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)天野 也 寸 志^{*1}, 名 切 末 晴^{*1}
羽 田 昌 敏^{*2}, 土 居 俊 一^{*1}Driver Behavior Model in Emergency Situations
(On Basic Structure of A Driver Model)Yasushi AMANO, Sueharu NAGIRI,
Masatoshi HADA and Shun-ichi DOI

The purpose of this paper is to show basic structure of a driver model that simulate driver's behaviors in emergency situations. The features of this model are that the parameters are systematically set up without trial and error by using predictive control method and a driver's internal model is introduced and a minimum lateral jerk line is applied as target course. The results of experiments to decide the structure, the internal model and predictive time, are shown. The model was applied to simulate driver's behaviors in lane change maneuver. It follows from the results that the driver model adequately simulate general and expert driver's behavior in experiment.

Key Words: Automobile, Modeling, Maneuverability, Human Engineering, Predictive Control, Internal Model Target Course, Jerk Minimum Line

1. は じ め に

車両の性能を考える上では、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。車両特性に関する研究はタイヤの特性も含めて活発に進められており、その特性を数式化した車両モデルによるコンピュータシミュレーションによりかなりの所まで予測できるようになってきている。そのような数式で表された車両モデルに基づいて人間自動車系としての解析・シミュレーションを行うためには、ドライバ特性も数式で表現されていることが必要である。したがって、ドライバの操縦挙動を数式で表現できるドライバモデルを構築することは有用である。そのようなドライバモデルに関する研究は古く、準線形モデル(クロスオーバーモデル)⁽¹⁾、前方予測モデル⁽²⁾、最適制御モデル⁽³⁾、ニューラルネットワークモデル⁽⁴⁾等、各種のモデルが数多く提案されている。また、それらの動向については文献(5)～(7)等によって系統的に把握されてい

る。これらのモデルを適切に用いれば、限定した走行場面・状況(例えばテストコースでの試験パターン等)において、人間と等価な制御能力で車両を操縦した場合の車両挙動および閉ループ特性を相対的に予測・解析することは可能であると考えられる⁽⁸⁾。しかし、これらのモデルが車両の開発において、人間自動車系としての性能を予測するツールに位置付けられるまでには至っていない。この要因としては、1)数多くのモデルが提案されておりどの場面にどのモデルが適用できるかが不明確、2)どのようにモデルのパラメータを設定すればよいかが不明確、3)ドライバの操縦しやすさとの対応が不明である等にあると考えられる。1)を解決するためには、通常時から緊急時に至るドライバ操縦挙動を一つのモデルで模擬できるようにする必要がある。2)を解決するためには、制御理論を応用したモデルベースな構成法にし、モデルパラメータ設定における試行錯誤的な要素を少なくする必要がある。3)は重要な課題であるが、解決するためにはモデルをどうやって構築するかということよりも、操作しやすさということ⁽⁹⁾はどういうことであるかを明らかにすることが重要である。そこで、本研究では、モデルを用いる上での基本的な課題である1)、2)に焦点を絞り、通常時から緊急時ドライバ挙動を模擬するための

* 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: e0738@mosk.tytlabs.co.jp

基本となるモデルを構築する。

以下では、まず予測制御手法に基づいたドライバモデルの基本構造および構成方法を示す。次にその基本モデル構成時に導入されるドライバの内部モデルおよび予測時間の設定方法について実験とシミュレーションにより検討する。提案したモデルを通常走行の一例としてレーンチェンジ走行時のドライバ挙動の模擬に適用する。ここでは、目標軌道の生成方法やドライバの技能差の影響の模擬方法について示し、最後に、本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う。

2. モデル構造について

2.1 モデルの仮定 ここで構成するドライバモデルは、その特性が把握しやすいことと解析的に人間自動車系を検討できるようにできるだけ簡単な構造で実現するものとする。したがって、以下で構成するモデルは、ドライバの挙動を等価的に表現しようとするものであり、実際のドライバの制御アルゴリズムを実現することには必ずしもならない。また、モデルのパラメータ調整は試行錯誤的にならないようにする。この方針に基づいて以下のようにモデルを構成する。

人間が目標追従制御を行う場合には何秒か先を予測して制御していることがわかっている⁽¹⁰⁾。また、車両を操縦する場合には、進行方向の2秒程度先まで見えないと操縦しづらい⁽¹¹⁾ことも指摘されている。したがって、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ドライバモデルの基本構造を以下のように与える。

