amano@cosy.tytlabs.co.jp

果に基づいて、緊急場面における操縦挙動を模擬する上でのモデルの構成方法、特にスリップ角の操縦挙動に与える影響と緊急時の制動動作のモデル化について検討した。さらに、構成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により、本モデルの検証を行う。

2. シミュレーションシステムについて

人や物が前方に急に飛び出したり、路面状況等により車両特性が急変するような状況では、ドライバが反応するまでの時間等の操縦能力とともにどうやってその状況を回避するかを決定するドライバの認知判断機構の解明が重要である。しかし、事故に至る過程のドライバの操舵挙動を予測できるような認知・判断機構モデルを構築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るにより、その認知・判断の結果としての操縦パターンをデータベースとして有するよう構成する。そのデータベースから想定した場面における、例えば一般ドライバの典型的な挙動、運転エキスパートの挙動等を模擬できるようなモデルパラメータを選択できるように構成する。つまり、図1のようなシミュレーションシステムを構築することを考える。本論文では、図1のシステムのドライバモデル部分の構築方法について述べる。データベースに関しては文献(10)等を参照されたい。

Fig. 1 Concept of simulation system

3. モデルの構成

前報⁽¹¹⁾において、レーンチェンジ等のコース追従時のドライバ挙動を模擬するドライバモデルを提案した。そのモデルは図2に示すような目標ヨー角 ϕ_m 追従モデルである。

図2に基づく目標ヨー角 ϕ_m に追従するための操舵制御モデルとして、次式のような積分型の離散時間表現のモデルを構成した。

$$u(k) = u(k - k_d - 1) + \Delta u(k - k_d) \quad \dots\dots (1)$$

$$\Delta u(k) = F(\alpha \dot{\phi}(k) + \beta u(k - 1) - \phi_m)$$

ここで、 k はステップ数であり、離散時間表現における現在時刻を表し、 k_d はドライバのむだ時間を表す。 u は操舵角、 Δu は修正操舵量(連続時間系における操舵速度)、 $\dot{\phi}$ はヨーレートである。 F, α, β は予測時間、車両特性等を変数とする制御パラメータである。詳細は文献(11)を参照されたい。

しかし、本研究で対象としている急操舵時や路面 μ 変化時のような緊急場面では車両挙動が大きく変化する。特に、通常走行時には小さく一般に無視できる車体スリップ角(車体重心点の進行方向と車両の向きとの角度)が大きくなり、車両自体が不安定になる場合がある。そのような状況下では、上記のようなヨー角だけにに基づくモデルでは不十分であることが考えられる。そこで、このスリップ角がドライバ挙動にどのような影響を与えるかを調べ、緊急時にも対応できるドライバモデルの構成方法を検討する。さらに、緊急時におけるドライバの制動挙動についても調べ、操舵動作と制動動作の両方を考慮したモデルの構築を行う。

3.1 スリップ角の影響 緊急時にドライバが不安定化を抑えるためスリップ角の増大を抑制するような操舵を行うならば、図2のような目標軌道追従モデルでは模擬できないような操舵挙動をすることが考えられる。つまり目標追従よりもスリップ角を抑制する挙動を優先する可能性がある。そこで、この点を調べるため、DSによりカーブ路走行中にスリップ角のみ

Fig. 2 Predictive control model

Fig. 3 Experimental results for slip angle disturbance task in a turn (100 R, velocity: 60 km/h)

Fig. 4 Experimental results for slip and yaw angle disturbance task (velocity: 50 km/h)

(ヨーレート一定)に外乱を加える実験を行った。このとき、外乱を付加することはドライバ(被験者5名)には事前に知らせずに実験を行った。その結果の一例を図3に示す。

図3より、スリップ角が変動すると、その外乱により滑った方向とは逆方向、つまりもとのコースに戻る方向に修正操舵を行う。このように、スリップ角が急変するにもかかわらずそれを抑制する動作は行わず、コースへの追従を主目的として操舵を行うことがわかった。

次に、スリップ角変動のコース追従動作への影響を見るために、直進走行時にヨー角とスリップ角に同じ正弦波状の外乱を加えた場合(外乱による車両変位量は同じ、姿勢のみ異なる)、操作にどのような差が生ずるかをDS実験により検討した。外乱は大きさが 5° (図4は10倍して表示)で、周波数は0.5 Hzと0.7

(a) disturbance 0.5 Hz

(b) disturbance 0.7 Hz

Fig. 5 Simulation results for slip and yaw angle disturbance task (velocity: 50 km/h)

