

動作・判断を統合した行動の数理モデルの構築とその予防安全技術への応用
Mathematical modeling of human behavior based on integration of motion and decision

研究代表者 名古屋大学 教授 鈴木達也

【研究の目的】

人間行動モデルの構築は、人間と共存する人工物の設計において不可欠の重要な課題である。高次の人間行動は、通常、「認知」、「判断」、「動作」の各プロセスを経て発現すると考えられているが、このような高次の人間行動をモデル化するためには、各プロセスを個別に切り出してモデル化・解析するだけでは不十分であり、それらの相互作用まで考慮に入れる必要がある。そのためには、これらをできるかぎり統一的に扱う枠組みが必要となるが、これまで、これらを統一的に捉えた例はあまりない。これは、高次の人間行動における「判断」が「する」か「しない」かの離散的な（二値的な）情報処理であるのに対して、認知系における処理や動作系における動特性が連続的な情報処理であることから、適切な統一的数理表現が欠落していたことが要因の一つであると考えられる。本研究では、このような高次の人間行動は、「一連のプリミティブな動作とその切り替え（判断）によって実現される」との考え方に立って、連続／離散ハイブリッドシステムの観点から高次モーションの解析・設計のための新たな枠組み作りに取り組み、具体例として、前方車追従運転を取り上げ、ハイブリッドシステムとして捉えることの有用性を示す。

本研究で提案する枠組みの基本的な戦略は、観測された行動データに対して、ハイブリッドシステムに対するパラメータ推定手法を適用し、プリミティブな動作とモード遷移を観測データから同時にモデル化するというものである。ここで得られる高次行動のモデルは、一見すると複雑に見える高次モーションを、いくつかの動作モードの集合とその切り替えで表現することにより、(1)物理的理解が容易、(2)計算コストが少ない、(3)表現能力が高い、モデルとなっている。結果として、高次行動に対する実時間予測やアシスト系の設計等の工学的利用につなげやすいモデルであるとい

う特長を有することから、ハイブリッドシステムとして高次行動を捉える試みは、高次行動をモデル化、解析、設計するための基本的な枠組みを提供することになると期待される。

【研究の内容、成果】

図1に本論文で提案する高次モーションモデルの概略を示す。図1において、「Perception」は「知覚（情報の取捨選択、加工）」を、「Decision making」は「判断」あるいは「モード遷移」を、また、「Motion」は脳内で生成される「動作モード」を表しており、いくつかの異なったモードがあると仮定する。最終的には、脳から出力される指令に基づいて、手足が動作し、あるタスクを遂行する。図1に示すモデルでは、「動作モード」は知覚情報に対してある連続的な情報処理を行うのに対し、「判断」は、いくつかの動作モードの選択・切り替え、つまり離散的な情報処理を行っていることになる。このように、タイプの異なる情報処理をハイブリッドダイナミクスの観点から明示的に混在させている点が従来のモデルと比べた場合のこのモデルの大きな特徴である。

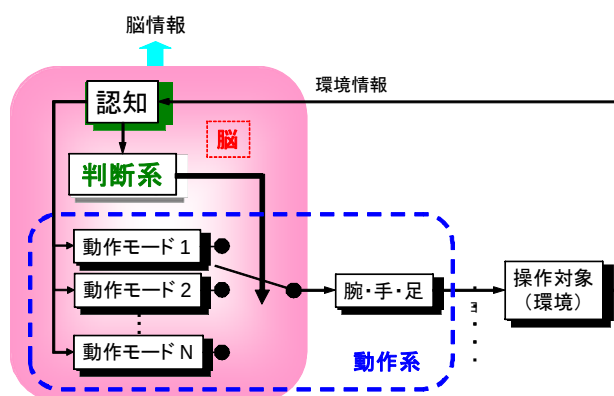


図1 ハイブリッドシステムとしての人間行動

次にハイブリッドシステムに対するパラメータ推定

法について述べる。ハイブリッドシステムに対するパラメータ推定法はさまざまな形で提案されているが、以下では本研究で用いたデータクラスタリングに基づいたアプローチの概要を述べる。(1)式に示すような N 個のモードからなる区分的 ARX モデル (PWARX: PieceWise AutoRegressive eXogenous model) を考える。(1)式において、 k は離散時刻を表し、 y_k は時刻 k での出力を表す。また、 Ψ_k は時刻 $k-1$ 以前の入出力データから構成される regressor ベクトルであり、 θ_i は第 i モードのダイナミクスに関するパラメータベクトルを表す。このモデルは、regressor ベクトルの存在領域によってモード (ダイナミクス) が切り替わるタイプのハイブリッドシステム表現となっている。また、 e_{ik} はモードごとに異なる式誤差であり、白色性と仮定する。

