

マルチエージェントによる都市交通流の微視的シミュレーション

水野 一徳^{†,‡} 山田 雅一[‡] 福井 幸男[‡] 西原 清一[‡]

[†] 拓殖大学 工学部情報工学科

[‡] 筑波大学大学院 コンピュータサイエンス専攻

e-mail: mizuno@cs.takushoku-u.ac.jp, masa@npal.cs.tsukuba.ac.jp, {fukui, nishihara}@cs.tsukuba.ac.jp

概要: 近年の計算機性能の向上に伴い、道路交通における様々な現象を再現しようとする試みが盛んに行なわれている。本論文では、マルチエージェントを用いて道路交通問題をモデル化し、交通流を微視的にシミュレートする方法について述べる。本モデルは、道路交通を構成する要素（車両、交差点、道路、信号）をエージェントとして表現しこれらの相互作用によって交通流を再現するものである。本論文では特に、実際の交通流を動的かつ直接的に形成する車両エージェントについて詳しく述べる。車両エージェントは、行動決定、個性という2つの知識ベースを持ち、これらに基づいて各単位時間の行動を決定する。また、決定された行動の候補は、3つの単位運転操作（アクセル、ブレーキ、ハンドル）の繰り返し組み合わせることにより達成される。交通流を3次元的に可視化してシミュレートすることにより、車両エージェントの相互作用によって渋滞等の現象が発生していることを示す。

キーワード: マルチエージェント、シミュレーション、知識表現、道路交通、複雑系

A Multi-Agent Approach to Microscopic Urban Traffic Flow Simulation

Kazunori Mizuno^{†,‡}, Masakazu Yamada[‡], Yukio Fukui[‡], and Seiichi Nishihara[‡]

[†] Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Takushoku University

[‡] Department of Computer Science, University of Tsukuba

e-mail: mizuno@cs.takushoku-u.ac.jp, masa@npal.cs.tsukuba.ac.jp, {fukui, nishihara}@cs.tsukuba.ac.jp

Abstract: Urban traffic flow simulation has been important for making new control strategies that can reduce traffic jams. In this paper, we propose a method to microscopically simulate urban traffic flow based on multi-agent systems. Our proposed model is composed of four kinds of agent sets to be cooperated one another. This paper especially describe vehicle agents, each of which emerges traffic flow directly. Each vehicle agent uses two types of knowledge bases to determine its own actions to realize more realistic simulation, in which one includes basic traffic rules, e.g., stop if the signal is red, and the other includes drivers' individualities, e.g., speed maniac. In determining a behavior, each agent first recognizes neighboring environments, then an action is achieved by repeating one of three unit driving operations, i.e., acceleration, braking, or steering operations. We have developed a 3D animation system to visualize traffic flow, demonstrating that traffic jams are emerged due to interaction among vehicle agents.

Keywords: multi-agent, simulation, knowledge representation, urban traffic flow, complex system

1 はじめに

自動車の普及や道路網の整備など近年の交通環境は、我々に産業・経済の発展や生活向上をもたらしてきた。しかしながらその一方で、交通事故や交通渋

滞などの道路交通問題 [1,2] や、騒音や大気汚染などの環境問題 [3] が深刻化している。特に交通渋滞は、都市部を中心に慢性的に発生しており、その対策を講じて渋滞緩和を図ることが強く望まれている。交通渋滞を緩和するためには、道路を拡幅したり新し

く敷設したりといった対策が有効であると考えられるが、これらの対策は予算や地価などの都合により、簡単に実施するわけにはいかない。

そこで、これらの対策がどの程度の効果をもたらすかを検証するために、道路交通の流れ（交通流）を計算機を用いてシミュレートしようという試みが盛んに行なわれている [1, 4]。これにより、交通渋滞・事故などの現象を計算機上に再現し、それぞれの対策に対する十分な事前検証を行ったり、今後もその発展が期待されている ITS 導入による効果予測などを行ったりすることができる。

これまで開発されてきた交通シミュレータにおける交通流のモデルの多くは、大きくマクロモデル、ミクロモデルの2つの方法に分類される。前者は流体モデルとも呼ばれ、交通流を水などの流体としてモデル化し、この流体の動きを模擬するものである [5, 6]。これに対して後者は、車両一台一台の挙動をモデル化して、交通流を詳細に模擬するもので、車追従モデル [1] やセルオートマトン (CA) モデル [4, 7, 8] などが用いられている。

交通流は、マクロな視点での交通の“流れ”を指すものである。しかし、その形成過程においては、道路上を往来する個々の車両は、目的地を目指しつつも、信号や標識、あるいは周囲の車両の動きに応じて加減速や車線変更などの行動をとることで、全体の流れがボトムアップ的に形成されている。つまり、交通流を形成するための構成要素である個々の車両は、周囲の車両と相互に影響を及ぼしながら、かつ自律的に行動しており、交通流は、社会工学分野における複雑系の典型的例の1つとみなすことができる。

