

# ドライビングシミュレータと ドライバー行動モデル

赤松幹之

産業技術総合研究所



## 1. はじめに

ドライビングシミュレータは、道路交通環境をコンピュータで模擬・再現して、そこを運転するための装置である。ドライビングシミュレータには、コンピュータゲーム、自動車教習所用シミュレータ、研究開発用シミュレータ、など幾つかのレベルのものがあり実用に供されているバーチャルリアリティ技術と言える。

テレビゲームのような簡易なドライビングシミュレータはハンドルやペダル操作をして制御することに重きが置かれている運転操作のシミュレータと言える。これに対して、大型のスクリーンによる広視野で運転できるシミュレータでは、道路交通環境の模擬が重視される。道路構造や建造物に関しては、コンピュータグラフィックス技術の発達によってリアリティが高まっている。一方、交通環境の模擬は、他の交通参加者である他車両や歩行者の挙動が対象だが、シミュレータの映像上では他車両は自動車の姿をしていても、それを操縦している人間の行動を再現しなければ挙動はリアルにならない。そのためにはコンピュータ上で動く人間行動のモデル、すなわち行動のデジタルヒューマンモデルが必要になる。

本稿では、ドライビングシミュレータ研究の流れを概観したのち、シミュレータ内の他車両等を動かすために必要な行動モデルの研究の現状について紹介する。

## 2. ドライビングシミュレータの歴史

ドライビングシミュレータの歴史は1950年代まで遡ることができる。この後1970年頃までは、当然のことながらコンピュータグラフィックスではなく、道路風景は映画(フィルム)方式または模型方式であった。模型方式とは、地形や建造物の縮尺模型の道路上の車両の位置にTVカメラをおいて、道路風景をスクリーンに表示するものである。このころは、運転台は固定式か、実車をドラム上で走行させる方式をとっていた(図1)[1]。実車/ドラム方式では、ハンドルの操作感や走行音また振動などは実走行に近いのでリアリ

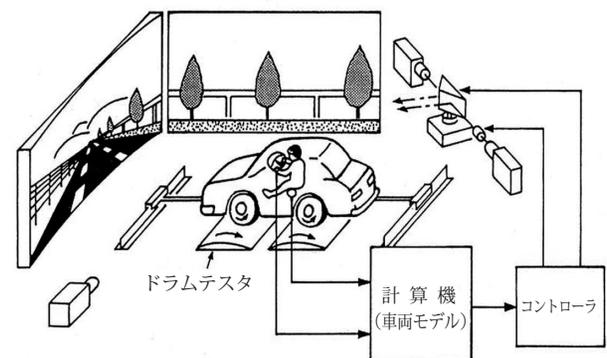


図1 ドラム式のドライビングシミュレータの例  
(豊田中央研究所) [1]

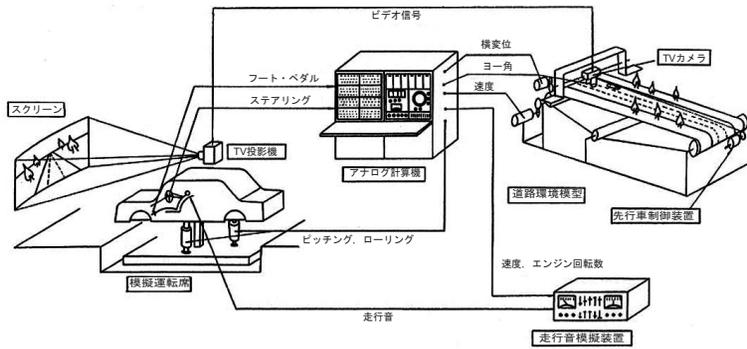


図2 模型式のドライビングシミュレータの例（機械技術研究所）[2]

