

## 車両の時系列データから運転モデルを自動生成する手法

小林 大悟<sup>1)</sup>, 板倉 直明<sup>2)</sup>, 本多 中二<sup>3)</sup>, 猪飼 國夫<sup>4)</sup>, 風間 洋<sup>5)</sup>

都市部における渋滞現象を解析するためには、交通流のボトルネックとなる信号交差点での交通の再現が重要である。しかし、現実の交通は非常に多種多様である。そのため実用的なシミュレータを構築するためには、さまざまな条件を考慮してモデル化を行う必要がある。その一方でモデルを精緻化しようとするパラメータ設定が煩雑化してしまう問題が発生する。本論文では、車両の時系列データから運転モデルを自動生成することで精緻でありながら煩雑なパラメータ設定の必要がない運転モデルを提案する。また、信号における車両の停止・発進動作をシミュレーションし、その動作を検証する。

### Method of generating a driving model automatically from time series data of vehicles

DAIGO Kobayashi<sup>1)</sup>, NAOAKI Itakura<sup>2)</sup>, NAKAJI Honda<sup>3)</sup>,  
KUNIO Yikai<sup>4)</sup>, HIROSHI Kazama<sup>5)</sup>

For the analysis of the traffic congestion phenomenon in a city area, the simulation of intersection which is the bottleneck of a traffic is important. However actual traffic is very various. Therefore we have to consider many kinds of elements for modeling in order to built a practical simulator. On the other hand, an accurate model has the problem that parameter configuration becomes complicated and troublesome. In this paper, we suggest the driving model that is precise and easy to configure. We also verify the model by the simulation around a traffic signal.

#### 1. はじめに

都市交通における渋滞現象は、エネルギー的、経済的損失のみならず、環境破壊の面からも重大な社会問題になっている。渋滞の発生は路線の処理能力に対する過剰な交通需要によるものであり、交通環境の見直しをすることで処理能力を向上させ、渋滞を緩和できる可能性がある。しかし、路線の処理能力は道路構造の物理的形狀のみで決まるものではなく、交差点での信号制御や雑多な交通要因の存在、さらには走行車両の性能や進路選択など多くの要因が関係して

いる。だが、その対策を立てるために実交通におけるフィールド実験を行うことはコストがかかり、危険を伴うことからほとんど不可能である。そこでコンピュータによるシミュレーションが重要性を増し、古くからさまざまな道路交通シミュレータが提案・開発されてきた<sup>1)~6)</sup>。

これまでに提案されてきたシミュレータは、モデル化のアプローチの違いから巨視的手法と微視的手法に大別できる。前者は交通流を流体として捕らえモデル化する手法で、後者は車両個々の挙動を扱うモデル化の手法である。市街地などの複雑な交通環境のもとでは1台の車両の挙動が周囲に及ぼす影響を無視できないため微視的な視点でのモデル化が求められる。

微視的手法によるシミュレータとしてセルオートマトン法を用いたものが近年種々開発され、またよく使用されている。セルオートマトン法は解析対象の道路を格子状のセルに区切り、そ

1),2),3) 電気通信大学  
University of Electro Communications  
4) 株式会社 エム・アイ・ベンチャー  
MI Venture's Corp.  
5) 株式会社 京三製作所  
Kyosan Electric Mfg Co. Ltd.

のセル間を遷移規則に従って車両を移動させることで交通流を再現する手法である。この手法はモデル構築の容易さや計算効率の良さから大規模な範囲を対象としたシミュレーションが可能であり、世界各国で大掛かりな渋滞予測等のシミュレーションが行われている。

