交差点走行車両の運転動作のモデル化と交通解析

石川 亮[†] 風間 洋[††] 本多中二[†]
板倉直明[†] 猪飼國夫[†††]

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様であり，特定の交差点だけに注目しても時間帯や天候など様々な条件によってその様相は大きく変化する．したがって実用的なシミュレータを構築するためには，多種多様な条件を考慮して，それに応じた交通特性を正しく再現できる汎用性が必要である．本論文では，微視的道路交通シミュレータ MITRAM を用いて信号交差点での交通シミュレーションを行う．そのために実交通における運転者が交差点を走行するときにどのような判断を行っているのかに注目してその論理をファジィの手法でモデル化する．そして，この構築したモデルを実交通との比較で検証する．さらに，一般に解析的手法での最適化が困難とされている右折信号の時間設定についてシミュレーションから最適解を導き，MITRAM の有用性を示す．

Modeling of Vehicle Maneuvering around Intersection and Traffic Analysis

Ryo Ishikawa,[†] Hiroshi Kazama,[††] Nakaji Honda,[†]
Naoaki Itakura[†] and Kunio Yikai[†††]

For the analysis of the traffic congestion phenomenon in a city area, the simulation of intersection which is the bottleneck of a trraffic is important. However actual traffic is very various and the aspect changes with many conditions. Therefor in order to built a practical simulator, we have to take those elements into consideration. In this paper, we model traffic around intersection and analyze using the microscopic road traffic simulator MITRAM. The judgement of the driver in actual traffic is modeled using fuzzy method. And we contrast a simulation results with real traffic for verification of the built model.

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多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状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，危険をともな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，古くから様々な道路交通シミュレータが提案・開発されてきた[1)~6)]．

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と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使っ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

† 電気通信大学
University of Electro Communications
†† 株式会社京三製作所
Kyosan Electric Mfg Co. Ltd.
††† 株式会社エム・アイ・ベンチャー
MI Venture's Corp.

が可能であり，世界各国で大がかりな渋滞予測などのシミュレーションが行われている[7]．

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 TRAffic 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て，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示，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律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．運転動作のモデル化にはファジィの手法を用いることで，かなり高度な運転判断も柔軟かつ分かりやすく表現でき，すでに妥当な結果が得られることを検証している[8,9]．また道路モデルも種々の物理的形状や道路条件を扱えるものとなっている[10]．

市街地の交通において，交差点の解析は渋滞対策や信号制御を考えるうえで非常に重要である．本論文では交差点を対象に，まず複雑な動作や判断をともなう交差点における右折，左折，徐行などを含めた運転動作モデルを構築し，次に実交通データや理論との比較によりモデルの妥当性の検証を行う．そして構築したモデルを用いて，従来から解析的算出が困難とされている右折信号の最適時間をシミュレーションによって求める．

本論文の2章でMITRAMの道路モデル，自動車発生モデル，運転動作モデルの概要を説明し，3章では解析の対象とする信号交差点でのモデルの構築について述べる．4章では実交通との比較でモデルの検証について，5章では右折信号の最適時間の算出について述べる．そして6章でまとめる．

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[11]，それを用いることで車両台数1,000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．

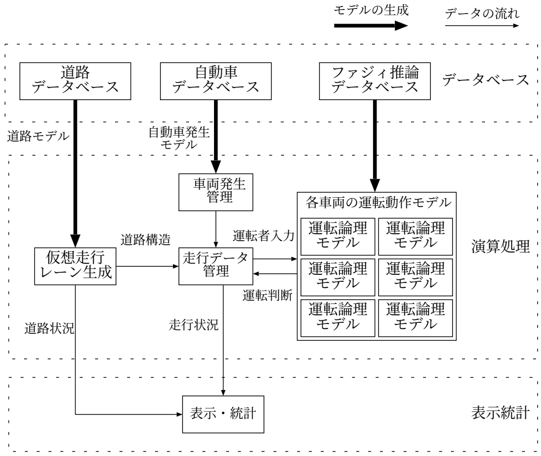


図1 MITRAMシステム構成
Fig. 1 MITRAM system.

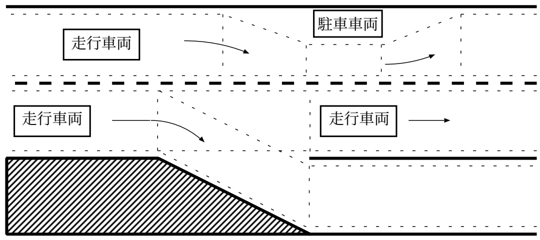


図2 仮想走行レーン
Fig. 2 Image for virtual running lane.

本章ではMITRAMのシステムを構成する各モデルの概要について述べる．

2.1 道路モデル（自動車発生モデル）

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[10]．**図2**は仮想走行レーンの概念である．図の上側の車線に示すように，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，図中下側の車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．

実交通においては様々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

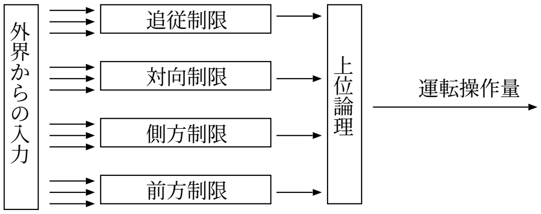


図 3 MITRAM の運転動作モデルの概略
Fig. 3 MITRAM maneuvering model.