ティが高いが、ほぼ直線的な道路しか走行できず、また加速や減速などに伴う体感は欠けていた。加減速の体感を模擬するためには運転台や車体を動かさなければならないが、1968年には(当時の)機械技術研究所で油圧のシリンダによって運転台をロール(前後軸回りの回転)とピッチ(左右軸回りの回転)方向に傾けて、横方向加速度と前後方向加速度の体感を模擬するシミュレータが開発されている(図2)[2]。電子的に道路環境を呈示する方式が導入されたのは1970年代に入ってからである。

こういったドライビングシミュレータの研究に多大なるインパクトを与えたのが、1983年にVIT(スウェーデン道路交通研究所)で稼働を始めたシミュレータ、そして1984年に稼働を始めたBenzのシミュレータである。特にベンツのシミュレータは、航空機のシミュレータの常套的な方式である6本のアクチュエータによる6軸(ピッチ、ロール、ヨー、前後左右上下の6自由度)モーションシステムを持ち、6台のプロジェクタとスクリーンそして実際の車両がそのまま入っているドームがモーションシステム上に置かれている大きなシミュレータであり、この分野の世界の研究者達をあっといわせたと言っても過言ではない。これまで多くのドライビングシミュレータは、人間—機械系の研究を目的としたり、事故の心配が無いことからアルコールやドラッグの影響を調べることを目的としていたものが多かった。これに対して、ベンツでは安全を第一の目的としてはいるものの、シミュレータを用いた実験を車両の部品開発にまでつなげると明言したことから、シミュレータの可能性の高さを示したものであり、その後のドライビングシミュレータの開発を加速させたと言える。

6軸モーションベースでは、前後左右方向の加速度

感を作るために車体を傾けることから回転成分が発生し、それが違和感をうむこと、モーションの傾きの変化速度が十分速くないこと、などから、ドライビングシミュレータでの6軸モーションベース方式の限界が議論されている。それを解決する方法の一つとして、最近ではドームとモーションベースごと1軸または2軸のリニアレール上を動かして体感をつくるシミュレータが作られるようになった。その最大のものがアイオワ大学NADS(National Advanced Driving Simulator)である(図3)。これは前後左右に約20m動くことができる2軸のリニアレールの上に6軸モーションベースが乗ったものである。しかし、モーションシステムが複雑になるために、従来の制御方法の延長では、この構造を生かしきれない。現在は、この構造を生かした最適な制御方法を模索している状況である。

このような大型のドライビングシミュレータを設置するためには体育館のような広さを持つ建屋が必要である。それ程の規模を必要としないドライビングシミュレータを構成する場合は、モーションベースの上には自動車のキャビンだけを乗せ、スクリーンは床置きにすることができる。産業技術総合研究所のドライビングシミュレータはこの形式である[3]。このシミュレータは市街地の走行も対象としているために、ほぼ全周囲の視野を持っている。前方は180度のアーチ型スクリーンを持ち、さらに右後方に43度の平面スクリーンを持つ(図4)。前方180度の視野は60度ずつ3台の3管式プロジェクタによって投影する。また、それぞれのミラーから後方の風景を見ることができるよう平面スクリーンでルームミラーと左右のドアミラーの視野範囲をカバーする。ルームミラーの視点とドアミラーの視点とは異なることから、3台の液晶プロジェクタでそれぞれの映像をスクリーンに投影するが、互いのオーバラップしている部分

が見えないように、偏光フィルタを用いて、それぞれ独立した映像がミラーから見えるようにしてある。

### 3. ITS とドライビングシミュレータ

近年ドライビングシミュレータが広まってきているが、これは ITS (高度道路交通システム) の研究開発が背景にある。ITS システムの有効性はそれが利用される運転状況において検討する必要があるが、障害物回避のような場合にはそういった状況での検討は安全上できない。また、システムが市場に出せるレベルまで精度や信頼性がない場合にはシステムの実際の有効性を確かめられないこと、またインフラ (道路側からの) 情報を利用する場合にはインフラ情報が整備されていないと検討ができないことなどが問題となる。そして、これらの問題点を解決できるのがドライビングシミュレータである。