2.2 ドライバモデルの構成 予測制御手法⁽¹²⁾の考えを応用し、図1のドライバモデルの各機構を以下

Fig. 1 Structure of driver model

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) 、車両 v 、ヨー角 ϕ から τ 秒後の車両位置の予測を行う(図2)。以下、この時間 τ を予測時間と呼ぶ。

$$\begin{aligned} y(t+\tau) &= y(t) + \tau \dot{y}(t) \\ x(t+\tau) &= x(t) + \tau \dot{x}(t) \quad \dots\dots\dots (1) \\ \dot{y}(t) &= v(t) \sin(\phi(t)), \quad \dot{x}(t) = v(t) \cos(\phi(t)) \end{aligned}$$

2.2.2 目標軌道生成機構 予測誤差 ε と τ 秒間に進む距離 L から、現在のヨー角 ϕ に対して今後どれだけヨー角を増減すれば目標軌道に追従できるかを表す目標ヨー角 ϕ_m を、次式のように算出する。

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

2.2.3 制御機構 目標ヨー角 ϕ_m 追従制御を実現するための制御機構の設計方法を示す。ドライバは、経験等により得た車両特性を表す内部モデルを有し⁽¹³⁾、そのモデルに基づいて予測制御を実現していると考えられる。そこで、その内部モデルを操舵角 u に対するヨーレイト $\dot{\phi}$ 特性を一次遅れ近似(図3)として次式のように表す。

$$\dot{\phi}(t) = \frac{K}{Ts+1} u(t), \quad s = d/dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 K はヨーレイトゲイン、 T はヨーレイト時定数である。

目標ヨー角 ϕ_m に追従させるために、式(3)に基づいてドライバが最小化する評価関数(離散時間表現)を次式のように定める。

$$J = (\phi_m - (\phi(k+n) - \phi(k)))^2 + R \Delta u(k)^2 \quad \dots (4)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、サンプリングタイムを ΔT とすると、離散

Fig. 2 Prediction and target course

Fig. 3 Concept of internal model

時間表現において k は現在の時刻 $t(k \times \Delta T)$ を表すステップ数であり, n は $n \times \Delta T$ 秒後を表すステップ数である. また, R は重み定数, Δu は修正操舵量を表す. 式(4)の右辺第1項は将来のヨー角変動量, つまり n ステップ先のヨー角 $\phi(k+n)$ と現在のヨー角 $\phi(k)$ の偏差, と目標ヨー角 ϕ_m との偏差を評価し, 右辺第2項は修正操舵量 Δu の大きさを評価する項である.

このとき, 式(4)の評価関数を最小にする Δu は $\partial J / \partial (\Delta u) = 0$ を解くことにより, 次式のように求められる(付録参照).

$$\Delta u(k) = F(\alpha \phi(k) + \beta u(k-1) - \phi_m) \cdots \cdots (6)$$

ここで, ドライバのむだ時間 t_d を考慮すると, 実際に車両モデルに加える操舵角 δ_{sw} は式(7)のようになる. k_d は離散時間表現において $t_d(k_d \times \Delta T)$ を表すステップ数である.

$$\delta_{sw}(k) = u(k - k_d) = u(k - k_d - 1) + \Delta u(k - k_d) \cdots \cdots (7)$$

3. モデル構造の検証

2章で構成したドライバモデルにおいて操縦挙動を表す主要な要素は, ドライバが有する内部モデル[式(3)]とどれだけ先を予測して制御しているかを定める予測時間 τ である. 以下では前章で構成した各要素の妥当性について検討する.

3.1 ドライバの内部モデル 内部モデル[式(3)]は, ドライバが車両に与える入力(操舵角)と被制御量(車両挙動量)を表している. ここでは, 内部モデルとして式(3)を用いてよいかどうかについて検討する. ここで, ドライバが目標軌道を追従しようとする場合, a) 目標軌道に対する横方向の偏差 ε (図2)を直接制御する場合と, b) その横方向偏差を角度 ϕ_m (図2)に置き換えてヨー角を制御する場合が考えられる. ドライバは, a) の場合には操舵角～横方向変位の特性, b) の場合には操舵角～ヨー角特性におおの基づいて制御することになる. したがって, 目標軌道追従を行うための内部モデル候補としては, 操舵角～ヨー角間のモデルと操舵角～横変位のモデルが考えられる. 一般に人間が変動する目標に対して追従制御を行う場合には, 制御対象の特性が2階以上の積分系になると制御が困難になることがわかっている⁽¹⁴⁾. 定常状態では操舵に対してヨーレイトは比例すると見なせるので, 操舵角～ヨー角の特性では少なくとも1階の積分要素が入り, 操舵角～横変位の特性では少なくとも2階の積分要素が入る. このことから考えるとヨー角制御が妥当であると考えられる. さらに, ドライバ