我々が提案し、研究・開発している交通シミュレータ MITRAM(Microscopic model for analyzing TRAfic jaMs in the city area)は、特に渋滞の頻発しやすい駅前やその周辺の地域といった比較的狭い範囲を対象としており、セルオートマトン法に比べより精緻に解析を行うことを目指している。交通現象を独自の手法でモデル化するシミュレータである。これは市街地における渋滞が交差点の形状や信号現時、バス停の位置や路肩駐車車両などが一因となって発生していることから、非常に詳細な交通環境を考慮した解析方法を用いないと有効なシミュレータになりえないという考えに基づいている。MITRAMは個々の車両の挙動を、実交通の運転者が行う運転動作をモデル化することで実現する。つまり、運転者の立場で得られる情報に基づいて自立走行する車両モデルを構築し、それを集団に組み上げることで交通流を再現するのである。

一方で、シミュレータはアプリケーションとして利用者にとって利用しやすくなければならない。なぜなら、精緻なシミュレーションを行うために専門的で煩雑な作業を必要とするのでは実用的ではないからだ。MITRAMでは、運転動作のモデル化にファジィの手法を用いることで、かなり高度な運転度判断も柔軟かつ分かりやすく表現できるようになっている。しかしそれでもなお、追従・右折・左折・追い越し等の個性あるさまざまな運転動作を精緻にモデル化しようとする、煩雑な設定を必要としてしまう。

そこで、本論文では、精緻でありながら煩雑な設定を必要としない運転動作のモデル化を目的とする。そのために、実際に走行する車両のデータから自動的に運転動作をモデル化する手法を提案する。そして、提案する手法を実際に用いて、信号における停止・発進の挙動に関してシミュレーションを行う。

## 2. MITRAMの概要

MITRAMは個々の車両の挙動を再現する微視的道路交通シミュレータである。システムの構成を図1に示す。MITRAMは道路モデル、自動車発生モデル、運転動作モデルが独立しており、各種データベースなどに基づいて比較的自由にモデルを構築できる枠組みを用意している。また、シミュレーションを高速化する専用の処理系も開発しており<sup>9)</sup>、それを用いることで車両台数1000台程度のシミュレーションを一般的なパーソナルコンピュータで実時間実行が可能である。本章ではMITRAMのシステム構成する各モデルの概要について述べる。

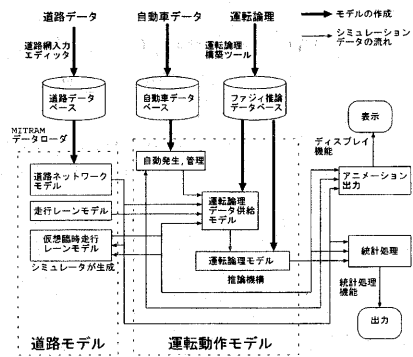


図1. MITRAMのシステム構成

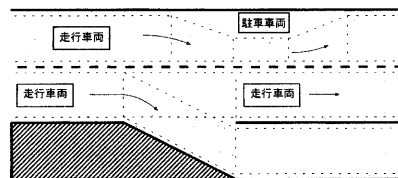


図2. 仮想走行レーン

### 2.1. 道路モデル

MITRAMでは仮想走行レーンと呼ばれる車両の走行軌跡を進路ごとに個別に形成し、それに沿って車両が走行するものとしている<sup>9)</sup>。仮想走行レーンの概念を図2に示す。図の上側の斜線に示すように、駐車車両などの障害物が存在している場合には、それを回避するように進路を変える必要がある。MITRAMではこれを運転動作モデルで処理するのではなく、図の破線に示すように道路モデルの変形で扱う。

また、図中下側の斜線に示すような分岐などによる操舵操作も仮想走行レーンを多重化することで複数の進路を定義する。

実交通においてはさまざまに異なる特性を持った車両が走行する。そして車両数も地域や時間帯などによって大きく異なる。MITRAMではシミュレータ上の車両に異なる属性を持たせ、個々の属性に対して車両の長さや幅、最高速度や最高加速度などの制限を定義する。そして解析対象となるフィールドにそれらの車両を任意の場所・時間を指定して発生させることで実交通に近い多様な車両の発生を可能にしている。