本論文では、交通流をシミュレートおよび可視化するために、マルチエージェントシステム (MAS) [9–11] を用いてモデル化する方式について提案する [12, 13]。本方式は、車両、交差点、信号、道路の4種類のエージェント集合からなるもので、本論文では、実際に交通流を形成する動的なエージェントである、車両エージェントのモデル化について詳しく述べる。

以下、2章では、研究分野の概要として、マルチエージェントの概要および従来の交通流シミュレー

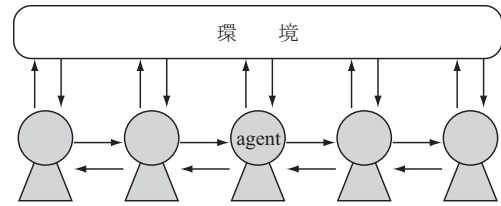


図 1: マルチエージェントシステム

タのモデルについて述べる。3章では、本研究で提案する方式について、エージェントのモデル化、行動決定の処理手順、行動決定のための知識、および道路生成インタフェースについて説明する。4章では、提案する方式によって開発した表示システムを用いた交通流シミュレーションの実行例を示す。

2 研究分野の概要

2.1 マルチエージェントシステム

エージェント [10] は、多くの分野において様々な意味で用いられているが、本研究では、周囲の環境の状態を認知して、状況に応じて自律的に判断・行動を行なうことにより、環境に影響を与えることができる実行主体とする。MAS は、このような自律的なエージェントが多数共存するシステムで、分散 (協調) 問題解決や種々の複雑現象の創発などに用いられている (図 1) [9]。エージェント同士の相互作用の結果としてシステム全体の振る舞いが創発され、その振る舞いがエージェントにフィードバックされることにより、また個々のエージェントが自身の振る舞いを決定していくという特徴を持つ。この循環により、全体としては予想もつかない現象を創発することができる。

2.2 交通流シミュレータ

交通流シミュレータに関する研究は、1950年代から広範囲にわたって研究されてきており、以下の2つのモデルに大別される。

(1) マクロ (巨視的) モデル

マクロモデルは、道路上の車両全体を流体と捉えて交通流を計算するモデルである。計算時間が少な

くて済むという利点により、比較的広範囲な道路網や高速道路などに対するシミュレーションを対象としている。NETSTREAM [6] は、交通情報システムの導入効果を予測するために開発されたシミュレータである。

(2) ミクロ（微視的）モデル

マクロモデルは車両一台一台の挙動を表現することが困難なため、詳細に交通流をシミュレートしたい場合¹には向いていない。これに対して、ミクロモデルは、個々の車両挙動を詳細に計算するもので、車両特性やドライバー特性などのパラメータも容易に設定できるため、比較的狭い範囲の詳細なシミュレーションが可能である。NETSIM [1] は、個々の車両に速度、加速度、走行距離などのパラメータを持たせ、個々の車は前の車の動きに影響されるという車追従モデルを用いたシミュレータである。また、交通量や所要時間、遅れ時間などの交通指標を出力すると同時に、排出ガス、燃料消費量などの推計やHOVレーンやバス路線がモデルに組み込むことができる。また、TRANSIMS [7,14] は、CA を用いてモデル化されている。CA モデルは、道路をたくさんのセルを一系列につなげた帯として表現して、個々のセルは、車が存在するかないかという状態で表わすものである。また、自セルと近傍セルの状態によって次の時間ステップの自セルの状態を決定する規則を適用することにより、個々のセルの状態を変化させる。

CA モデルは、個々のセルをエージェントとみなせば、近傍のセルの状態を認知し（規則によって）自身の次の状態を決定するため、一種のMAS と考えることができる。しかし、個々のセルは、車両が存在するかどうかの状態を遷移させていくため、車両特性やドライバー特性（個性）などを設定したり、車両自身の動きを直接的に表現することが難しい。