にとっては内部モデルと実際の車両特性との差が少ないほうが制御しやすいと考えられる. この観点から検討するため, 内部モデル候補として構造が簡単な以下の2ケースを想定した. 車両1は, 操舵に対するヨーレイト特性が車速によらず一定, ただし横加速度ゲインは車速が上がるとともに増加する. 車両2は, 操舵に対する横加速度特性が車速によらず一定, ただしヨーレイトゲインは車速が上がるとともに減少する. この車両1, 2の特性を横, ロール方向への動揺が可能なDS上で実現し, ドライバの操縦挙動への影響を検討した.

$$\text{車両1:} \begin{cases} \dot{\phi} = \frac{K_1}{T_{1s} + 1} \delta_{sw} \\ \ddot{y} = v \dot{\phi} = \frac{v K_1}{T_{1s} + 1} \delta_{sw} \end{cases} \cdots \cdots (8)$$

$$\text{車両2:} \begin{cases} \dot{\phi} = \frac{K_2/v}{T_{2s} + 1} \delta_{sw} \\ \ddot{y} = v \dot{\phi} = \frac{K_2}{T_{2s} + 1} \delta_{sw} \end{cases} \cdots \cdots (9)$$

ここで, $\ddot{y}$ は横加速度, v は車速, δ_{sw} は操舵角, $K_i (i=1, 2)$ はゲイン, $T_i (i=1, 2)$ は時定数を表す.

ここでは, 図4のようなコースに対して加減速(40~80 km/h)を行いながら左側車線の中央を追従走行を行う場合を想定した. このコースは通常車両を模擬した車両モデルを用いた場合には問題なくコース追従することが可能である. その実験結果の内, 明確な差が生じた減速時の結果を図5に示す. 図5より, 車両2の場合は減速時に修正操舵を頻繁に行ったり, 切りすぎを起すなど必ずしも操縦しやすくないことがわかった. 車両1の場合は, 車速とともに横加速度特性が変動しても切りすぎ等は起さずコース追従がしやすいことがわかった. したがって, 内部モデルとしては車両2に比較して車両1のほうが妥当であり, 先の人間の制御限界とを考え合せ, 本研究では内部モデルとして式(3)を用いるものとする.

3.2 予測時間 3.1節までの検討でドライバの

Fig. 4 Configuration of the course

Fig. 5 Experimental results (80 km/h → 40 km/h)

Fig. 6 Method of experiment

内部モデルを規定することができた。次に、その内部モデルを用いた予測制御系を構成する上で重要なパラメータとなるのは、何秒先を予測しているかを規定する予測時間である。つまり、車両を操縦する場合、現在位置から何秒先の偏差を最小にしようとしていると見なせばよいかが課題となる。そこで、DSを用いてコース上に車両の将来位置(現在の車両位置・挙動から予測)を示し、その位置を目標コースに追従させるように操縦した場合(図6)について検討した。その結果を図7(表示なし)、図8(表示あり)に示す。図を比較するとエキスパートドライバは0.4秒、一般ドライバは0.7秒程度先に表示を行った場合と通常走行(表示なし)の場合の操舵波形がほぼ対応することがわかった。表示を出したことで現実の操縦とは異なっているが、ドライバが予測偏差を最小にしようとして操縦しているという仮定の基では、厳密な目標軌道追従した場合のモデルの予測時間は0.4~0.7秒程度と見なせる。また、その予測時間先の表示を目標軌道に合せるように操縦した場合が感覚的にも通常の操作とよく対応することがわかっており、上記の予測時間は妥当で

Fig. 7 Experimental results without predictive point (velocity: 100 km/h)

(a) expert driver

(b) ordinary driver

Fig. 8 Experimental results with predictive point (velocity: 100 km/h)

あると考えられる。

次に、上記のドライバモデルのパラメータである予測時間とドライバが走行中に注視している点(予測点表示なしの場合)との関連を調べるため、アイカメラによりドライバの注視時間 $[(\text{ドライバの注視位置} - \text{現在位置}) / \text{車速}]$ を計測した。その結果を図7に示す。図7より、注視時間は1秒前後であり、レーンチェンジ区間が近づくと短くなり、レーンチェンジ後半もしくは終了後に長くなることがわかった。この結果から、前述の予測時間とドライバの注視点より求めた注視時間とは必ずしも対応しないことがわかった。ま