## 2.2. 運転動作モデル

MITRAMでは、2入力1出力のファジィ演算器群を接続し、それらのネットワークによって運転動作モデルを構築している。ファジィを用いることで、非線形で高度な運転論理の表現が容易になり、モデルの調整も比較的人間の直感によって行える点が優れている。しかし、右折・左折・追い越し等のさまざま運転論理に対して、人間の個性ある挙動を再現するためには多くのパラメータ設定を要する。利用者の立場から考えると、パラメータ設定はできるだけ簡単なほうが望ましい。そこで本稿では、利用者が用意した実走行データから自動的にモデル化を行うことを提案する。これにより、従来は運転論理とパラメータは分離されていたが、提案法では実走行データの数だけ運転論理とパラメータが一緒になった運転動作モデルが作成される。提案する運転モデルのモデリングシステムの概略を図3に示す。

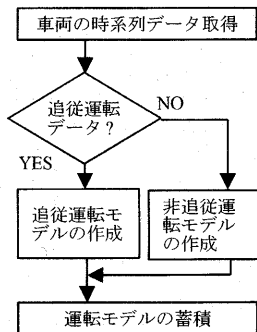


図3. モデリングシステム概略

本モデリングシステムの特徴は、すべてのモデルの起点を実走行データとしているところにある。運転モデルの入力と出力の関係も実走行データから自動的に同定されるため、利用者は複雑なモデル内部のパラメータ設定から解放される。そして、利用者はモデルの内部パラメータを設定しない代わりに、入力として用いるパラメータの種類(加速度、速度、信号までの距離等)と、シミュレーション条件(車両の発生、信号のサイクル等)を設定することで精緻なシミュレーション結果を得ることができる。本シミュレーションシステムの各モジュールについて以下で説明する。

### 2.2.1. 車両の時系列データ取得

今回、車両の時系列データは、ビデオカメラの映像を画像解析して抽出したものをを用いた。

画像解析に用いた手法は単純で、MPEG等の動画像符号化で一般的に用いられている動きベクトル検出アルゴリズムを応用したのとなっている。

まず、利用者に画面上のピクセル単位から実際のメートル単位に変換するための定規をGUIを用いて引いてもらう。このときユーザが指定した定規の目盛りを基に、ピクセルからメートルへの変換関数を最小二乗法により求める。次に、抽出開始時点と終了時点でターゲットとなる車両を利用者に領域選択してもらう。

あとは、以下の手順で自動的に抽出が行われる。フレームを進め、利用者が選択した領域とL2ノルム(式1)が最小となる領域を $(m_x, m_y)$ を変化させながら探し出す。

$$E = \frac{1}{S} \sqrt{\sum_{x,y} \{f(x+m_x, y+m_y, t) - f(x, y, t-1)\}^2} \quad \dots(1)$$

$S$  : 領域の面積  
 $x, y$  : 座標  
 $m_x, m_y$  : 動きベクトル  
 $t$  : 時刻(フレーム番号)  
 $f(x, y, t)$  : 時刻 $t$ 、座標 $(x, y)$ における輝度値

さらに、遠近による領域サイズの変化に対応するために、ターゲットのサイズを変化させながらL2ノルムを最小にする領域も探す。以上の方法で、車両の追跡を行う。

また、追跡がうまく行かないフレームに対して人間が車両の位置を教えることで追跡誤差を減少させられるようにしている。この方法によ

って、車両を追跡している様子を図4に示す。四角形の点線が追跡を行っている車両を示している。また、信号のある交差点を通過した3台の車両に対しての抽出を行った結果を図5に示す。