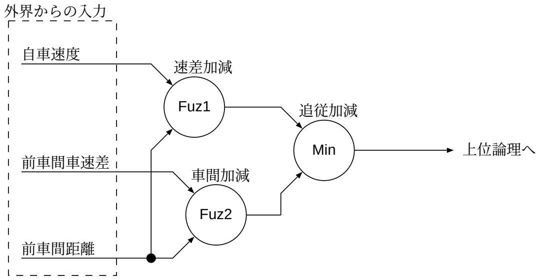


図 4 制限論理の例
Fig. 4 Example of maneuvering model.

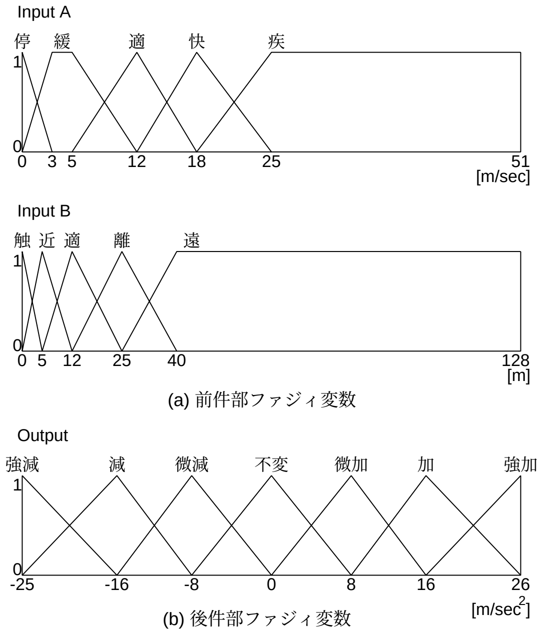
さや幅，最高速度や最高加速度などの制限を定義する．そして解析対象となるフィールドにそれらの車両を任意の場所・時間を指定して発生させることで，実交通に近い多様な車両の発生を可能にしている．

2.2 運転動作モデル

MITRAM では車両の挙動を決定する論理を，現実の運転者の判断をモデル化することで構築する．そのモデル化のために実交通の運転者が以下に示す基本原則をつねに同時に満足する判断をしているものと仮定する．それは，

- 他の車両の後面に衝突しない（追従制限）
- 他の車両の前面に衝突しない（対向制限）
- 他の車両の側面に衝突しない（側方制限）
- 車両以外に衝突しない（前方制限）

である．この原則を満足する論理を個別にモデル化し，それらを合成することで現実の運転者と同様な運転動作を行えるモデルを実現する．MITRAM の運転動作モデルの概略を**図 3** に示す．前述の原則によって分割して構築する各モデルは外界からの入力に基づいて論理の名が示す制限を受けた操作量を出力し，それが上位論理に入力される．上位論理ではそれをもとに最も支配的になる制限を選択して出力する．各モデルの構築には**図 4** に示すように 2 入力 1 出力の演算子を多段に接続した構造をとる．演算子には現実の人間が行う運転判断を取り入れやすいファジィ推論をはじめ，数値演算や論理演算を定義できるようにしている．また



(c) ファジィルール

InA / InB	停	緩	適	快	疾
触	不変	微減	減	強減	強減
近	微加	不変	微減	減	強減
適	加	微加	不変	微減	減
離	強加	加	微加	不変	微減
遠	強加	強加	加	微加	不変

図 5 ファジィ推論演算子の詳細
Fig. 5 Details of fuzzy inference operator.

任意の非線形入出力関係もグラフの形で組み込める．

図 4 は追従制限を実現する運転動作モデルの一部を例として示している．左側の各入力は運転者が外界の状況から得る情報であり，数値データとしてモデルに与えられる．そして各演算素子をネットワーク状に接続した処理系を経て，最終的に運転者の意思として追従制限に関する加減速操作量を上位論理へ渡す．このモデルでは，たとえばファジィ推論素子 Fuz1 に自車速度と前車間距離が入力される．この演算子は，Mamdani の方法[12] によるファジィ推論を行う．これは**図 5** に示すように，ファジィルールの前件部 InputA（自車速度）は「停」,「緩」など 5 つのファジィ変数を，InputB（前車間距離）も 5 つのファジィ変数を設定している（図 5 (a)）．一方，後件部 Output のファジィ変数は 7 つである（図 5 (b)）．ファジィルールの総数は前件部ファジィ変数の組合せにより 25 個で，それらを図 5 (c) に示してある．たとえば 4 行 2 列のルールは「もし自車速度（InputA）が緩やかで，かつ前車間

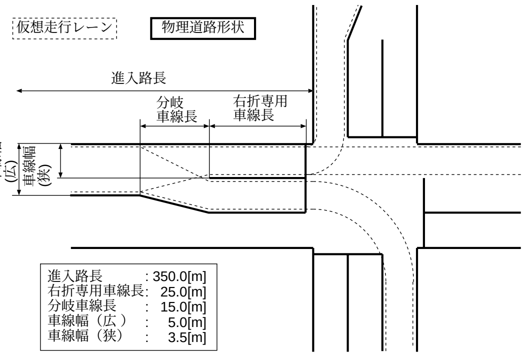


図 6 交差点道路モデル
Fig. 6 Road model of intersection.

