

《小特集》

自動車のドライビング・シミュレーション

平松金雄*

ABSTRACT An autonomous vehicle requires control algorithm by which a vehicle is driven. Such a simple criterion to minimize the error between the desired and actual path does not necessarily provide real human behavior. One approach for realizing more human-related autonomous vehicle, is to make a vehicle behave in a way of human decision-making rule. Human behavior models such as sight distance, second-order prediction, programmed steering, fuzzy control, model-referenced adaptive control, and neural network system models, are briefly surveyed in this paper. Followed by short comments on usefulness of driving simulator for investigation, some future works are described on the development of modelling of human behavior.

1. まえがき

自動車運転は、図1に示すようなプロセスを経て行われる。すなわち、外部環境から視覚、聴覚およびその他の感覚受容器を介して得られた刺激信号は、神経を通して脳へ送られ、脳では信号の種類や大きさを同定するとともにそれに応じた指令を発し、最終的に手足を介し自動車運転がなされる。この一連の動きは、運転状態に応じ中断無くスムーズに行われなければならない。一度信号経路が断絶したり、あるいは中枢系での判断が誤り不適切な操作が行われれば、直ちに事故に結びつく可能性がある。そのような意味で、このプロセスが適切に作動するか否かは極めて重要である。

この入力から出力に至るプロセスの制御は、言うまでもなく、普通は人の判断に委ねられている。人が操作しやすい機械の研究、すなわち人と機械とのインターフェイスに関する研究は、当初は人が出せる力や動かせる操作の範囲などを考慮することから始められた。その後、制御理論などを援用し、自動車運転時の人の動特性の検討がなされ、最近では脳における信号処理といった人工頭脳モデルまで検討される時代に至っている。

本稿では、まず自動車運転にみられる一連のプロセスを、人工的に置き換えたならどうなるかという観点のもとに、ドライバ・モデルを中心としたドライビング

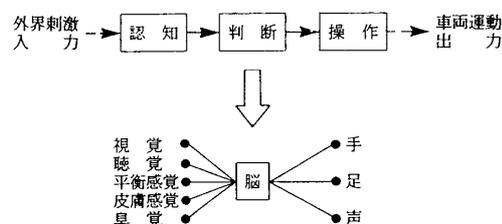


図1 自動車運転のプロセス (シグナルフロー)

・シミュレーションについて概括する。次に、ドライバのモデル化の研究にあたって用いられるドライビング・シミュレータの有効性に触れ、最後にモデル化研究の将来課題について述べる。なお、ドライビング・シミュレーションとは、動力伝達系の数値シミュレーションを指して呼ぶことがあるが、ここでは人の判断機構をモデル化し、それにしたがつた走行シミュレーションを指してドライビング・シミュレーションと呼ぶ。

2. 自律走行車

刺激を受ける受容器のなかで最も重要なのは視覚である。また、中枢で判断した指令を行動に移す際必要となるのは、手足の動きである。自動車運転では両者が協調し、運動しなければならない。この共働作用を司るのが脳である。手足のうち、手はハンドルを介して車両の横方向の運動を、また足はアクセルやブレーキペダルを介して前後方向の運動を司っている。

自律走行車とは、外界刺激をセンサーでとらえ、内部コンピュータで判断処理し、電気信号として出され

Automobile Driving Simulation. By Kaneo Hiramatsu (Japan Auto-mobile Research Institute, Inc.).

*財団法人自動車研究所

た指令をアクチュエータで動かし、自動車を自律的に操縦するものである。これはときに、自動操縦車あるいはロボット自動車と呼ばれる。自律走行車を実現するには、外界刺激をとらえる視覚部分、判断を受け持つコンピュータ（アルゴリズム）部分、さらに手足に相当するアクチュエータが必要となる。

まず、外界刺激を受け取る視覚部分について考えてみる。前方の対象物を識別する方法には、現在のところ主に2通りの方法が挙げられる。1つは、レーザや超音波により相手との距離を計る測距方式（図2参照）、いま1つはテレビカメラから得た映像を画像処理し対象物を識別しようとする画像処理方式（図3参照）である。