ドライビングシミュレータでは事故に至る可能性のある状況下で運転させてみる事ができる。さらに、実際に開発中のシステムのセンサなどの精度が充分でなくても、シミュレータでは精度よくシステムが動作した状態をつくり出して評価することができる。もちろん、ハードウェアが実際の車両に組み込める大きさになっていなくても、運転シーンの上で評価ができることになる。このように、ドライビングシミュレータを用いることで、開発の初期段階、さらにはシステムのアイデア段階でのそのシステムの利用性や有効性の評価が可能となる。このようにドライビングシミュレータはドライバーの観点からの ITS の評価に向いている装置であると言える。

### 4. ドライビングシミュレータにおける行動のシナリオ

先に述べたように、ドライビングシミュレータの開発当初は安全性がねらいであったが、それは運転技量やアルコール等の影響といった運転者自身を対象としたものであった。その評価には車両のふらつきや道路のトレース性などを用いるが、この時には車両のモデルや道路のモデルの再現性が重要である。これに対し、ITS が支援する安全性は、他車両との衝突などの他車両との関係が問題となる場面である。したがって、どのようにして他車両の動きを再現するか。車両の動きはドライバーの行動を反映したものであるが、その人間の行動には階層性を仮定することが多い [4]。トップダウン的に行動を説明すると、まず何らかの目標があり、その目標を達成するためにプランニングが行われ、そのプランニングに応じて行為の系列が選択され、その行為を実現するために動作が発生する (図 5)。この結



図 3 NASD のドライビングシミュレータの外見



図 4 産業技術総合研究所に設置されているドライビングシミュレータの外見 (上) と模擬される道路交通環境 (下)

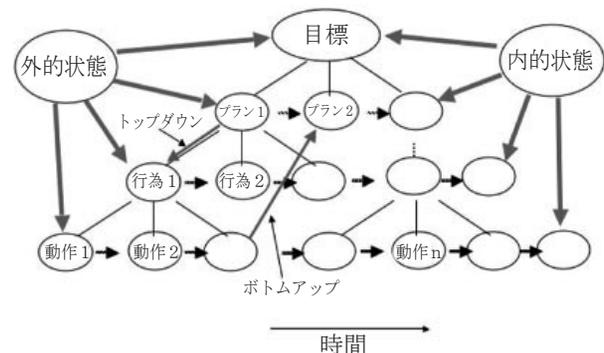


図 5 人間行動の階層構造モデル

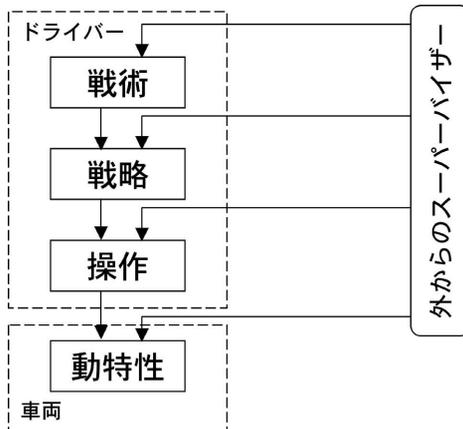


図6 階層化されているシナリオ構造の例

果が我々が観察できる人間行動である。

現在の多くのドライビングシミュレータでは、他車両の動きは、シナリオと呼ばれるものによって、どのタイミングで他車両を出して、どのように動かすかを決定している。シナリオは行動の階層構造を想定して、プランニング、行為の選択、行為の実行と分けることができる[5]。プランニングとは、出発地からどの経路をとって目的地に行くか、最高速度をどの値に設定するか、といった移動の計画に関することで、戦略の階層 (strategic layer) とも呼ばれる (図6)。行為の選択は、どの位置で右左折の行為をとるか、先行車に追いついた時にそのまま追従するか、車線変更をするか、といった判断であり、戦術の階層 (tactical layer) とも呼ばれる。そして、行為の実行はハンドル操作やペダル操作量などであり、操作の階層 (operational layer) とも呼ばれる。この操作の結果は、車両の挙動の変化を起し、道路内の車両の位置や速度や加速度が変化する。