$$\begin{cases} y_k = \Psi_k^T \theta_1 + e_{1,k}, & \text{if } \Psi_k \in C_1 & \text{(Mode 1)} \\ y_k = \Psi_k^T \theta_2 + e_{2,k}, & \text{if } \Psi_k \in C_2 & \text{(Mode 2)} \\ \vdots & & \\ y_k = \Psi_k^T \theta_N + e_{N,k}, & \text{if } \Psi_k \in C_N & \text{(Mode N)} \end{cases} \quad (1)$$

データクラスタリングを用いた確定的ハイブリッドシステムのパラメータ推定の基本的アイデアは、まず、局所ダイナミクスを特徴量としたクラスタリング手法を用いて各データの属するモードを決定し、そのあとで Support Vector Machine (SVM) 等を用いて各モード間の分離面を求めるという点にある。クラスタリング手法は比較的大量のデータを扱うことが可能なため、モーションの解析のように大量のデータを扱う必要がある問題に対しても実用性は高いと言える。以下にその概要を示す (図2参照; ただし、図2において Ψ は一次元としている)。まず準備として、時刻 k での観測データ o_k を以下のように定義する。

$$o_k = (y_k, \Psi_k) \quad (2)$$

- 入出力からなるデータ系列 $\mathbf{O} = (o_0, \dots, o_T)$ が得られた場合、図2 (a)のように各 o_k ($k=0,1,\dots,T$) に対し距離の近い c 個のデータを集め局所集合 LDs_k を作り、特徴量 ξ_k を求める。ここで、特徴量 ξ_k は LDs_k 中のデータに対してARXモデルを当てはめ、最小二乗推定を施すことにより得られるパラメータ ((1)式中の θ_i に相当) と LDs_k 中のデータの平

均值とから構成される。

- データ系列 $\mathbf{O}$ 中の各データ o_k ($k=0,1,\dots,T$)を特徴量 ξ_k に変換することで特徴空間における分布を得る (b) (b)では、特徴空間は三次元としている)。そして、特徴空間上のデータに対し、K-means 法に基づいてクラスタリングを行う (c)。
- 特徴空間におけるクラスタリング結果を元のデータ系列 $\mathbf{O}$ に割り当てる (d)。

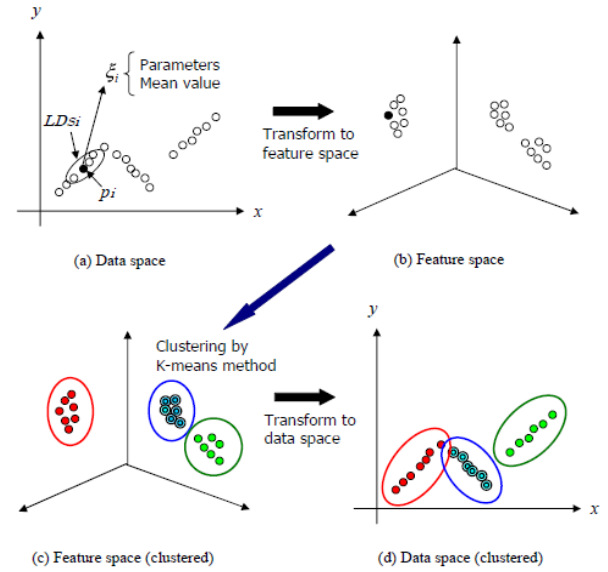


図2 クラスタリングに基づくモード分割

クラスタリングされたデータ系列 $\mathbf{O}$ 中の各モードに対し、通常最小二乗推定を施すことで各モードにおけるパラメータを求める。なお、上記の方法の場合、同時に複数本のデータ系列を解析対象としても何ら問題はない。ただし、K-means 法は基本的にはひずみ誤差を極小化するクラスタリング手法であるため、常に最適なクラスタリング結果が得られるとは限らない。したがって本研究では、初期参照ベクトルの配置を変更しながらクラスタリングを行った。次に切り替え条件の推定であるが、モード分割 (クラスタリング) がすでになされているので、各クラス間での分離面を求めることで、モードの切り替え条件が求められる。データが十分多ければ、例えば SVM 等を適用することで、非線形な分離面を含めたより一般的な切り替え条件 (分離面) を推定することも可能である。