前者は、瞬時のうちに対象物を識別するが、相手が石であるか人であるかの区別は難しい。一方画像処理方式は、対象物を形状パターンに分類・識別するもので、識別精度は内蔵された計算機の性能などに依存している。この方式では、まだ人の眼の代用はできないが、人工眼としての可能性は高いといわれている。ただし、外界の照度が低く、コントラストがはっきりしない場合には、カメラの明るさの関係から識別能力が落ちるなどの欠点があり、なお改良の余地があるといわれている。

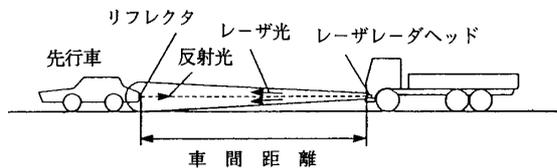


図2 レーザレーダによる車間距離測定の概念図¹¹⁾

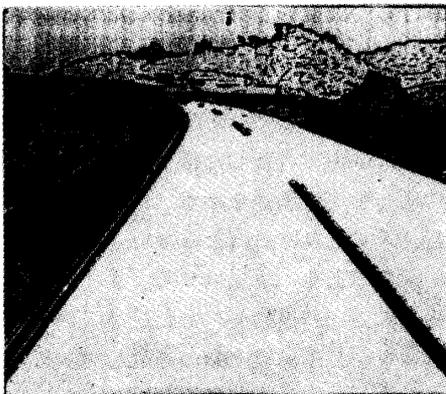


図3 画像処理による走行路認識の例¹⁶⁾

3. ドライバ・モデル

3.1 人工頭脳

いま仮に人工眼によって、運転に必要な前方視野情報が取り込まれたとすると、自律走行するうえで次に問題となるのはドライバの判断機構である。自動車の分野では古くから、ハンドルを切ったときの車両の横方向の運動に関しこの判断機構が検討されており、いわゆるドライバ・モデル（人工頭脳）の研究が行われてきた。

いまのところ、人工頭脳とはいっても極めて幼稚なものであり、人の脳にはとても及ばないが、単一局面では人の運転を代行できるところまでできているようである。例えば、直進近傍の運転を例にとると、判断機構の基本はセンターラインないし路側からの横位置のずれを最小化することにある。交流磁界からの電位差として横位置の検出を行う誘導ケーブル方式によれば、50 km/h 走行時の誤差は約数 cm といわれ、かなり精度がよく、見方によっては人の運転より上手ともみられる。ただし、誤差を最小化するという規範にしたがった運転は、必ずしも人の運転形態と一致していない。

3.2 主なドライバ・モデル

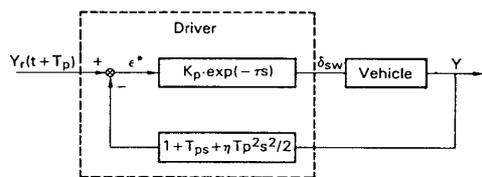
○ 前方注視距離モデルおよび二次予測モデル

これらはいずれも前方 L_m 地点でのセンターラインとの偏差を最小にするという運転アルゴリズムにしたがったドライバ・モデルである。横位置の変化率で見ると、前者は1次微分、後者は2次微分まで利用するかたちになる。1次微分は全系の安定性、また2次微分は主に速応性に寄与する（図4参照）。例えば、二次予測モデルを用いるとコース追従性は極めてよく、他のモデルの比し実験値との誤差も小さいという特徴がみられる（図5参照）。

これを実際の人の運転と比較すると、やや異なったパターンを示す。図6はレーンチェンジのシミュレーション結果であるが、車速70 km/h 付近ではよく一致しているが、車速が60 km/h 以下の低・中速の場合にはモデル応答の方が実験値（人の運転）に比し大きい結果となっている。これに対し、前方注視距離モデルでは二次予測モデルとは逆に、低・中速で実験とシミュレーション結果がよく一致し、高速ではあまり合わなくなるという結果が得られている⁸⁾。

○ プログラム操舵モデル

レーンチェンジのような素早い操作が必要となる運転では、人はセンターラインとの偏差をできるだけ小



$\eta = 0$ のとき前方注視距離モデルに等価。

- Y_r : 目標コース
- Y : 車両重心点の位置
- δ_{sw} : ハンドル角
- ϵ^* : 目標コースと車両重心点の予測位置との偏差
- τ : ドライバの反応時間
- K_p : ドライバの操舵ゲイン
- T_p : 予見時間
- η : 二次予測項の重み係数
- t : 時刻