距離（InputB）が離れていれば，加速せよ」である．入力に対しこれらのルールを用いて推論を行い，重心法を用いて非ファジィ値として出力する．この Fuz1 の出力は自車速度と前車間距離から推論される加減速操作量の制限値である．同様に Fuz2 からは前車間車速差と前車間距離とから推論される制限値が出力される．そして，これら 2 つの出力を Min 演算子に入力し最小値を得ることで，すくなくとも前段の 2 つの制限に違反しない追従に関する制限値が得られる．

これらの方法によって複雑な運転判断をいくつかの機能に分割して構築でき，モデルの見通しが良くなる．また運転者個性の付加[13] などといったモデルの拡張もネットワーク状にその機能を組み込むことで容易に行える．モデルの調整についてもファジィ推論が入力空間を分割して特性を定義していることから，修正を必要とする箇所の発見が容易な場合が多く，直観的なモデル調整が可能である．これらは MITARM におけるモデル構築の柔軟性を高める大きな特色といえる．

3. 交差点交通のモデル化

3.1 道路のモデル化

2 章で述べたように，MITRAM の道路モデルは車両の進行軌跡を定義する仮想走行レーンによって表される．ここでは**図 6** の実線で示す 4 流入路を持つ信号交差点をモデル化する．この交差点においてすべての進入路から走行する車両は直進，左折，右折の 3 通りの進路を選択できるものとする．つまり仮想走行レーンを図中の破線で示す 3 種類用意し，これを進入路のすべてに設ける．それらを重ね合わせると物理的な位置関係により，他のレーンとの分岐，合流，交差が起こるので，交錯の種類とその位置の情報も道路モデルに追加する．

信号灯器は交差点の全進入路の先頭に配置し，それぞれ独立にシーケンスを設定することで任意の現示パターンを作り出す．

3.2 運転動作のモデル化

交差点での運転動作は，多くの交通要因からの影響を受けるため非常に複雑な判断を必要とする．本論文ではこれをファジィ推論の多段接続の構造で，なるべく見通し良く構築する．

まず，運転者の立場で信号交差点を見たときに運転者の操作量に影響を与える要因を次のように分離する．

- 前車両（追従制限）
- 対向車両（対向制限）
- 分岐車両（側方制限）
- 信号（前方制限）

これらは括弧内に示すように 2 章で述べた運転動作のモデル化に関する基本原則の各項目に相当する．これらを実現する論理を個別にモデル化し合成することで，現実の運転者と同様に交差点を走行できる運転動作モデルとしている．構築したモデル全体を**図 7** に示す．なお，この図中のファジィ推論などの演算子の詳細については付録に示す．

この図で追従制限は前を走行する車両との間に追突が起こらないように自車の加減速を制御する運転論理である．この論理を自車の速度，前車との車間距離と相対速度を入力とした多段ファジィ推論でモデル化する．

対向制限は右折を行う車両が対向車との関係で衝突を起こさずに右折を行えるか判断をする論理である．モデル化の方法として，対向車が交差点に到達するまでの予想時間と自車の到達時間をファジィ推論で求め，それらの結果を比較する．そして対向車の到達よりも早く自車が右折を終えられる場合には右折可能と判断し，対向制限を解除する．右折不可能な場合は交差点手前で停止する論理（図中「交差点停止」演算子）が発火する．

分岐制限は道路モデル上では異なる車線を走行する分岐車両に衝突しないように運転する論理である．この論理は現実の運転者は分岐車両のイメージを自車の走行レーンに仮想車両として射影して，その仮想車両に追従しているという想定のもとでモデル化する．つまり分岐制限の実態は追従制限と同じである．

信号制限は赤信号での停止を行う論理である．この論理も分岐制限と同様に自車レーンへの仮想車両の射影でモデル化できる．つまり信号現示が赤の場合には交差点の停止線上に停止した仮想車両が存在するものとし，それに追突しないように減速して停止することで信号制限を実現する．