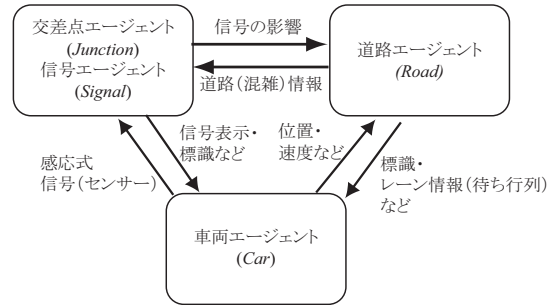


図 2: 構成するエージェントのモデル化とやりとりする情報

表 1: 第一認知と行動決定ルール例

第一認知	行動	重み
—	最高速度で走る	—
前方の車との距離 $\leq thc$	減速	w_1
	追い越し	w_2
	車線変更	w_3
交差点との距離 $= th_{j1}$	進路決定	—
交差点との距離 $\leq th_{j1}$	カーブに応じて減速	—
	信号の色に応じて減速 停止線の有無に応じて減速	—
交差点との距離 $= th_{j2}$	ウインカー点灯	—
交差点との距離 $\leq th_{j2}$	交差点動作	—

3 マルチエージェントによる交通流シミュレーション

3.1 基本方針

本研究の目的は、交通渋滞や交通事故の発生原因について解析し、対策法を検討することである。そのため、車両特性と、運転者の個性を考慮したミクロモデルの交通流シミュレータを開発する必要がある。また、評価のためには道路網や、信号規制の制御・変更を行なうことができるインタフェースも必要不可欠である。以上のことから本研究の基本方針を次の5つに定めた。

- i) 道路網の交通を構成している要素（車両、交差点、信号、道路）をエージェントとした MAS

¹例えば、ETC 導入の効果予測を行ないたい場合における ETC 車載器搭載車と非搭載車の区別など。

表 2: 第二認知と行動の例

行動	第二認知						
	信号	ウインカー	対向車	対向車のウインカー	優先車線	右折車線の対向車	左折車線の対向車
直進	青	なし	—	—	—	—	—
左折	青	左	—	—	—	—	—
右折	青	右	なし	—	—	—	—
右折	青	右	あり	右折	—	—	—
減速	青	右	あり	なし or 左折	—	—	—
減速	黄	—	—	—	—	—	—
減速	赤	—	—	—	—	—	—
直進	なし	なし	—	—	—	—	—
左折	なし	左	—	—	—	—	—
右折	なし	右	なし	—	—	—	—
右折	なし	右	あり	右折	—	—	—
減速	なし	右	あり	なし or 左折	—	—	—
減速	なし	—	—	—	x	—	—
直進	なし	なし	—	—	x	なし	なし
左折	なし	左	—	—	x	なし	なし
右折	なし	右	なし	—	x	なし	なし
右折	なし	右	あり	右折	x	なし	なし
停止	なし	右	あり	なし or 左折	x	なし	なし
停止	なし	—	—	—	x	あり	—
左折	なし	左	なし	—	x	なし	あり

- により全体をモデル化する .
- ii) 車両エージェントの行動決定のための知識を知識ベース化することにより, システムの保守改良を容易にする .
- iii) 車両エージェントのそれぞれに個性をもたせることにより, よりリアルなシミュレーションを実現する .
- iv) マルチエージェントを用いた従来のシミュレータは, CA モデルか, あるいは道路を複数個のセルに区切ることにより各車両の動きが離散的に表現されているものが多い [7]. 本研究では, 車両の連続的な動きを実現するために, 3 つの単位運転操作 (アクセル, ブレーキ, ハンドル) を段階的に繰り返し適用することにより決定された行動を達成する .
- v) 車両の動きの 3 次元可視化 (アニメーション), および交通流の検証を行なうための道路整備イ

ンターフェースの設計することにより, より有用なシステムを構築する .

3.2 システム全体のモデル化

システムは 3 項組 $Sys = \langle Car, Junction, Road \rangle$ で表わす (図 2). *Car* は, 実際に交通流を形成する車両エージェントの集合である. *Junction* および *Road* は, *Car* のそれぞれが行動決定のために必要な道路網における各情報を保持するエージェント集合である. 道路網はグラフ構造で表現され, *Junction* および *Road* はそれぞれグラフの頂点集合, 辺集合に相当する. また, L 字路のように 2 本の道路同士が接続される箇所も交差点として扱う.

図 3 は, 交差点, 信号, 道路エージェントが保持するデータの例を表している. $Junction = \{j_1, \dots, j_n\}$ は, 信号エージェント (*Signal*) の有無などを持ち, 接続している道路エージェントからの混雑情報などを得ることができる. そして, その得られた混雑情報

```

Junction_agent{
/* 共通データ */
    P (位置座標);
    Sig (属する信号エージェントの数);
    Sj (信号エージェント ID, j = 1, ..., Sig)
    Cl (接続道路エージェント数);
    Cidk (接続道路エージェント ID, k = 1, ..., Cl);
    Wmax, Wmin (接続道路の混雑度);
    sline (停止線の有無)
    etc...
/* 信号エージェント */
Signal_agent{
    cid (属する交差点 ID);
    color (現在の表示, red, yellow, green);
    etc...
}
Road_agent{
    Nj (接続交差点 ID, j = 0, 1);
    Tp (道路種), Wd (道路幅), Ct (中央線の種類);
    Ln (車線数);
    Sn (道路標識数);
    cqueuek (各車線の待ち行列, k = 1, ..., Ln);
    J (混雑量);
    etc...
}
    
```