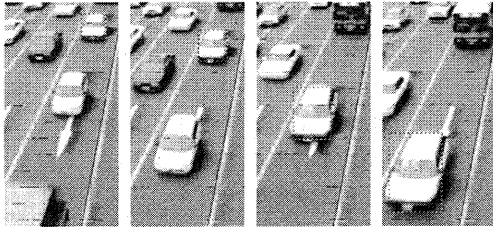


図4. 車両追跡の様子

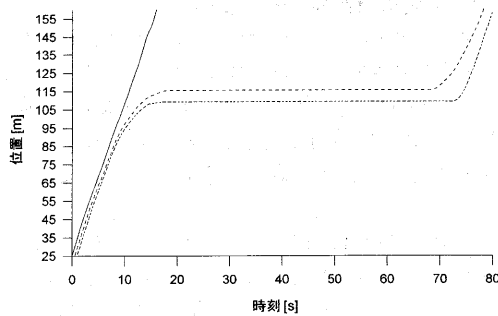


図5. 抽出された車両の位置データ

### 2.2.2. 実走行データの分解

本システムでは自動車の運転を追従運転と非追従運転の二つに分けて考える。そのため、前節で得られた車両の時系列データを追従運転データと非追従運転データに分ける必要がある。その手法として、非衝突条件というものから導かれる追従運転の定義を用いる。これは、追従運転時には、いつ先行車がブレーキをかけ始めたとしても、追従車は現在のアクセル操作を維持して、ちょうど現在の車間距離分だけ走行できるように運転している、というものである。非追従運転時は上記の状態から外れることを利用して、信号交差点での追従運転データと非追従運転データを分けられることが報告<sup>10)</sup>されているので、本稿でもこれを用いる。

### 2.2.3. 追従運転モデル

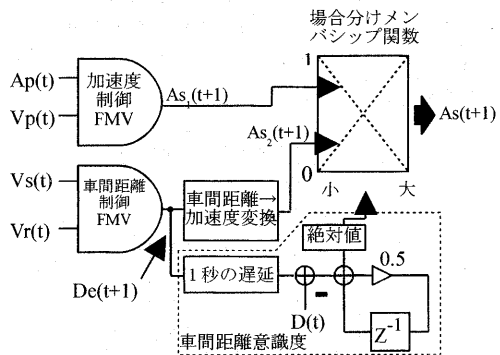
追従運転データが与えられた場合には、その

データから追従運転モデルを構築する。我々はこの追従運転モデルの構築にファジィニューラルネットワークを用いることを提案しており、これを追従運転FMV (Fuzzy Model Vehicle) と呼んでいる<sup>11)</sup>。その概要を図6、図7を示す。モデル化の手順は、対象となる実走行データから得られた先行車および追従車の加速度、速度、車間距離等を入力信号としてニューラルネットワークに与え、次時点の追従車加速度、車間距離を教師信号として与える。これをバックプロパゲーション法によってニューラルネットワークに学習させることによってモデリングを行う。さらに、複数のニューラルネットワークの出力を交通状況に応じてファジィ的に使い分けられるようになっている。

以上の方法により、ある追従運転挙動を学習させた追従運転FMVを用いて学習データの再現シミュレーションを行った結果を図8に示す。また、比較のためにGMモデル<sup>12)</sup>(式2)を用いて、同じ実走行データに対してフィッティングを行い、同様の再現シミュレーションを行った結果も図8に加えて示す。結果は平均車間距離誤差が、FMVは3.2[m]、GMモデルは17.3[m]となり、FMVは良好な追従特性を示した。

$$A_s(t+T) = \alpha \frac{\{V_p(t)\}^m}{\{P_p(t) - P_s(t)\}^l} \{V_p(t) - V_s(t)\} \dots (2)$$

$A_p$ : 先行車加速度       $A_s$ : 追従車加速度  
 $V_p$ : 先行車速度       $V_s$ : 追従車速度  
 $P_p$ : 先行車位置       $P_s$ : 追従車位置  
 $t$ : 時刻



$A_p$ : 先行車加速度       $A_s$ : 追従車加速度  
 $V_p$ : 先行車速度       $V_s$ : 追従車速度  
 $V_r$ : 相対速度           $t$ : 時刻  
 $D$ : 車間距離           $D_e$ : 目標車間距離