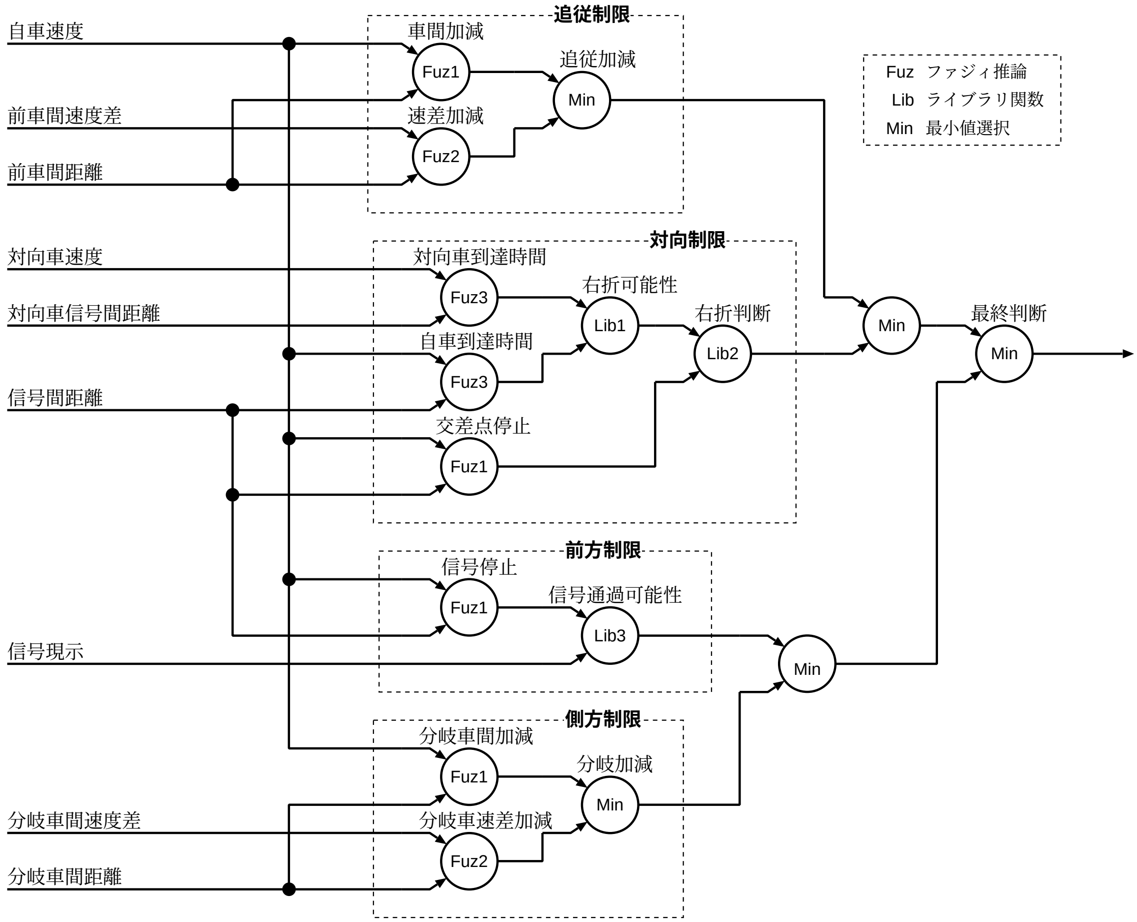


図 7 交差点走行の運転動作モデル
Fig. 7 Model of maneuvering around intersection.

これらの構築した各運転動作モデルからの出力を最小値演算で合成することで，すべての論理を満たす運転動作モデルとなる．シミュレータ上を走行するすべての車両の運転論理としてこのモデルを持たせることで，各車両が適切な判断で運転を行い，実交通と同様に運転者が自律的に走行する交差点交通を実現する．

4. シミュレーションとモデルの検証

構築したモデルが現実の交通における運転者の特性を正しく再現しているかを検証するためには，様々な交通状況を想定して実交通との比較を行う必要がある．ここでは構築したモデルを次に示す 3 つの項目で段階的に検証する．

(1) 車両単独での挙動
(2) 近傍車両間での挙動
(3) 統計的特性

構築した運転動作モデルは，運転者が外界の交通要因によって操作量に制限を受けるという視点で構築されている．項目 (1) は他の車両に衝突しないという条件による制限がない場合の挙動についての検証であり，車両の物理的な加速限界や交通法規遵守のための速度制限が操作量に対して支配的になる場合である．項目 (2) では運転者が他車からの操作量制限を受けて走行している状態であり，その制限要因ごとに個別に検証する．項目 (3) では，総合的に交差点交通をシミュレートし，交通工学的な知見と合致しているかを検証する．

4.1 車両単独での挙動

他の車両からの影響を受けずに単独で走行する車両の挙動は，車両の持つ固有な加速限界や法規の遵守による最高速度の制限に支配される．**図 8** は位置 0 [m] で停止状態にあった車両が加速して安定した自由走行へ向かうときの速度の変化について，実データとシミュレーション結果を比較したものである．加速状態，安

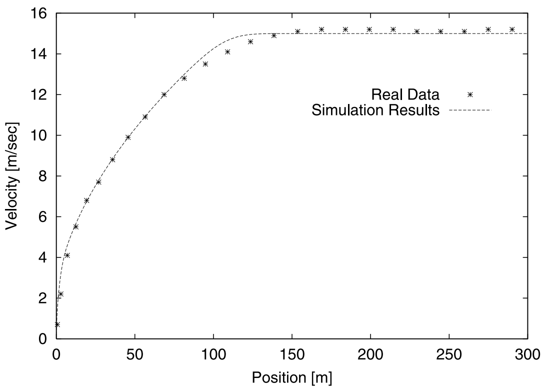


図 8 加速状態と自由走行状態
Fig. 8 Accelerating state and free running state.