図4 二次予測モデルのブロック図⁸⁾

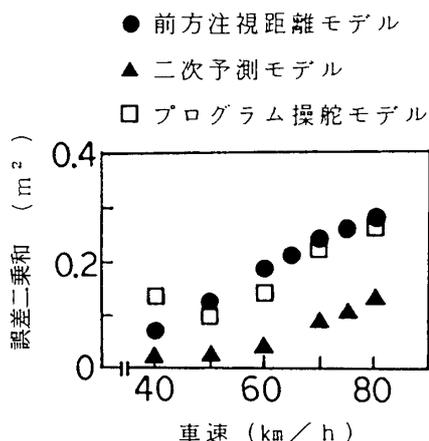
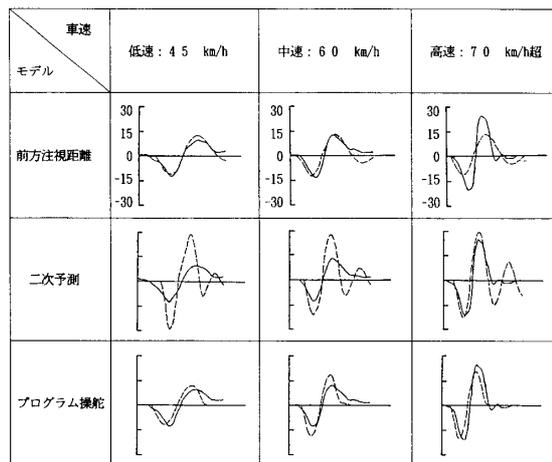


図5 モデル間の誤差二乗和の比較⁸⁾

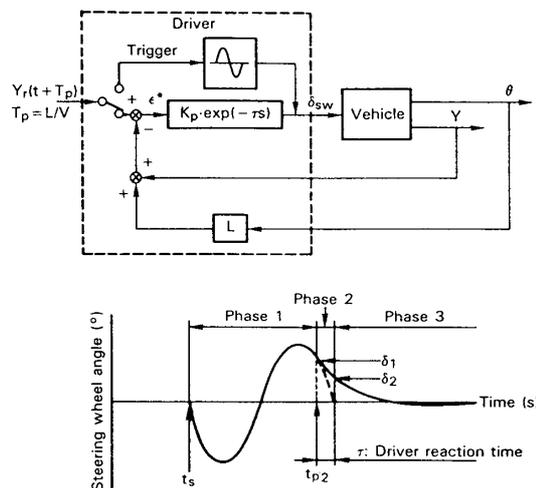
さくするという規範にしたがい運転するのではなく、ある決まったパターンにしたがい操作すると考える方が自然ではなからうか。このように、あらかじめプログラム化された操作を行うとする、オープンループ制御モデルの1つとしてプログラム操舵モデルが提案されている。

図7は、筆者らが提案したレーンチェンジ時のプログラム操舵モデルのブロック図である。このモデルはコース進入時に一波長正弦波状にハンドルを切ることをあらかじめ決めてあり、コース脱出後は前方注視距離モデルによってクローズドループ運転するとしたものである。本モデルによれば、前方注視距離モデルや二次予測モデルでみられた車速による不一致がみられ



なお、実線: 実験値、破線: シミュレーション、また表中の数字の単位: ° / s

図6 シングルレーンチェンジのシミュレーション結果 (ヨー角速度波形で比較)



- θ : 車両のヨー角
- L : 前方注視距離
- t_s : プログラム操舵開始時刻
- t_{p2} : 前方注視距離モデルによる認知が開始される時刻
- δ_1 : t_{p2} におけるプログラム操舵によるハンドル角
- δ_2 : t_{p2} において前方注視距離モデルにより判断されたハンドル角

図7 プログラム操舵モデルのブロック図⁸⁾

ず、前掲の図6に示すように、全車速にわたって一致度の高い結果が得られている。

○ ファジィ推論モデル

人の判断は本来あいまいなもので、このあいまい性を考慮したものにファジィ推論モデルが挙げられる。

プログラム操舵モデルを例にファジィ推論を適用した結果について述べる。

プログラム操舵モデルを起動するには、ハンドル角振幅、ハンドル角周波数および操舵開始地点を定める必要がある。これらのパラメータを設定する入力変数として、ここでは車速、コース幅（車幅を考慮）、回避幅、回避距離を考慮する。まずこれら入力(前件部)および出力(後件部)変数間で適当なルールを設定する。例えば、車速が高いと、人は全般にハンドル角は大きめ、周波数は早め、開始地点は近め、というようにする。次に、この大きめなり小さめなりの関係を、メンバシップ関数と呼ばれるもので表す。図8には筆者らが用いたメンバシップ関数の例を示すが、前件部では分割数を2つ、また後件部では3つ設定している。