た、一般とエキスパートでは操舵開始地点および操舵波形は全く異なるものの、レーンチェンジ前および中では注視時間にはほとんど差がなく、レーンチェンジ終了後にエキスパートのほうが注視点を早めに前方(遠方)に移動していることがわかった。

モデルの予測時間を上記のように0.4秒と0.7秒に設定してシミュレーションを行った結果を示す。まず、実験に用いた車両に特性を合せた車両モデルと2章で構築したドライバモデルを結合させて、実験と同じ目標軌道を追従するシミュレーションを行った。その結果を図9に示す。図9より、実験結果の操舵波形(図7)とよく対応していることがわかる。以上の検討結果はDSを用いて得られたものである。実走行時に適用できるかどうかは、4章において、この予測時間を用いたドライバモデルが実走行時のドライバ挙動を模擬できるかどうかにより検証する。

4. レーンチェンジ走行のモデル化

ここでは3章までで構築したドライバモデルと実走行の比較を行うため、レーンチェンジ試験におけるドライバ操舵挙動を模擬できるかどうかについて検討する。

4.1 実験結果 図10に示すようなレーンチェンジコースをテストコース上に設定し、そのときのドライバの操縦挙動および車両挙動を計測した。車速80 km/h(制動なし)で走行したときの典型的なエキスパートドライバと一般ドライバの操縦挙動を図11に示す。図11より、一般ドライバは、エキスパートドライバに比べると操舵量が少なくかつ操舵開始が早くなっており、さらに前半に比べ後半の操舵周期が遅くなっている。

4.2 目標軌道 ここで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。この問題に関してはドライバ特性研究の上で重要な課題であり、人間の危険感と関連づけた興味深い研究結果⁽¹⁵⁾

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(jerk)が最小になるように制御している⁽¹⁶⁾という点に着目し、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。そこでコースを図のように定義する。いま、目標軌道を表す関数を 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(10)のように定める。

$$\begin{aligned} y_m(x_1) &= y_1, & \dot{y}_m(x_1) &= \dot{y}_m(x_1) = 0 \\ y_m(x_2) &= y_2, & \dot{y}_m(x_2) &= \dot{y}_m(x_2) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$J_c = \int_{x_1}^{x_2} (\ddot{y}_m)^2 dx, \quad \ddot{y}_m = d^2/dx^2 y_m \quad (11)$$

このとき、条件式(10)を満たし J_c 式(11)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。

$$\begin{aligned} y_m(x) &= y_1 + (y_2 - y_1)(6s^5 - 15s^4 + 10s^3) \\ s &= (x - x_1)/(x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (12)$$

4.3 シミュレーション結果 4.2節の目標軌道を用い、予測時間をエキスパートは0.6秒、一般ドライバは0.8秒に設定してシミュレーションを行った。3章で示した予測時間は厳密に目標軌道を追従した場合であることと、図11のコースに対する操舵開始時間を考慮して、上記のように前章の結果よりも長く設定した。その結果と図11の実走行実験結果を重ね書きしたものを図12に示す。図12より、エキスパート

Fig. 10 Course of lane change

Fig. 9 Simulation results (velocity: 100 km/h)

Fig. 11 Experimental results (velocity: 80 km/h)

Fig. 12 Comparison between simulation results and experimental results (velocity: 80 km/h)

ドライバの操縦挙動とシミュレーション結果はよく対応していることがわかる。したがって、4・2節で検討した予測時間は実走行時においてもドライバモデルの予測時間設定の基準になることがわかった。また、実験結果より、一般ドライバは操舵のタイミングが早くかつ後半の操舵周期が遅くなるという特徴を模擬できていることがわかった。以上のことから、ドライバの技能差を予測時間の変化で表現することも可能であることがわかった。

5. ま と め

本研究では緊急時のドライバ挙動を模擬するドライバモデルの構築方法について検討した。

(1) モデルの基本構造を提示し、そのモデルの骨子である内部モデルと予測時間についてその構造および決定方法について検証した。その結果、ドライバが有する内部モデルとしては操舵に対するヨー特性モデルが妥当であり、厳密に目標軌道に追従する場合には予測時間は0.4秒～0.7秒程度が妥当であることがわかった。また、その予測時間が短い程運転技能が高いドライバを模擬することになる。