Fig. 6 Obstacle avoidance task

Hzの2種類のものを用いた。その実験結果を図4(a), (b)に示す。図4より、外乱による車両変位量が同じであっても操舵挙動に差が生ずることがわかる。ヨー角に外乱を加えた場合に比べて、スリップ角に外乱を加えた場合は操舵量が小さくかつ特に位相遅れが大きいことがわかる。

この特徴を式(1)のモデルで模擬できるかどうかについて検討する。モデルの予測時間 τ を0.8 sに設定し、上述したDS実験と同じ車両モデル、同じ走行条件でシミュレーションを行った。その結果を図5(a), (b)に示す。図5より、式(1)のモデルを用いてシミュレーションをした結果は、外乱に対する位相遅れおよび操舵量の大きさに関する特徴が実験とよく対応していることがわかった。

以上のことから、本研究では式(1)のモデルで緊急時においても対応可能と考え、以下、操舵モデルとして式(1)のモデルを用いるものとする。

3・2 制動モデル 緊急時には操舵だけでなく制

動操作が重要な要素となっている。そこで、まず図6のように直進走行中に障害物が突然飛び出してくるような状況をDS上に設定し、一般ドライバの制動挙動データを収集した⁽¹⁰⁾。被験者は18歳から62歳までの23名(女性5名)である。車速を60~100 km/hとし、障害物の飛び出し時間を2.0~3.0秒に設定して実験を行った。ここで、飛び出し時間とは障害物が飛び出したときの車両から障害物までの距離をその車速で除した値である。そのデータを整理すると制動操作をいくつかの典型的なパターン、つまり最大ストロークの量の大小とそれに到達するまでの時間の長短により分類できることがわかった。そのパターンを図7に示す。次に、この実験におけるドライバAのすべての制動操作を図8に示す。図8より、ブレーキストローク応答の時定数および最大値は、走行条件が変わってもあまり変化しないことがわかった。他の被験者も同様の傾向を示し、緊急時におけるブレーキ操作は個人特有のパターンを示すことがわかった。そこで、できるだけ簡単にこの特性を表すためブレーキストローク量を θ_b として式(2)のように、むだ時間と一次遅れ、つまり障害物が飛び出してから制動を開始するまでの反応遅れを表すむだ時間(τ_b)と最大ブレーキストローク(u_{bm})になるまでの応答特性を表す時定数 T_b によりモデル化した。

$$\theta_b(t) = \frac{1}{T_b s + 1} e^{-\tau_b s} u_{bm} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、障害物回避実験で得られた τ_b と T_b の分布を図9に示す。これは、100名の被験者(女性22名)の結果をまとめたものであり、車速等は前述した実験

(図7, 8)と同様である。図9より、一般的な特性としては τ_b は0.7秒程度、 T_b は0.2秒程度であることがわかる。

4. 緊急時のドライバモデルの構築

4.1 障害物回避時のドライバモデル ここでは、図6のような直線路においてコース端から障害物が飛び出してくる場合を考える。この場合、モデルとしては障害物飛び出し前後で目標軌道を変更しそれに伴い予測時間をどう設定するかが重要となる。そこで、障害物回避時のドライバの操舵挙動とアイカメラで計測したドライバの注視行動と車両と障害物の位置関係を図10に示す。図10(a)は、図10(b)で示した操舵状態における車両およびドライバの注視位置(矢印の先)の関係を示す。図10より、ドライバは、操舵を開始してから切り戻すまでの間(A~B)、つまり回避できると判断するまで障害物を注視する。その後、車両が障害物の横を通り抜けられるまでの間(B~C)、ドライバは障害物とコース端との間を注視しながらハンドル

Fig. 9 Distribution of braking model parameters

Fig. 7 Typical braking pattern

Fig. 8 Influence of driving conditions on the braking pattern (driver A)