このような規則で運転したときの結果を図9に示す。ファジィ推論という一見あいまいなルールにしたがった場合にも、自動車はコース逸脱することなく運転される様子がわかる。ファジィ推論を使うと、例えば車速の分割点を操作することにより、普段より高め

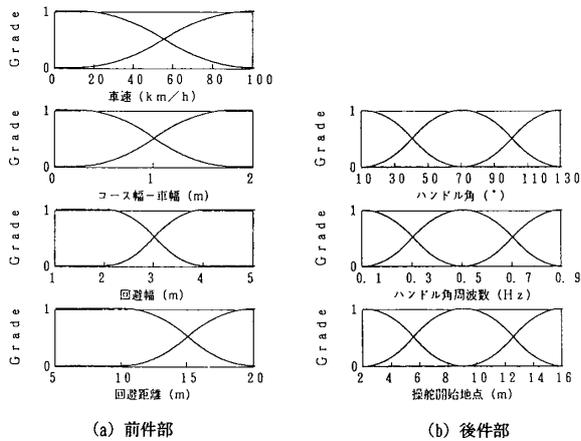


図8 シングルレーンチェンジで用いたメンバシップ関数⁹⁾

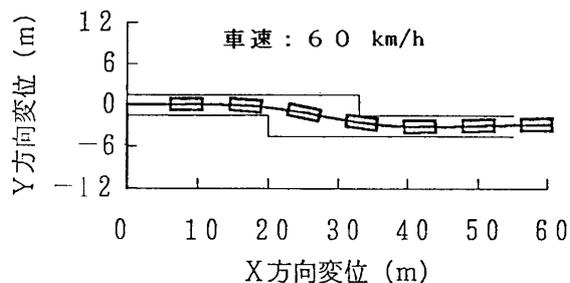


図9 ファジィ推論モデルによる走行例⁹⁾

の車速で走行した場合にはどうなるかといった検討ができ、判断の誤りなどによる事故シミュレーションも可能と思われる。

○ モデル規範形適応制御モデル

このモデルは自動車の動特性変化に対して参照モデル(図10参照)内のパラメータを調整することにより、実際のドライブ操作に似たモデルを得ようというものである。適用例として永井らの研究が挙げられる。これは、曲線路を走行中路面状態が乾燥から湿潤へ急変したとき、この変化に応じドライブの運転行動がどのように変化するか調べたものである。図11に示すように、実際の車両挙動(丸印)にはほぼ一致したモデル応答(実線)が得られていることがわかる。

適応モデルは、自動車を運転するドライブの運転特性を表したものであるから、必然的に個人差を反映したものとなる。現在の自動車の形態(人が運転)では人の自由な運転の結果、事故が起きていると考えられ

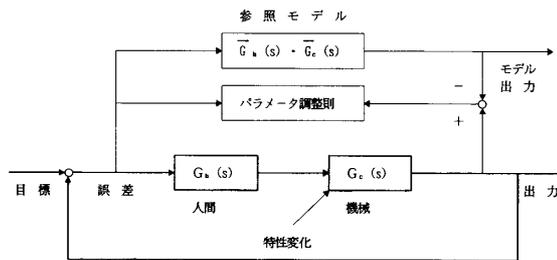


図10 モデル規範形適応制御モデルの基本構造⁶⁾

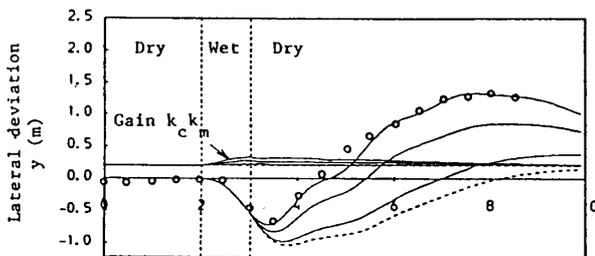
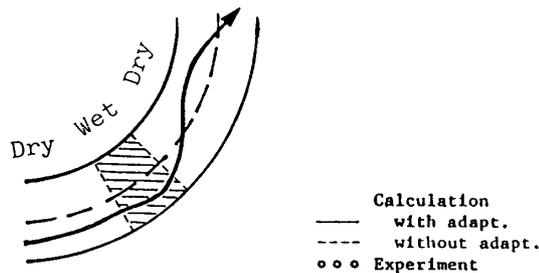