図6. 追従運転モデルFMV

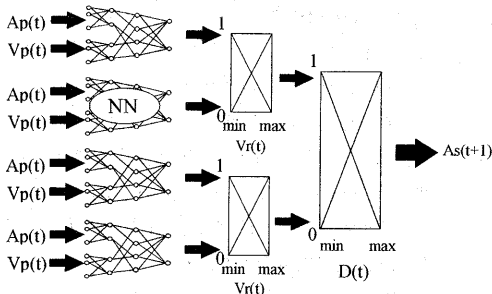


図7. 加速度制御FMV用ファジィニューラルネットワーク

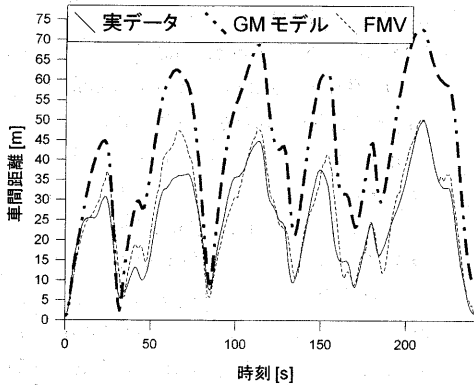


図8. 追従運転モデルのシミュレーション結果

### 2.2.4. 非追従運転モデル

MITRAMの運転動作モデルでは、信号による停止・発進、右左折、追い越し等の運転動作モデルは、別々の運転モデルとして実装される。この方法で個人特性を考慮するなどして精緻化しようとする、と運転動作の種類だけパラメータの設定が必要となり、煩雑化してしまう。そこで本稿では、追従運転以外の動作を統一された非追従運転モデルとして扱う方法を提案する。この非追従運転モデルは、2.2.3で述べた追従運転モデルと、次に述べる仮想先行車という概念を用いて実現する。

シミュレータが追従運転モデルに対して先行車を設定すると追従運転モデルはある挙動をとる。もし、ある先行車を設定したときの追従運転モデルの挙動が信号での停止・発進と同様ならば、この先行車と追従運転モデルで非追従運転の挙動の一例が実現できたことになる。このように追従運転モデルに対して、ある非追従運転データと同様の挙動をさせるために設定する

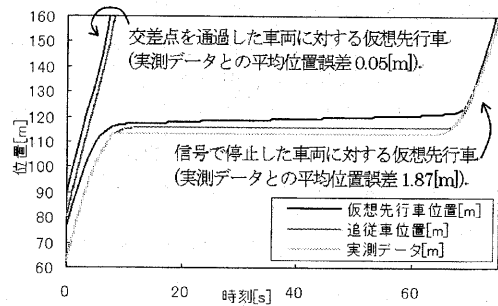


図9. 仮想先行車導出例

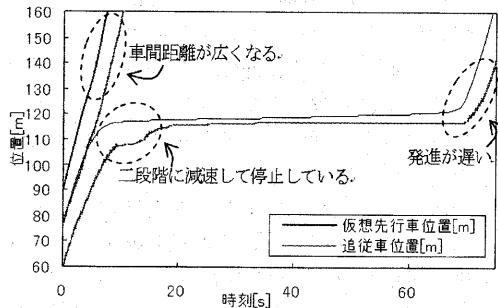


図10. シミュレーション結果

先行車を仮想先行車と呼ぶ。

仮想先行車の導出法は、エミュレートしたい非追従運転データと等しい初期状態にした追従車に対して、各時点において加速度 $-2.6 \sim 2.6$  [m/s<sup>2</sup>]の先行車を設定する。そして、追従車の位置が、非追従運転データの次時点の位置に最も近くなる先行車を仮想先行車の挙動として記録する。これを非追従運転データの点数分だけ繰り返すことで、仮想先行車を導出する。さらに、追従車の種類を変えながら最適なエミュレーション結果となる仮想先行車を求める。信号交差点における仮想先行車の導出例を図9に示す。