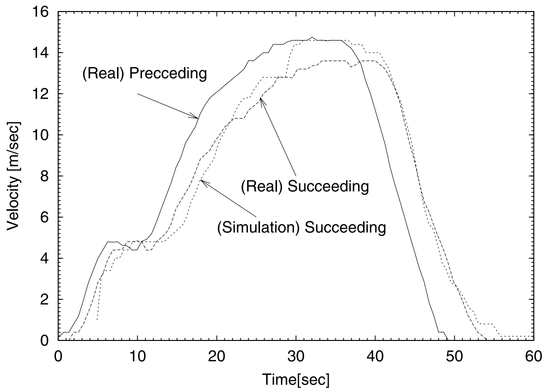


図 9 追従運転の検証
Fig. 9 Verification of succeeding.

定走行状態ともにシミュレーション結果が実データとよく合致している．ここで示した結果は，任意に選択した実データと，それに基づいて調整を施したシミュレーションの一例である．他の実データに関してもこれと同様に整合性のあるシミュレーション結果が得られている．

4.2 近傍車両間での挙動

運転者は近傍を走行する車両との間に事故が起こらないように注意を払い，必要であれば減速などの操作を行う．ここでは信号交差点において運転者に影響を与えうる要因がモデルに正しく反映されているかを検証する．なお，分岐車の要因による側方制限と信号による前方制限は 3 章のモデル構築で述べたように仮想車両との追従運転状態としているので，ここではその核となる追従制限と対向制限の各モデルを検証する．

4.2.1 追従制限の検証

追従制限の検証を行うために，実交通での実験で得た先行車と追従状態にあると想定される追従車の速度の変動の記録をもとに，同様の状況をシミュレータ上で再現する．シミュレーションでは実データの先行車の動きをそのまま取り込み，それと同じ初期条件でモデル化した追従車両を発生する．挙動を比較するため，実データの先行車と追従車，そしてシミュレートした追従車の速度の計測結果を**図 9** に示す．この実験では実交通の先行車両は時間 0 [sec] の初期状態において速度が 0 [m/sec] であり，実交通の追従車も同様の初期速度である．また先行車と追従車の車間距離の初期値は 1 [m] である．

速度変動のグラフでは実データとシミュレーション結果にほとんど違いがなく，実交通の追従車の挙動が精度良く再現されていることが分かる．

表 1 右折車両観測環境
Table 1 Right-turn vehicles observation environment.

観測場所	東京都調布市多摩川住宅入口交差点
信号サイクル	70 [sec]
有効スプリット	38 [sec]
対向車平均速度	30.4 [km/hr]
右折車交通量	205 [台/hr]
対向車交通量	426 [台/hr]

表 2 右折余裕時間の計測結果
Table 2 The results of right-turn margin time.

	平均値	最小値	中央値
実測データ	6.68	3.58	6.27
シミュレーション	5.93	2.25	5.90

4.2.2 対向車制限の検証

対向制限論理を検証するために現実の右折車両の運転動作を観測し，同様の交通状況をシミュレーションで再現した結果との比較を行う．実交通での観測は東京都調布市に実在する信号交差点で，その詳細を**表 1** に示す．この測定地において右折車両が右折を開始してから対向車が交差点を通過するまでの時間を計測した．これは右折待ちをする運転者がどれくらいの時間的余裕で右折開始を判断したのかを表す値である．計測では右折待ち車両が対向車からの影響を受けない距離を 55 [m] として，対向車との距離がそれ以上の場合は記録しないこととした．以上の条件のもとで右折車両 100 台について計測を行い，それらを集約した結果を**表 2** に示す．また，観測環境とほぼ同じ条件下で構築したモデルを用いたシミュレーションの結果も同表に示す．

両者を比較すると計測データの方がやや大きめで，実際の運転者がより慎重なことが分かる．しかし，全体的に類似の特性が得られており，モデルが実態を表

表 3　信号交差点の各種パラメータ
Table 3　Intersection parameters.

パラメータ	値
流入路長	350.0 [m]
車線幅（広）	5.0 [m]
車線幅（狭）	3.5 [m]
右折専用車線長	25.0 [m]
分岐車線長	15.0 [m]

しているといえる．

4.3　統計的特性の検証

これまでに，個別車両での運転動作モデルの妥当性を検証してきたが，さらにこれを複数にしたときに交差点付近でその複数車両の挙動が総合的に再現されているかを検証する必要がある．ここでは交差点の道路モデルとして定義される車両の発生率や信号の制御といった交通環境の条件を変えて，交通の様子がどのように変動するか観測する．そして，その結果がマクロな視点での交通工学的な諸知見と合致しているかを確認し，シミュレーション結果の妥当性を検証する．

まず解析の対象とする交通環境の基本的なパラメータを**表 3** に示す値で設定する．この交差点に南北方向からの流入路に対して 800 [台/時] の交通量を与え，同じく東西方向を 500 [台/時] とする．信号のサイクルが 60 [秒] という条件で信号のスプリットを変化させた場合の交差点全体の総遅れ時間および流入路ごとの遅れ時間を計測する．なお，各流入路ともに交差点において車両の進路選択は左折：直進：右折が 1：2：1 の比となるように設定する．