図11 横変位でみた車両挙動とモデル応答との比較(旋回外側走行時)⁶⁾

なくもない。もし適応モデルが運転中に瞬時に得られれば、不安全な操作を補償し、事故を未然に防ぐシステムができるかもしれない。運転の画一化、すなわち個性の喪失につながるという懸念はあるが、安全確保には役立つであろう。

○ ニューラルネットワークモデル

自動車運転への適用例としては藤岡らの研究がある。ニューラルネットワークモデル（以下、NNSモデルと呼ぶ）は人の脳の情報処理過程を模擬するため考案されたもので、多入力1出力系の形式ニューロンを単位（ユニット）として（図12参照）、それを多数ネット状に結合したシステムである。教師信号と呼ばれる評価基準に対しモデルが学習適応し、最終的にドライバ・モデルが自動生成される点に最大の特徴がある。NNSモデルは学習適応の過程でユニット間の結合が強くなったり、弱くなったりするが、これが直観的、パターンのな認識を可能にし、人の判断に近いモデルが得られるといわれている。このモデルによる走行例を図13に示すが、人の運転（図中被験者として表示）とよく似ていることがわかる。

なお、ユニットへの入力信号の荷重和は、ある応答関数を介して出力され、この応答関数として一般にジグモイド関数（図14参照、準線形飽和型の応答関数）が用いられるが、大変興味深いことに、この形は筆者らが研究中的フィーリングと車両物理量（例えば、車両旋回時の横加速度やヨー角速度など）間の関係に極めてよく似ている。これは、脳の情報処理モデルとしてのニューラルネットと、認知・判断を経て得られるフィーリングとが、同義であることを暗示しているの

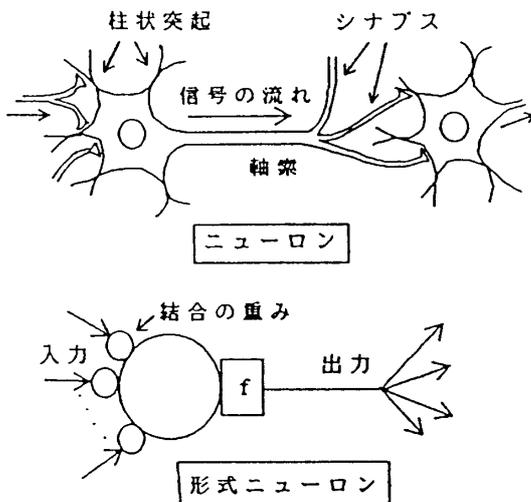
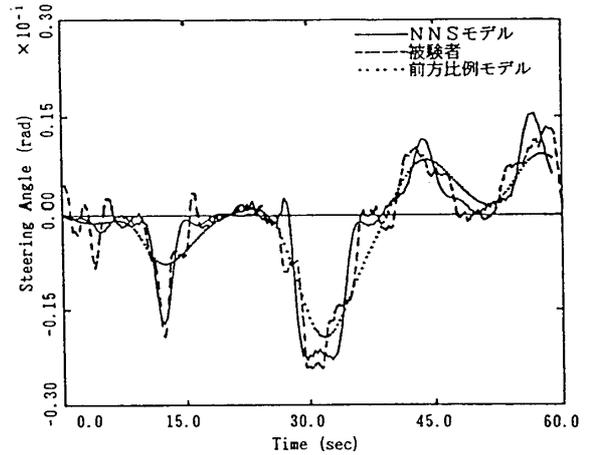
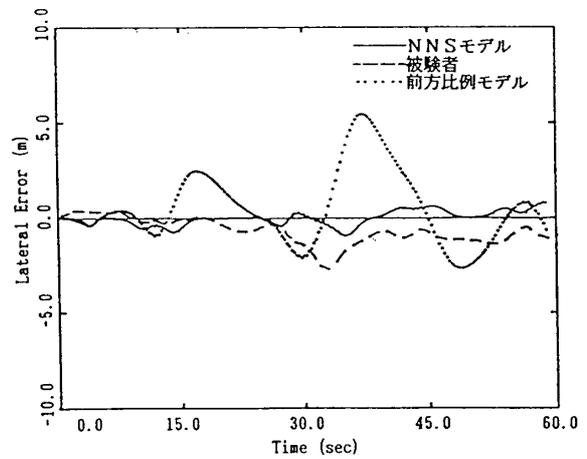