(a) Vehicle positions and eye points

(b) Steering angle

Fig. 10 Relations between steering angle, vehicle positions and eye points

を切り戻す。障害物を回避する直前でコース前方に注視点を移動している(C~D)。この結果から、ドライバはまず回避できる量を操舵し、その後コース端と障害物位置を計算しながら操舵を戻していると考えられる。そこで、障害物飛び出し後の目標コースとして、障害物に接触せずコースから逸脱しない位置と現在位置を結ぶ曲線と仮定した。この曲線は前報⁽¹¹⁾で用いたレーンチェンジ時の目標軌道である躍度最小曲線を用いた。また、障害物に近づくほどコースへの追従性が向上するように、予測時間を障害物に近くなるにしたがって短くするように設定した。具体的には以下のような目標軌道および予測時間を設定した。

a. 障害物飛び出し前

目標軌道：現在走行しているレーンの中央

予測時間(τ_1)：一定(0.8秒)

b. 障害物飛び出し後から回避するまでの間

目標軌道：飛び出し時の車両位置と障害物横で回避可能な位置とを結んだ躍度最小曲線

予測時間(τ_2)：

$$\tau_2 = \tau_1 \quad (t_0 \geq \tau_1)$$

$$\tau_2 = t_0 \geq \tau_{\min} \quad (t_0 < \tau_1)$$

$$t_0 = \text{現時点から障害物までの距離} \div \text{車速}$$

$$\tau_{\min} = \text{最小予測時間}(0.4 \text{ 秒})$$

c. 障害物回避後

目標軌道：回避が完了した車両位置と40 m先の元のレーン中央とを結ぶ躍度最小曲線

予測時間(τ_3)：

$$\tau_3 = \tau_1$$

上記の目標軌道と式(1)の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以下に示す。

4・1・1 ケース1(制動反応時間の影響) 実験結果の中で制動反応時間 τ_b のみが異なり、他の条件はほぼ同一な場合を選出する。 τ_b が0.9秒である場合を実験1(E1)とし、 τ_b が0.7秒である場合を実験2(E2)とする。その結果を図11に示す。図11(a)より、ブレーキの操作が遅い実験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わかる。次に、この実験に対応するドライバパラメータ、障害物が飛び出してから回避するまでの時間を表す操舵反応時間 τ_s 、最大操舵速度 Δu_m 、最大ブレーキストローク u_{bm} 等をモデルに入力し、シミュレーションを行った結果を図11(b)に示す。図11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、実験結果と対応した結果が得られた。

4・1・2 ケース2(操舵反応時間の影響) ここで

Fig. 11 Comparison between experiments and simulations (E1, E2)

Fig. 12 Comparison between experiments and simulations (E3, E4)

は、実験結果の中で操舵反応時間 τ_s と最大操舵速度 Δu_m が異なり、他の条件はほぼ同一であるような場合を選び出した。 τ_s が0.91秒、 Δu_m が120度/秒である場合を実験3(E3)とし、 τ_s が0.71秒、 Δu_m が210度/秒である場合を実験4(E4)とする。両方の場合ともブレーキはほとんど踏んでいない。その結果を図12に示す。図12(a)より、操舵操作が遅れた実験3の場合は、障害物近くを通過し、その結果切り戻しが遅れ横方向へ大きく振られていることがわかる。次に、この実験に対する上記パラメータをモデルに入力し、シミュレーションを行った結果を図12(b)に示す。図12より、 τ_s が遅れることから障害物近くを通過しその後横方向変位が大きくなる点等、実験結果と対応した結果が得られた。

4・2 路面状態変化を伴うカーブ路タスク 車両が制御困難になりスピンやドリフトアウトを起すような状況下でのドライバの挙動をモデル化することは車両の予防安全性を考える上で非常に重要である⁽¹²⁾。本研究ではそのような状況を再現する一つのパターンとしてカーブ路途中で路面摩擦係数(以下 μ)が変化する場合を想定する。まず、カーブ路途中で路面 μ が減少し、その後再び高 μ 路に入る場合について検討する。実験では路面 μ を約3秒間0.4に低下させた。その中でスピンに至る典型的な実験結果を図13に示す。

ドライバは、路面 μ が低下している区間に入るとレーンから逸脱(ドリフトアウト)しないようにハンドルを切り増す。その状態で高 μ 路に進入するため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。これは、ドライバが車両をコース内に維持しようとして生じた結果であると考えられる。多少のコース逸脱を許す実験を行った場合には、ドライバは問題なくこの状況を回避できることが同様の実験により確かめられている。したがって、このような状況のドライバ挙動は、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。本モデルでは、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。このことは、コースに対してヨー角がつけばコースを逸脱するまでの時間は短くなるため予測時間も短くならなければならないことや、このような状況下では車両の将来挙動や位置を予測しての操縦は困難であり、予測時間を短くすることは実際に操縦しているときの感覚ともよく対応すること等から妥当であると考えられる。