計測した総遅れ時間の結果を**図 10** に示す．結果は 20 分間（20 サイクル分）の計測結果を 1 サイクルあたりの平均で示している．また，同様のシミュレーションで車両発生割合を南北方向 1,000 [台/時]，東西方向 500 [台/時] とした場合の計測結果を**図 11** に示す．

一般に信号スプリットは非飽和交通流状態においては進入路の飽和度の比で分割したものが最適とされている．飽和度は

$$\text{飽和度} = \frac{\text{（需要）交通量}}{\text{交通容量}}$$

で与えられ，本論文ではすべての路線で交通容量が一定と仮定しているので信号サイクルを交通量の比でスプリットするのが理論的な最適解となる．南北方向最適スプリットのシミュレーション結果とその理論値を**表 4** に示す．どちらのシミュレーション結果もほぼ理論値どおりの結果が得られていることが分かる．

以上の結果は，構築した交差点交通モデルが現実の交差点交通を的確に再現していることを示している．

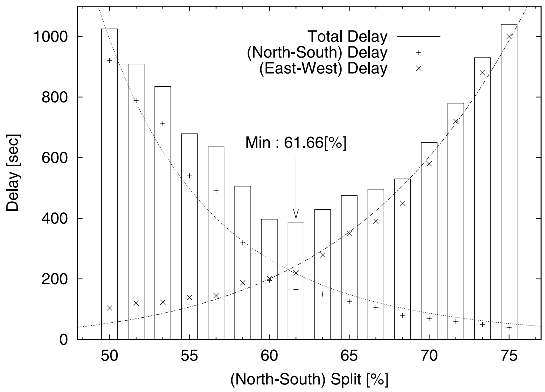


図 10　信号スプリットの変化と総遅れ時間
（車両発生割合：南北 800 [台/時]，東西 500 [台/時]）
Fig. 10　Signal split and total delay
(Vehicle genarating rate: north-south 800 [veh/hr], east-west 500 [veh/hr]).

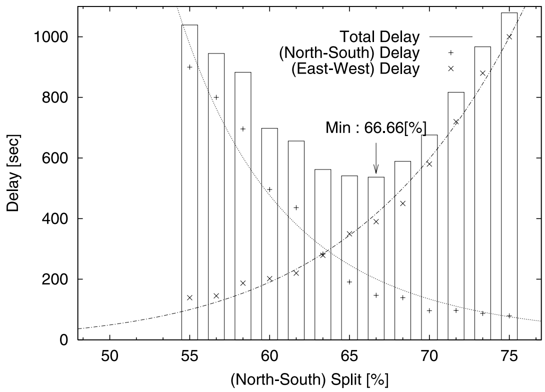


図 11　信号スプリットの変化と総遅れ時間
（車両発生割合：南北 1000 [台/時]，東西 500 [台/時]）
Fig. 11　Signal split and total delay
(Vehicle genarating rate: north-south 1,000 [veh/hr], east-west 500 [veh/hr]).

表 4　南北方向最適スプリット
Table 4　Optimal split.

	ケース 1	ケース 2
シミュレーション	37 [秒]	40 [秒]
理論（飽和度比）	36.9 [秒]	40.0 [秒]

このことから，構築した運転動作モデル全体が正しく機能していると判断される．

5.　右折専用現示の最適時間

現実の信号交差点における右折専用現示の最適な時間設定は右折専用車線長と右折交通量，対向直進交通量および到着タイミングなどが複雑に絡み合うために解析的に求めることが困難である．そのために，専門技術者による現場調整作業で最適時間を決定する方法

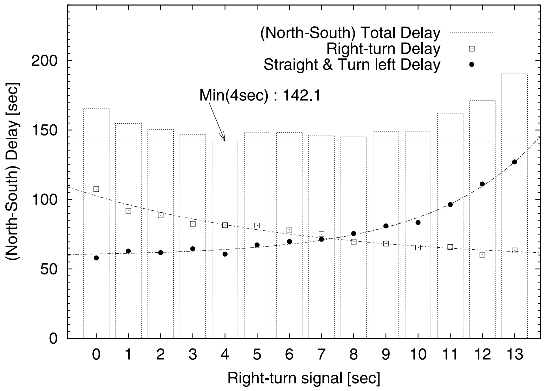


図 12 右折信号時間と総遅れ時間
Fig. 12 Relations between right-turn signal time and total delay.

が一般に行われてきている．また右折交通量の変動が大きい交差点では右折感応制御を実施して右折専用現示の最適化を行っている．前述の解析で遅れ時間を最小とするシミュレーション結果が一般的理論値に合致することが確認されたので，同様に右折専用現示の最適時間をシミュレーションで求める．前記ケース 2 で南北方向の最適時間は 40 秒という結果が出ているので，この時間を青信号と右折信号で配分する最適値を求める．その結果は**図 12** に示すように，右折専用現示に 4 秒を配分することで遅れ時間を最小にできることが明らかになった．