図12 形式ニューロンモデル¹²⁾



a 前輪操舵角



b コースからの偏差

図13 NNSモデルによる走行例¹³⁾

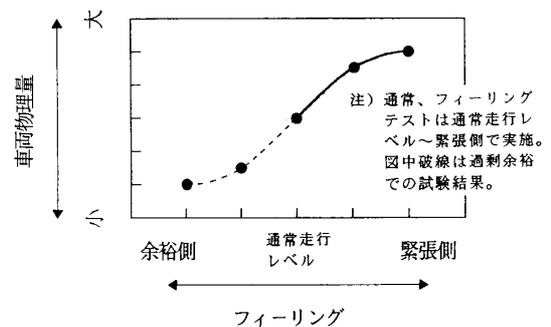
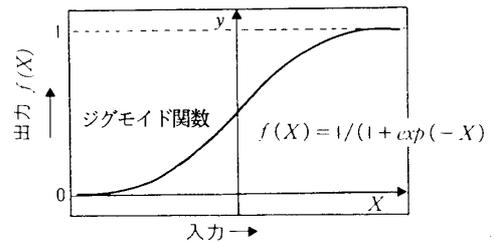


図14 ジグモイド関数とフィーリングとの形状

ではなかろうか。

以上の他にも旋回時のプログラム操舵モデル²⁾などが挙げられるが、この方面における我が国の研究は全般的にみてかなり活発である。

4. ドライビング・シミュレータ

上記モデルはいずれも実際の運転行動の観察から、人の特徴を抽出し、判断機構ないし操作機構を数理モデルとして表したものである。しかし、特徴的な面をとらえているとはいえ、自動車運転のすべての局面に適用できるというわけではなく、その範囲は自ずと限定されている。

モデルの適用範囲を明らかにすることは、実は大変重要なことであるが、従来あまりやられていない。これは、1つに、すでに開発されてしまったモデルを検証するのは後追い調査のようなもので新規性に欠けること、また第2として、この検証作業では往々にして車両の限界付近の検討が必要となるが、これは実車では危険を伴うため到底行い得ず、実験の実施が難しいことによる。

第2の理由は、実際には第1の理由にも増して大きな問題である。これを打開するために、「危険運転を安全にテストする」道具として、ドライビング・シミュレータの利用が考えられる。

表1には1959年以降の主なシミュレータを取り上げ、ビジュアルおよびモーションシステムとともに、その利用目的を示してある。ビジュアルシステムとしては、最近の傾向としてコンピュータで画像を作成するCGI方式が主流であり、またモーションシステムとしては、数自由度を有するものから、自由度を持たないものまで様々である。利用目的をみると、人間-自動車系の研究を掲げているものが最も多く、このなかには前述の永井らや藤岡らのように、ドライバ・モデルの研究も含まれている。

限界付近あるいは危険運転の実験というのは、言うまでもなく、安全に直結した研究となる。以上のことから、ドライバのモデル化の研究は、結局安全研究につながっていると言える。

5. 将来の課題

ドライバ・モデルはいままでのところ、主に単一局面の走行に限定し検討がなされてきた。例えば、レーンチェンジや旋回などそれぞれの場面での適用性が議論されてきたわけであるが、今後はこれらをベースに、より多くの場面に適用可能な汎用モデルの検討が

なされるのではなかろうか。先に述べたNNSモデルなどは、学習過程を考慮している点でこの範疇に属すると思われる。

自動車の操安性（操縦性・安定性の略称）についていえば、代表的な走行パターンとしては以下のようなものが挙げられ、これらに湿潤や凍結路といった低 μ 路（摩擦係数の低い路面の意）、および横風や路面凹凸などの外乱条件を加えれば、大方の範囲はカバーすると思われる。汎用モデルということになると、これらの範囲をカバーするモデルということになろう。