(2) 本モデルを用いてレーンチェンジ走行時のドライバ挙動の模擬を行った。このとき、目標軌道としては横方向の躍度が最小になる軌道を導入した。その結果、一般およびエキスパートドライバの操縦挙動を模擬できることがわかった。

今後は、本モデルを緊急時のドライバ挙動模擬に適用し、車両の予防安全性能評価に役立てるための検討を進めていく。

付 録

式(3)は次式のように表せれる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}(t) \\ \ddot{\phi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1/T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \dot{\phi}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K/T \end{bmatrix} u(t) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $z = [\phi \ \dot{\phi}]^T$ とし、上式をサンプリングタイム ΔT で離散化すると次式を得る。ただし、 $u(t)$ は $[t \ t + \Delta T]$ で一定とし、 k は現時刻 $t(k \times \Delta T)$ の離散時間表現である。

$$z(k+1) = A_d z(k) + b_d u(k) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\phi(k) = cz(k) = [1 \ 0] z(k)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & T - Te^{-\Delta T/T} \\ 0 & e^{-\Delta T/T} \end{bmatrix}$$

$$b_d = K \begin{bmatrix} \Delta T - T + Te^{-\Delta T/T} \\ 1 - e^{-\Delta T/T} \end{bmatrix}$$

このとき、 $u(t)$ は $[t \ t + t_n]$ ($t_n = n \times \Delta T$, $t_n \leq \tau$) で一定、つまりその舵角で保舵すると、 n ステップ先 (t_n 秒先) のヨー角 $\phi(k+n)$ は式(14)より次式のように求められる。

$$z(k+n) = A_d^n z(k) + b_d u(k) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\phi(k+n) = cz(k+n)$$

$$A = A_d^n, \quad b = A_d^{n-1} b_d + \dots + A_d b_d + b_d$$

ここで、 A_d, b_d を用いて A, b を求めると、次式のようになる。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T - Te^{-t_n/T} \\ 0 & e^{-t_n/T} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$b = \begin{bmatrix} t_n - T + Te^{-t_n/T} \\ 1 - e^{-t_n/T} \end{bmatrix}$$

式(5)を式(15)に代入することにより、次式を得る。

$$\phi(k+n) = cAz(k) + cbu(k-1) + cb\Delta u(k) \quad \dots\dots\dots (17)$$

したがって、式(4)の評価関数を最小にする Δu は、 $\partial J / \partial (\Delta u) = 0$ に式(17)を代入することにより、次式のように求められる。

$$\Delta u(k) = F[cAz(k) + cbu(k-1) - \phi_m - \phi(k)] = F[\alpha \dot{\phi}(k) + \beta u(k-1) - \phi_m] \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\alpha = T(1 - e^{-t_n/T})$$

$$\beta = K(t_n + T(e^{-t_n/T} - 1))$$

$$F = -\beta / (R + \beta^2)$$

文 献

- (1) Mcruer, D. T. and Jex, H. R., A Review of Quasi-Linear Pilot Models, *Trans. Human Electronics*, Vol. HFE-8-3 (1967), 231-249.
- (2) 吉本賢一, 人間-自動車系のシミュレーション, 自動車技術, 25-10 (1971), 1058-1069.
- (3) Kleinman, D. L., ほか2名, A Control Theoretic Approach to Manned-Vehicle Systems Analysis, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. AC-16-6 (1971), 824-832.
- (4) 景山一郎・ほか2名, ニューラルネットを用いた人間-自動車系のモデル化, 自動車技術, 48-2(1994), 5-11.
- (5) 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), 293-298.
- (6) 永井正夫, マン・マシン・システムの理論, 自動車技術, 39-5(1985), 486-492.
- (7) 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), 21-28.
- (8) 原田宏, 操縦性・安全性技術を振り返る-操縦性定量評価の試み-, 自動車技術, 49-12(1995), 34-40.
- (9) 堀内伸一郎, 操縦者の制御動作モデルと操縦性の評価, 45-3(1991), 5-11.
- (10) 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, 電機学会論文誌, 95-2, C(1975), 6-12.
- (11) Mclean, J. R. and Hoffmann, E. R., The Effects of Restricted Preview on Driver Steering Control and Performance, *Human Factors*, 15-4 (1973), 421-430.
- (12) 藤井省三, デジタル適応制御, コンピュートロール, 27(1988), 28-41.
- (13) 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.
- (14) 佐藤方彦監修, 人間工学基準数値数式便覧, (1992), 172, 技報堂出版.
- (15) 景山一郎, 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), 1-7.
- (16) 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.