このようにシミュレーションによって，専門技術者の経験や勘にたよることなく比較的容易に右折専用現示の最適時間を求めることが可能である．

6. おわりに

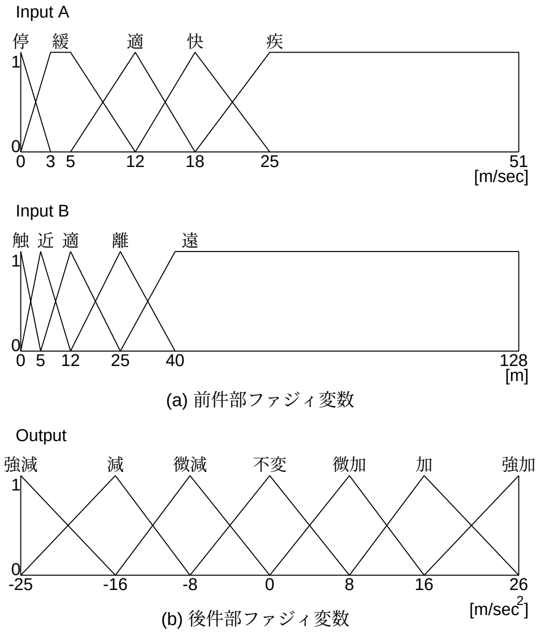
本論文では信号交差点での交通をモデル化し，微視的道路交通シミュレータ MITRAM によって再現した．車両の挙動を決定する運転動作モデルは交差点付近の交通要因を分離して，それらを考慮した運転動作を運転者の視点で個別にモデル化した．その各モデルにはファジィ推論を含めたいくつかの演算子を多段に接続する構造を採用することで見通しの良いモデルを構築できた．そして，車両単独での挙動，近傍車両間での挙動，統計的特性に関するシミュレーションを通じて，構築したモデルの妥当性を検証した．さらに信号制御設計のなかでも解析的に最適解を求めるのが難しい右折専用現示の時間設定に関して，本シミュレータを用いて最適値を導くことが可能なことを示した．以上のことから，MITRAM は渋滞の原因と密接な関係にある信号交差点の交通を，種々の交通環境も反映して適切にシミュレーションを行えることが明らかになった．

現実の交通では時差式信号や 5 進入路以上の交差点での信号制御など，解析的に最適な解が求められない問題が多く存在する．このような問題に対しても MITRAM は，その交差点の形状や車両の発生割合といった交通環境を設定することで比較的容易に最適な信号設計を行えると期待できる．

また，次のステップとして複数交差点群の系統式信号制御の最適化もターゲットに考えている．系統式信号制御では評価基準として「旅行時間」や「停止回数」など，新たなパラメータを取り扱う予定である．さらに，実際の市街地を対象としたシミュレーションも現在計画している．

参 考 文 献

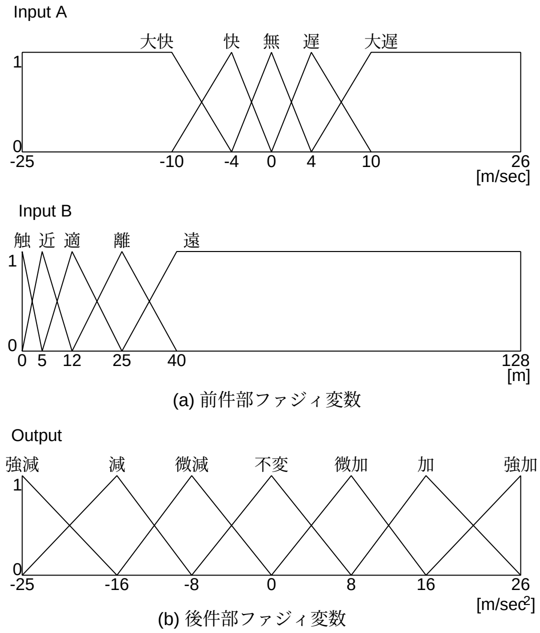
1) 栗本 譲：交通道路交通流解析のディジタル・シミュレーション・モデル，土木学会論文報告集，No.320, pp.137–148 (1982).
2) 斎藤 威：交通渋滞予測のための道路交通現象の再現，電気学会誌，Vol.117, No.9, pp.600–603 (1997).
3) 桑原雅夫：広域ネットワーク交通流シミュレーション，自動車技術，Vol.52, No.1, pp.28–34 (1998).
4) 堀口良太，片倉正彦，桑原雅夫：都市街路網の交通流シミュレータ-AVENUE-の開発，第 13 回交通工学研究発表論文報告集，pp.33–36 (1993).
5) 木俣 昇，高木秀彰，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.177–180 (1995).
6) Morishita, S., Yamamoto, N. and Nakano, T.: 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, pp.242–250 (2000).
8) 猪飼國夫，本多中二，板倉直明：道路交通シミュレータのためのファジィ推論による自動車の運転モデル，日本ファジィ学会誌，Vel.12, No.3, pp.425–435 (2000).
9) 猪飼國夫，石川 亮，本多中二，板倉直明：ファジィ推論を用いたネットワーク構造モデルによる自動車すり抜け運転動作などのシミュレーションと渋滞解析，情報処理学会論文誌：数理モデル化と応用，Vol.42, No.SIG14 (TOM5), pp.90–97 (2001).
10) 猪飼國夫，佐藤 章：微視的道路交通シミュレータ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).
11) 猪飼國夫，本多中二，板倉直明：ネットワーク構



(c) ファジィルール

InA / InB	停	緩	適	快	疾
触	不変	微減	減	強減	強減
近	微加	不変	微減	減	強減
適	加	微加	不変	微減	減
離	強加	加	微加	不変	微減
遠	強加	強加	加	微加	不変

図 13　ファジィ推論演算子 Fuz1 の詳細
Fig. 13　Details of fuzzy inference operator “Fuz1”.