次に、認知や判断を伴う高次の人間行動の一例として、高速道路等におけるドライバの前方車追従行動を対象として、確定的ハイブリッドシステムモデルに基づいたモデル化について述べる。ドライバの行動モデ

リングに関してはすでに多くの先行研究があるが、本研究の特徴は、モードとその遷移という概念を明示的に導入してモデル化を行う点にある。運転データ取得に当たっては立体視可能なドライビングシミュレータを用い、前方車の速度は 0[km/h]から 120[km/h]の範囲内で可変とした。図3にシミュレータの画面を示す。



図3 シミュレータの画面

このとき得られた観測データを図4に示す。図4は、上から順に、KdB(x_1)、車間距離(x_2)、車間相対速度(x_3)、アクセル/ブレーキ操作量(y : アクセル操作量を正、ブレーキ操作量を負として一次元化)を表す。ここで、KdB とは接近度に対する評価指標の一つで、運転者の網膜上に映る前方車背面の面積の時間変化率を表す。

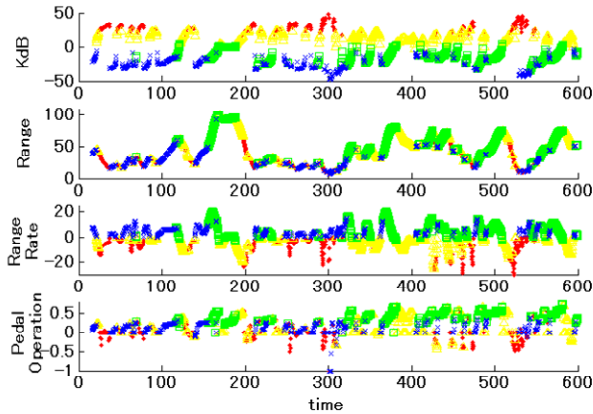


図4 観測された前方車追従行動データ

また本研究では、前方車追従行動における運転モードが4つに分けられるとし、その各モードにおける動作の定義を次式のように異なるARXモデルで表現する。

Mode A (collision avoidance)

$$y_k = a_1 x_{1,k-1} + b_1 x_{2,k-1} + c_1 x_{3,k-1} + d_1 y_{k-1} \quad \text{if } x_{k-1} \in C_1$$

Mode B (approaching)

$$y_k = a_2 x_{2,k-1} + b_2 x_{2,k-1} + c_2 x_{3,k-1} + d_2 y_{k-1} \quad \text{if } x_{k-1} \in C_2$$

Mode A (following control I)

$$y_k = a_3 x_{1,k-1} + b_3 x_{2,k-1} + c_3 x_{3,k-1} + d_3 y_{k-1} \quad \text{if } x_{k-1} \in C_3$$

Mode A (following control II)

$$y_k = a_4 x_{1,k-1} + b_4 x_{2,k-1} + c_4 x_{3,k-1} + d_4 y_{k-1} \quad \text{if } x_{k-1} \in C_4$$

ここで添え字の k はサンプリング時刻を表す。今、

$$\Psi_k = (x_{1,k-1}, x_{2,k-1}, x_{3,k-1}, y_{k-1})^T \quad (3)$$

$$\theta_i = (a_i, b_i, c_i, d_i)^T \quad (4)$$

と定義することで、前述のデータクラスタリングをベースとしたハイブリッドシステムのパラメータ推定手法が適用できる。これにより観測データのモード分割を行った結果を図5に示す。

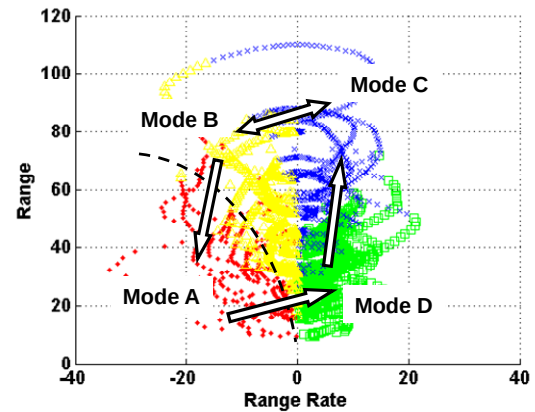


図5 前方車追従行動のモード分割結果

図5は車間距離－車間相対速度の空間でモード分割結果を示している。また、図4に示す観測データにはこのように得られたモード分割結果が示してある。これらを見ると、4つのモードの特徴を垣間見ることができるとは、SVM等を適用してモード間の分離面を求めることでモード間の遷移条件も導出可能となる。得られたパラメータの詳細についてはここでは省略するが、モード間の分離面に現れるパラメータを調べた結果、モード間の遷移において最も本質的な役割を果たしている知覚情報がKdBであることが明らかとなった。以上により、前方車追従行動のハイブリッドシステムとしてのモデル化が可能となった。