行為の実行 (操作) による車両の挙動の変化は、車両運動モデルに従って変化すべきであるが、路上に存在する全ての車両の車両運動モデルを計算するのは負荷が高くなりかねない。そのために、この部分の計算は行わずに、行為の選択を行った後にその行為の結果としての車両の挙動を直接再現することが多い。その場合、道路内位置は、道路端または車線中央線の線形をなぞるように設定されており、車速の制御は、計算およびパラメータ設定の簡単のために、目標速度に対する一次遅れ系などが用いられている。これらは言わば最も単純化したドライバー運転行動モデルである。

高速道路などのようにカーブが滑らかで、速度変動が少ない場合には、適切なパラメータを選択すれば、

このような方法で他車両を制御しても、大きな違和感はない。しかしながら、市街地のように右左折があったり、発進停止が繰返されるような場合には、その動きは不自然に感じられる。これは、我々が普段目している他車両の挙動は車両自体の単純な数式で表現できるものではないことを意味している。したがって、他車両の動きをリアルにするためには、実際のドライバーがどのような運転行動を行なっているかを明らかにする必要がある。

## 5. 運転操作行動のモデル

### 5.1 これまでの運転行動モデル

古典的な運転行動モデルはサイバネティックモデルすなわち線形の微分方程式で表現された一次遅れ系や二次遅れ系のモデルである。しかし、実際の複雑な道路上での運転行動は様々な要因によって決定される行動であり、多くの変数が行動への入力 (行動形成要因) となっており、サイバネティックモデルの適用は困難である。こういった場合、行動形成要因と運転行動データがあれば、統計的モデル化手法を用いることで、因果関係のある変数によって構成される行動モデルを構築できる。

### 5.2 運転行動データの収集

我々は運転行動モデルを開発するために、種々のセンサを搭載した行動計測用車両を用いて、実際の道路上での運転行動データを計測して、蓄積している。運転行動計測用車両には、ドライバーの運転行動を計測するための各種センサおよび計測データを記録するためのドライブレコーダが搭載されている (図7)。この車両4台を用いて、一般のドライバーを対象として、茨城県つくば市周辺的一般道路を92名のドライバーに所要時間30分程度のルートを定め、被験者1名につき10～40回走行を行わせ、データベース化した。このデータベースを用いることで、例えば、停止交差点でのドライバーの減速行動の特性を定量的に明らかにすることができる [6]。

### 5.3 ベイジアンネットワークによる運転行動のモデル化

運転行動は多くの行動形成要因が関わることから、蓄積された通常行動のデータを基に種々の行動形成要因を考慮したモデルを構築する必要がある。このような運転行動のモデル化手法として、ベイジアン・ネットワーク・モデルと呼ばれるモデル化手法の研究を行