(c) ファジィルール

InA / InB	大快	快	無	遅	大遅
触	強減	強減	減	微減	不変
近	強減	減	微減	不変	微加
適	減	微減	不変	微加	加
離	微減	不変	微加	加	強加
遠	不変	微加	加	強加	強加

図 14　ファジィ推論演算子 Fuz2 の詳細
Fig. 14　Details of fuzzy inference operator “Fuz2”.

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)

12) 本多中二，大里有生：ファジィ工学入門，海文堂 (1989)

13) 石川　亮，佐藤典子，本多中二，板倉直明，猪飼國夫：微視的道路交通シミュレータにおける個人特性を考慮した右折運転動作モデルの構築，第21回日本シミュレーション学会大会発表論文集，pp.143–146 (2002).

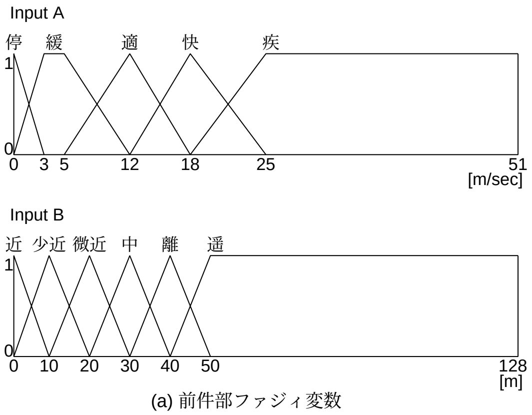
付録　運転動作モデルに用いた演算子の詳細

本論文の 3 章図 7 の中で用いた演算子の詳細について，ファジィ推論（Fuz1，Fuz2，Fuz3）は入出力メンバーシップ関数とルールを**図 13**，**図 14**，**図 15** に，それ以外の演算子については演算子の内容を**表 5** に示す．なお，ファジィ推論の計算には Mamdani の方法を使い，出力の非ファジィ化には重心法を用いた．

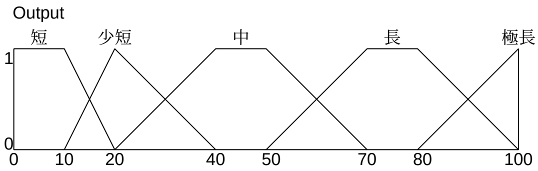
表 5　その他の演算子の機能
Table 5　Function of other operators.

演算子名	機能
Min	最小値選択
Lib1	$Out = \begin{cases} 1 & InA > InB \\ 0 & other \end{cases}$
Lib2	$Out = \begin{cases} 255(\text{最大値}) & InA = 1 \\ InB & other \end{cases}$
Lib3	$Out = \begin{cases} InA & InB = 0(\text{信号：赤}) \\ 255(\text{最大値}) & other \end{cases}$

(平成 14 年 11 月　1 日受付)
(平成 15 年　3 月 10 日採録)



(a) 前件部ファジィ変数



(b) 後件部ファジィ変数

(c) ファジィルール

InB＼InA	停	緩	適	快	疾
近	長	中	少短	少短	短
少近	長	中	中	少短	短
微近	極長	長	中	中	少短
中	極長	極長	中	中	少短
離	極長	極長	長	長	中
遥	極長	極長	極長	長	中

図 15　ファジィ推論演算子 Fuz2 の詳細
Fig. 15　Details of fuzzy inference operator “Fuz3”.

石川　　亮

1977 年生．2002 年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程修了．現在，同研究科博士後期課程在学中．日本シミュレーション学会会員．

風間　　洋

1951 年生．1973 年法政大学工学部電気工学科卒業．同年（株）京三製作所入社．交通システム技術部にて現在まで道路交通制御アルゴリズム開発に従事．交通工学研究会会員．

本多　中二

1946 年生．1972 年電気通信大学大学院電波通信学専攻修士課程修了．同年同大学電波通信学科助手．1982 年工学博士．1985 年同電子情報学科助教授．現在，同システム工学科教授．日本ファジィ学会，計測自動制御学会，IEEE 各会員．

板倉　直明

1961 年生．1990 年慶應義塾大学大学院電気工学専攻博士課程修了．工学博士．同年電気通信大学電子情報学科助手．1993 年同講師．1996 年同助教授．現在，同システム工学科助教授．電子情報通信学会，日本 ME 学会，日本生理人類学会各会員．

猪飼　國夫

1942 年生．1964 年電気通信大学電子工学科卒業．同年電気試験所電子計算機部（現産業技術総合研究所）．1969 年電気通信大学電波通信学科助手．1972 年技術コンサルタント．1975 年（株）エム・アイ・ベンチャー代表取締役．2001 年博士（工学）．日本ファジィ学会，日本シミュレーション学会各会員．