【今後の研究の方向、課題】

ハイブリッドシステムモデルに基づくアシスト系の設

計が重要な今後の課題の一つになると考えている。図5をもとに考えれば、Mode A がドライバーにとって危険な領域であるとみなせるため、Mode A への遷移をできるだけ抑制するようなアシスト系が望ましいということになる。この観点から筆者らのグループでは現在、図6に示すようなアシスト系の実現に取り組んでおり、その有用性の検証を進めている。アシスト系の実現結果については機会を改めて論じさせていただく。

一方、エキスパートシステムに代表される記号処理的なAIにおいて、記号接地の問題、すなわち記号化された表現と実世界での現象をどのように関連付けるかは大きな課題となっている。この点が克服されない限り記号処理的なAIには限界があると思われる。本研究で述べたハイブリッドシステムモデルをベースとした現象の表現、モデル化手法は、実世界における現象からほぼ自動的に記号化された表現を抽出することができる一種の信号-記号変換との見方もできる。その意味では、記号処理的なAIにおける記号接地問題の有力な解決手法の一つとなり得ると考えられる。また、上位概念としての記号処理的なAIと融合することで、実世界との親和性が高い知的人工システムの構築につながると期待できる。

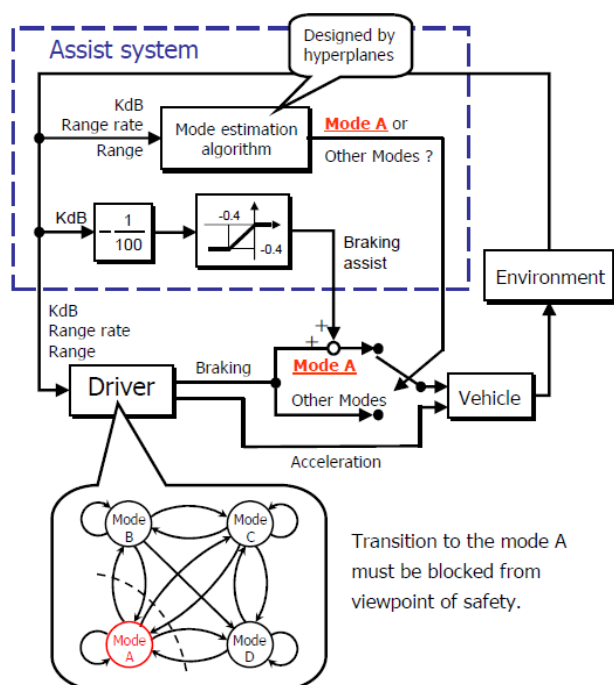


図6 ハイブリッドシステムモデルに基づいたアシスト系

【成果の発表、論文等】

- 1) S.Sekizawa, S.Inagaki, T.Suzuki, S.Hayakawa, N.Tsuchida, T.Tsuda, H.Fujinami, 'Modeling and Recognition of Driving Behavior Based on Stochastic Switched ARX Model', IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 4, pp.593-606, 2007
- 2) S. Taguchi, S. Inagaki, T. Suzuki, S. Hayakawa, N. Tsuchida, 'Modeling and Analysis of Driver's Decision Making based on Logistic Regression Model', Proc. of SICE Annual Conference, pp. 2390-2395, 2007
- 3) T. Akita, S. Inagaki, T. Suzuki, S. Hayakawa, N. Tsuchida, 'Hybrid System Modeling of Human Driver in the Vehicle Following Task', Proc. of SICE Annual Conference, pp. 1122-1127, 2007
- 4) S. Taguchi, S. Sekizawa, S. Inagaki, T. Suzuki, S.Hayakawa, N.Tsuchida, 'Stochastic Modeling and Analysis of Drivers' Decision Making', Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 587-592, 2007
- 5) T.Akita, S.Inagaki, T.Suzuki, S.Hayakawa, N.Tsuchida, 'Analysis of Vehicle Following Behavior of Human Driver Based on Hybrid Dynamical System Model', Proc. of IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp.1233-1238, 2007
- 6) 鈴木達也, 'ハイブリッドシステムと高次モーション', 電気学会論文誌 D 分冊 (招待論文), (2008年6月号 掲載予定)