- ① 直進（ブレーキ含む）
- ② 旋回（ブレーキ含む）
- ③ レーンチェンジ（シングルおよびダブルレーンチェンジ含む）

筆者らはプログラム操舵モデルを用いた場合のレーンチェンジの検討を行っているが、シングルレーンチェンジ（単に車線移行する場合）への適用の可能性については一応の見通しを得つつあるが、ダブルレーンチェンジ（車線移行後元のレーンに復帰する場合）についてはなお未解明である。

ドライバのモデル化の研究は、一種の人工頭脳化の研究である。現在の科学技術の進歩は驚くほどのスピードであり、近い将来ある程度の人工頭脳化が可能になるのではなかろうか。自動車運転についていえば、単一局面の理想的条件下では自律走行は可能であろう。これができるようになると、どのような効果が期待できるか。例えば、東京・大阪間といった長時間運転を、一切の人の操作なしに行けることになるかもしれない。もちろん、システム故障など起きないように十分に配慮する必要があるが、こうなれば高速道路上での交通事故が一挙になくなるという期待がもたれる。

さらに、ドライバのモデル化の研究は、筆者の考えでは、人の判断機構の解明に役立つと思われることである。脳の解剖学的構造や化学作用などについてはかなりよくわかってきているが、記憶や思考のメカニズムはほとんどわかっていない。ニューロコンピュータのアルゴリズムは人の判断や学習パターンに近いとはいえ、ほんの一部を代弁するに過ぎない。しかし、上記のような数理モデルの研究が、逆に脳の機構を推定していくうえで役立つのではなかろうか。

上記のほかにも実用上の課題として、モデル運転と実際の人の運転との相違いを調べる必要があると思われる。モデル運転がどれほど正確で誤差のないものでも、同乗した人が違和感を抱いたのでは使い物にならないのではないか。自律走行車が人に不快感を与えな

表1 内外の主なドライビング・シミュレータ

No	所有機関	製作年	ビジュアルシステム	モーションシステム	利用目的
1	カリフォルニア大学 (UCLA)	1959年	フィルム撮影方式 ・画面の速度制御 ・画面の横移動 ・360°全周囲映像	実車/ドラム方式 ・実車を運転	・運転行動と視野 ・運転者の身体条件
2	アメリカ公衆衛生局	1963年	モデルボード方式 ・他車両の飛び出し	なし	・緊急場面での事故回避行動 ・反応時間
3	オハイオ大学	1968年	モデルボード方式	ジンバル方式 (ロール, ピッチ)	・高速道路の条件とドライバ
4	機械技術研究所	1968年	モデルボード方式 ・ベルト式模型 ・TVカメラの横移動	共働支持方式 (ロール, ピッチ)	・人間-自動車系の研究
5	仏フェロード社	1972年	なし	実車/ドラム方式	・車両運動の研究
6	フォルクスワーゲン社	1972年	アナログ演算による線画 ・CRT画面に表示 ・障害物の設定	ジンバル方式 (ロール, ピッチ,ヨー)	・運転者-自動車-道路シス テムの研究
7	職業訓練大学	1975年	スライドによる静止画 ・プログラム学習法	なし	・初心者の運転技能訓練
8	芝浦工業大学	1976年	トラック目標を前方に呈示	実車/ドラム方式	・人間-自動車系の研究 ・4輪操舵の基礎研究
9	豊田中央研究所	1978年	合成映写方式 ・道路風景とレーザーク	実車/ドラム方式	・人間-自動車系の研究
10	大阪産業大学	1982年	モデルボード方式 ・TVカメラの横移動 ・歩行者の飛び出し	ジンバル方式	・ドライバ特性の研究
11	警察庁	1983年	フィルム撮影方式	なし	・高速道路の運転体験
12	スウェーデン道路交通 研究所(VTI)	1983年	CGI方式 ・水平面角 120° (3ch)	ジンバル+レール方式 (ピッチ, ロール, 横移動)	・人間-自動車-道路環境系 の研究
13	東京大学 (吉本研究室)	1984年	CGI方式 ・CRTモニタ表示	共働支持方式 (ロール, ピッチ, ヨー, 上下動)	・人間-自動車系の研究
14	ダイムラーベンツ社	1984年	CGI方式 ・水平面角 180° (6ch)	共働支持方式 ・6自由度の動き	・車両の開発 ・部品の開発
15	北海道トラック協会	1984年	フィルム撮影方式 ・CRT 3ch	なし	・トラックドライバの 安全教育
16	東京大学 (藤岡研究室)	1988年	CGI方式 ・マイコンによる作画	なし	・ドライバ特性の研究
17	日野自動車	1989年	CGI方式 ・水平面角 120°	なし	・リアクションシステムの開発 ・ショー展示
18	マツダ社	1990年	CGI方式 ・水平面角 68° (1ch)	ジンバル+レール方式 (ピッチ, ロール, ヨー, 横移動)	・人間-自動車系の研究 ・ドライバの感性と車両開発
19	日本電装	1990年	CGI方式 ・プロジェクタ 3ch	変形ジンバル方式 (ピッチ, ヨー, 前後移動)	・人間-自動車系の研究 ・ドライバ感性の研究