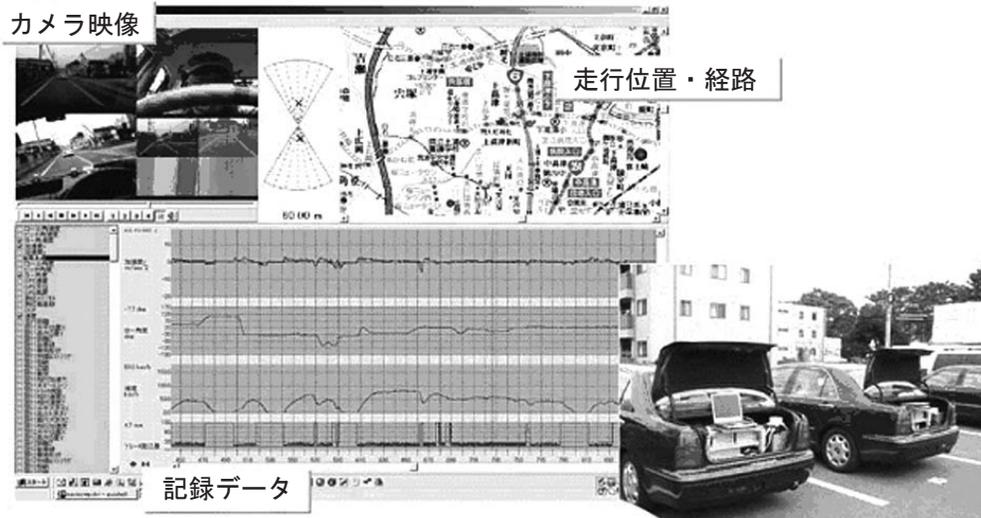


図7 運転行動計測用車両（右下）と計測データの例

なっている。ベイジアンネットワークは確率的知識（具体的には条件付き確率）を表現したグラフィカルモデルである。すなわち、ノードと呼ばれる変数の間に因果関係的な相関がデータから認められた場合に、その変数間に有向リンクを張るモデルである。

一時停止交差点における減速から停止に至る行動を例にとると、一時停止のT字路で停止するまでのドライバーの主な操作イベントは、「アクセルを離す」「アクセルからブレーキに足を移動」「ブレーキを踏む」「ウィンカーを出す」「最大減速度の発生」「停止（最低速度の発生）」である。このそれぞれの行動のタイミング（速度とTTC（交差点までの残り距離を速度で除したもの））と先行車また通過車両との関係そして交差点構造などの行動形成要因が相互にどのように関係しているかをベイジアンネットワークを用いてモデル化した。モデル化のために、11箇所の一時停止交差点を走行した12名のドライバーの全229走行データから、2,496回の一時停止交差点通過時データを抽出した。

ベイジアンネットワークによるモデル化により、各操作イベントのタイミング間と行動形成要因には幾つかの相互関係を持つことが明らかになった。図8で矢印が張られたノード間では、それぞれのパラメータ（速度、距離、時間）の間に何らかの関係があることを示している。この図から、例えば、アクセルオフタイミングは交差点の見通しが悪いと早まる、停止位置や速度は見通しや通過車両の有無そして個人の運転スタイルなどによって決まることなどが分かる。この他、ブレーキ踏み量に注目してモデル化を行うと、ブレー

キを開始してからのブレーキ踏み量は、交差点までの残り距離と車両速度および平均的にブレーキを強くかけるか弱くかけるかという個人差によって決まっていることなども分かった。

ベイジアンネットワークモデルは確率モデルであり、種々の行動形成要因の値が決まると、ブレーキ開始タイミングやブレーキ踏み量などの操作パラメータの発生確率が推定できる。確率モデルであることから、行動の適切性（操作タイミングの遅れなど）の行動評価に適したモデル化手法である[7]。この手法をシミュレータ上での行動生成に用いる場合には、例えば、推定された確率分布の期待値を実現値として用いることができる。さらに実現値を期待値からばらつかせることで、操作の変動を再現することも可能である。