## 3. シミュレーション

2.2.4で導出された仮想先行車に対して、異なる実走行データからモデル化された追従運転モデルを追従させるシミュレーションを行った。このときの追従車の初期状態は、仮想先行車導出時と等しくしてある。シミュレーション結果を、図10に示す。図10より、追従車は仮想先

行車導出時と同様、「先頭を走行しているような挙動」、「赤信号で停止し、青信号で再び発進したような挙動」を表現できている。さらに、図9と比較すると、追従車の挙動が大きく異なることがわかる。これは、追従運転モデルの学習に用いた実走行データの違いによるものであると考えられる。

#### 4.まとめ

本稿では、精緻でありながら煩雑なパラメータ設定の要らない運転モデルを目指し、新しい運転動作モデルのモデル化手法を提案した。それは、運転動作を追従運転と非追従運転に分け、それぞれの運転のモデル化を実走行データから直接行うことによって実現する。追従運転のモデル化にはファジィニューラルネットワークを用いたモデルを提案し、非追従運転のモデル化には仮想先行車という追従運転モデルに非追従の運転挙動をさせる先行車を提案した。

そして、追従運転動作のモデル化において学習対象の実走行データをよく再現することを示し、非追従運転動作のモデル化において追従運転モデルに非追従運転動作を表現させる仮想先行車を導出することができた。また、追従運転モデルを替えて行ったシミュレーションでは、学習データの違いによると見られる挙動の違いが表現できることを示した。

本稿で提案した手法を用いることで、信号での停止・発進に限らずさまざまな運転動作を統一的にモデル化できることが期待できる。

最後に、次のステップとして交差点における一般的なシミュレーションを行うことで、提案法の有用性を検討していくことを、現在計画している。

#### 参考文献

- 1) 栗本 譲：交通道路交通流体解析のデジタルシミュレーション・モデル、土木学会論文報告集、No.320、pp.137-148(1982)
- 2) 斎藤 威：交通渋滞予測のための道路交通現象の再現、電気学会誌、117巻9号、

pp.600-603(1997)

- 3) 桑原雅夫：広域ネットワーク交通流シミュレーション、自動車技術、Vol.52、No.1、pp.28-34(1998)
- 4) 堀口良太、片倉雅彦、桑原雅夫：都市街路網の交通シミュレータ AVENUE の開発、第13回交通工学研究発表論文報告集、No17、pp.177-180(1995)
- 5) 木俣 昇、高杉秀彰、黒川浩嗣：ペトリネットによる交通流シミュレーションの開発、土木計画学研究・講演集、No.17、pp.561-565(1998)
- 6) S.Morishita,N.Yamamoto and T.Nakano：100 Traffic flow simulation system by cellular automata, AVCE,pp.561-565(1998)
- 7) 加藤恭義：セルオートマトン法による道路交通シミュレーション、日本人工知能学会誌、Vol.10、p242-250(2000)
- 8) 猪飼國夫、本多中二、板倉直明：ネットワーク構造ファジィ推論エンジンとその検証、パーソナルコンピュータ利用技術協会論文誌、Vol.12、No.1、pp.3-11(2002)
- 9) 猪飼國夫、佐藤章：微視的道路交通シミュレーションのためのオブジェクト指向道路モデルの構築とその検証、シミュレーション、Vol.18、No.3、pp.206-215 (1999)
- 10) 王維恩、板倉直明、本多中二、猪飼國夫：非衝突条件及び仮想先行車を用いた追従運転定義の検討、日本シミュレーション学会第21回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集、pp.135-138(2002.6)
- 11) 小林大悟、板倉直明、本多中二、猪飼國夫：車間距離制御を加えたファジィモデル自動車の提案と車群特性、日本シミュレーション学会第21回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集、pp.131-134(2002.6)
- 12) D.C.Gazis,R.Herman, and B.Potts, "Car-following theory of steady-state traffic flow.", Operation Research, No.9,1961