また、今回の実験では路面 μ 変化後にブレーキを踏み車速を低下させて車両挙動変化を抑えるドライバはほとんどいなかった。したがって、今回のようにドライバが事前に知ることなく、車両挙動が急変するような状況では、一般ドライバは操縦により車両姿勢の制御を行い同時にブレーキを操作して減速するような操作は困難であることがわかった。

Fig. 13 Experimental results (100 R, velocity: 60 km/h)

この実験と同じ条件で式(1)のモデルを用いてシミュレーションを行った結果を示す。予測時間を一定にした場合(0.6秒)と低 μ 路に入った後に予測時間を短くした場合(0.6秒→0.4秒)のシミュレーション結果を図14に示す。このとき、先の検討に基づきブレーキの操作は行っていないものとした。図14より、予測時間を短くすると実験結果と同様な結果が得られ、先の予測とも対応していることがわかる。

次に、後輪の μ のみを低下させてスピンを誘発させる実験を行った。これは、FR車でカーブ路途中で急加速したような場合を想定している。実験に用いたコースは100 R、進入車速は60 km/h前後であり、後輪 μ は約2秒間、後輪の μ のみを0.3に低下させた。このとき、操舵を開始した時点での車速とスリップ角を図15に示す。図15中において○は回避に成功した場合を示し、×は失敗した場合を示す。図15より、回避に成功するほとんどの場合はスリップ角が小さくかつ車速が低い場合である。つまり、車両が不安定になるような状況では、一般ドライバはほとんど操縦できないことがわかる。

次に、同じ条件でシミュレーションを行った結果を図16に示す。予測時間は低 μ 路進入前は0.6秒、進入後は0.4秒とした。図16より、成功条件は車速が

Fig. 14 Simulation results (100 R, velocity: 60 km/h)

Fig. 15 Experimental results for the case that vehicle's characteristics change suddenly

60 km/h 以下でスリップ角が 2° 前後であることがわかり、上記の結果と対応していることがわかる。以上のことから、車両が制御不能になるような領域でも予測時間可変を可変にすることによりドライバモデルによる性能予測が可能であることがわかった。今回は予測時間を切り替えるタイミングをあらかじめ与えたが、コース逸脱するまでの時間を求めそれに基づいて自動的な切り替えも実現できる。

4. ま と め

本研究では、緊急時におけるドライバモデルの一構成方法について検討した。緊急時として(1)直進走行中に障害物が突然飛び出す場合、(2)カーブ路の途中で路面 μ が急変する場合を定めて検討した。モデルの特徴は、従来あまり検討されていなかった緊急時のブレーキ操作挙動、スリップ角の影響、スピンに至る操縦挙動のモデル化を行った点にある。作成したモデルを用いてコンピュータシミュレーション結果は、DS実験でのドライバの操縦挙動とよく対応していることを確認した。

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

Fig. 16 Prediction of stabilizable region using driver model

会誌, **117** 8(1997), 516-519.

- (2) 原田宏, 操縦性・安定性技術を振り返る, 自動車技術, **49**-12(1995), 34-40.
- (3) 相馬仁, ファジィ推論を応用したプログラム操舵モデル, 自動車技術会講演前刷集, No. 881 (1988), 113-116.
- (4) 入江南雄・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, Vol. 12(1977), 3-14.
- (5) Reid, L. D., A Survey of Recent Driver Steering Behavior Models Suited To Accident Studies, *Accid. Anal. & Prev.*, **15**-1(1983), 23-40.
- (6) 末富隆雄・吉本堅一, 予見追跡制御則を用いた障害物回避動作のモデル, 自動車技術会講演前刷集, No. 862 (1986), 489-494.
- (7) 景山一郎, 危険回避時のドライバモデルについて, 自動車技術会講演前刷集, Vol. 912(1991), 157-160.
- (8) 成波・藤岡健彦, Fuzzy 予見制御を用いたドライバモデルに関する研究, 日本機械学会第5回交通物流部門大会講演論文集, **96**-51 (1996), 209-212.
- (9) 永井正夫, 異常事態下の人間-自動車系について, 自動車研究, **7**-2(1985), 47-51.
- (10) 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, 自動車技術会講演前刷集, 941(1994), 1-4.
- (11) 天野也寸志・ほか3名, 緊急時におけるドライバの運転動作モデル(モデルの基本構造について), 機論, **65**-633, C (1999).
- (12) 山本敦, マン-マシン系を考慮した事故回避性能の向上, 自動車技術, **49**-12(1995), 10-15.