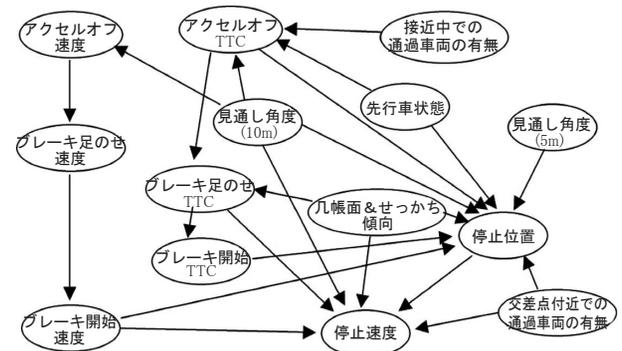


図8 減速行動のベイジアンネットワークモデル

## 6. おわりに

シミュレータ上で運転行動をリアルに再現できる運転行動のデジタルヒューマンの研究は緒についたばかりである。運転行動は様々な行動形成要因が関係することから、行動形成要因と発現行動の関係を IF-THEN ルール化して表現するプロダクションシステムではルールが複雑になるために、条件間のコンフリクトがおきるなど現実的ではない。このため、運転行動データを大量に用いて、統計的にモデル化する手法が期待されている。ここでは、ベイジアンネットワークモデルによる運転行動モデル化手法を紹介したが、このモデルは本質的には離散事象(イベントの発生)を対象としているために、モデルで実現できる行動には滑らかさは保証されていない。しかし、実際の車両の挙動は物理法則に拘束されているために、その発現は滑らかである。滑らかな挙動を出力させるためには連続関数型のモデルが必要であり、そのために Switching Linear Dynamics モデルなどが検討されている [8]。

ここで紹介した行動モデル化手法は、交差点までの距離、先行車両や後続車両との車間距離などを考慮にいたモデルを構築できるが、こういったモデルが適用できるのは、交通量が少ない時だけである。交通量が多くなった時には、こういった因果関係だけを考慮したモデルではうまく交通が流れなくなる。例えば、交差点において、対向する左折車両と右折車両が同じ通りに向かって曲がろうとしていて、かつその通りの横断歩道に歩行者が横断しているような状況である。このような場合に、これまでの通常のルールにしたがう行動モデルではデッドロック状態になってしまうことがある。これから分かることは、実際の交通状況では、その時々互いの駆け引きや譲り合いといった動的な人間と人間との関係があることによって、うまく流れているということである。行動するデジタルヒューマンを実現するためには、こういった人間行動のモデルも行なっていく必要がある。

## 参考文献

- [1] 三木：ドライビングシミュレータ技術，豊田中央研究所 R&D レビュー，Vol.26, No.1, pp.1-22 (1991)
- [2] 菊池ほか：高速自動車シミュレータの開発とその利用手法，機械技術研究所報告第 89 号，pp.1-49 (1976)
- [3] Akamatsu, M., et al. : Development of hi-fidelity driving simulator for measuring driving behavior, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.13, No.4, pp.409-418 (2001)

- [4] 赤松ほか：人間行動の計測技術と行動理解 - 人間行動適合型生活環境創出システム技術 - , ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.3, No.3, pp.167-178 (2001)
- [5] Leitao, J. : A scripting language for multi-level control of autonomous agents in a driving simulator, Proceedings of DSC '98 (Driving Simulator Conference), pp.339-351 (1998)
- [6] 赤松：運転行動データベースの構築とアクティブセーフティ技術への利用，自動車技術, Vol.57, No.12, pp.34-39 (2003)
- [7] Akamatsu, M., et al. : Modeling of driving behavior when approaching intersection based on measured behavioral data on an actual road, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting-2003, pp.1895-1899 (2003)
- [8] Kumagai, T., Sakaguchi, Y., Okuwa, M., Akamatsu, M. : Prediction of driving behavior through probabilistic inference, Proceedings of the Eight International Conference on Engineering Applications of Neural Networks (EANN'03), pp.117-123 (2003)

## 【略歴】

赤松幹之 (AKAMATSU Motoyuki)

(独)産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門 行動モデリンググループ長

1978年慶応義塾大学工学部卒業，1984年慶応義塾大学工学研究科博士課程終了。1986年工業技術院製品科学研究所研究員，組織改編に伴って，生命工学工業技術研究所研究室長などを経て，2000年より現職。専門は人間工学。共編書『人間計測ハンドブック』，訳書『事故はこうして始まった！』