いたためには、人に似た運転をすることが前提になる。まずは、平均的な人の運転操作を真似することから始め、できれば各個人すなわち個性に合わせた運転ができるような車が望ましい。このような車は、内部に学習機能を持った、ニューロ自動車とも呼ぶべきものであろう。

6. あとがき

ドライバのモデル化は、それ自身極めて学術的な課題であるが、一方自律走行の観点からみれば、判断機構のモデル化に直結しており、これと切り離して考えることはできない。そのようなことから、本稿では冒頭に自律走行車を取り上げた。人の運転アルゴリズムがわかれば、それを考慮した自律走行車ができるに違いない。それはきっと、乗ったとき違和感を与えない車になるであろう。現状の研究成果を利用すれば、どんな自律走行車ができるだろうか。通常は適応制御なりNNSモデルで走行し、咄差のときはプログラム操舵モデルで回避する、そんなモデルになるのかもしれない。

工学的な意味でのモデル化の研究は、今から約40年前に *Tustin*⁷⁾ によって始められたといわれている。その後、様々な研究を経て、限定された局面ではあるが、自律走行ができそうなところまで来ている。現段階の技術で必要・十分というわけではなく、むしろ実用化にあたっての本格的な研究はこれからであろう。自律走行が人の個性を喪失するという問題が指摘される一方で、年間1万人以上もの交通事故による死者が軽減される可能性があるということは、極めて大きな意味を持っている。人の個性をも取り込んだニューロ自動車と、それと融合可能な自律走行システムができ

れば、本稿で述べた主題が現実味を帯びてくることになる。

最後に、本稿の内容および図表の作成にあたって、(財)日本自動車研究所・第二研究部の相馬仁、佐藤健治の両氏にご助力いただいた。記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 近藤ほか：自動車の操縦を加えたる動的方向安定性に関する研究，日本機械学会（1949）
- 2) 大野：曲線路における操舵，自動車技術，20-5（1966）
- 3) 吉本：予測を含む操舵モデルによる人間-自動車系のシミュレーション，日本機械学会誌，71-596（1968）
- 4) 井口：人間-機械系，共立出版（1970）
- 5) 安倍：ドライバの制御動作モデルの動向，自動車技術，38-3（1984）
- 6) 永井：マン・マシン・システムの理論，自動車技術，39-5（1985）
- 7) 古川：操安性研究の歴史，自動車技術，41-3（1987）
- 8) 平松ほか：車線変更時のドライバ挙動のモデル化-プログラム操舵モデルの有用性，JSAE 論文集 38（1988）
- 9) 相馬ほか：ファジィ推論を応用したプログラム操舵モデル，JSAE 講演会881029（1988）
- 10) 奥野：自律走行技術の研究，JSAE シンポジウム，'89-01（1989）
- 11) 安間ほか：レーザレーダを用いた大型トラックの追突警報装置の研究，JSAE 論文集 41（1989）
- 12) 藤岡ほか：神経回路網（ニューラルネットワーク）を利用した運転者モデルの研究，JSAE 講演会901062（1990）
- 13) 田久保ほか：神経回路網（ニューラルネットワーク）を利用した運転者モデルの研究-第2報：一般路での走行シミュレーション，JSAE 講演会902262（1990）
- 14) 倉見：自動運転技術の開発動向，自動車技術，45-2（1991）
- 15) 重松ほか：ドライバモデルを用いた自動運転システム，自動車技術，45-2（1991）
- 16) 久田見：画像認識による自律走行技術，自動車技術，45-2（1991）