図 3: 各エージェント (車両を除く) が保持する情報 (データ) の例

に応じて, 属する信号エージェントへ制御の指示を送る役割を持つ. 信号エージェントは (車両エージェントが守るべき) 信号の表示を行なう. また, 交差点エージェントから混雑情報および制御の指示を受けることにより信号現示の動的な制御 (未実装) を行なう. $Road = \{r_1, \dots, r_m\}$ は, 道路標識や道路標示², 車線や中央線の種類どの車両エージェントが認知すべき各種情報を提供する. また, $r_i (i = 1, \dots, m)$ に存在する車両の情報を待ち行列として持つ. この待ち行列は双方向リスト構造として, 車両エージェント

²現時点では, 道路の制限速度のみ導入している.

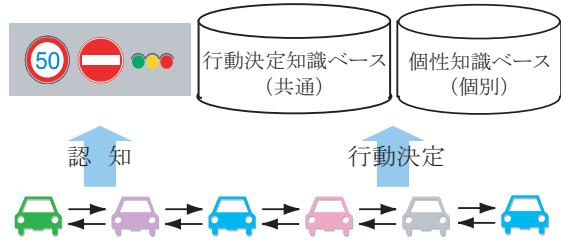


図 4: 車両エージェントの行動決定

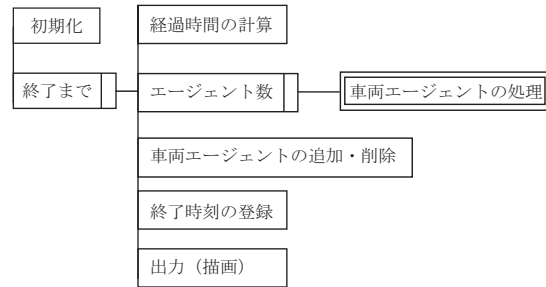


図 5: 車両エージェントの全体の処理手順

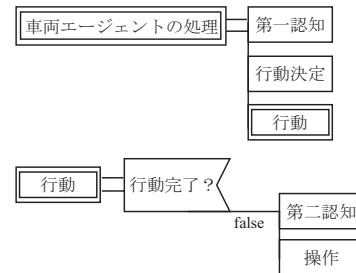


図 6: 個々の車両エージェントの処理

が前方や後方の車両を認知する際に参照される.

これらのエージェント間の情報のやりとりは, 主に各エージェントの ID を送受信することにより行なわれる.

3.3 車両エージェント

$Car = \{c_1, \dots, c_N\}$ は車両エージェントの集合である. 個々のエージェントは c_i は, 以下に示される (動的データ, 静的データ, 操作関数) を持つ. また, システムには, これらのデータ以外に行動決定のための知識ベース KB1 (すべての車両エージェントに共通の知識ベース) をもつ.

動的 (可変) データ: $(Curr, spd, direct, Wk, rd, rd.k,$

$n_node, recog1, recog2$)

Curr: c_i の現在の座標

spd: c_i の現在の速度

direct: c_i の現在の向いている方向

Wk: ウィンカー ($=\{left, right, none\}$)

rd: c_i が現在走行中の道路エージェント ID

rd.k: c_i が現在走行中の道路エージェント *rd* 中の待ち行列番号 (走行中の車線)

n_node: c_i が向かっている (*rd* が接続している) 交差点エージェント ID

recog1: c_i が第一認知で得られたデータへのリンク

recog2: c_i が第二認知で得られたデータへのリンク

静的 (固定) データ: (*Dest, Pro, KB2*)

Dest: c_i の目的地

Pro: c_i の車両特性データベース (車種など)

KB2: c_i の個性知識ベース

操作関数: (*accel()*, *brake()*, *handle()*)

accel(): 加速する (*spd* を大きくする)

brake(): 減速 (停止) する (*spd* を小さくする)

handle(): 車両の向きを変える

c_i はまず、初期状態 (位置・方向) および目的地が設定され走行を開始する。そして、目的地に到着するまで単位時間ごとに以下を行なうことにより、上記の動的データを更新していく。まず、交差点までの距離や信号、周辺の車などの環境を認知する。次に得た情報と行動決定のための行動決定知識ベースである *KB1* を参照して行動候補を決定する (図 4)。 *KB1* は、すべての車両エージェントが参照する共通の知識ベースであり、“前の車にぶつからない”などの基本的な規則のほか、“信号機が赤なら停止する”、“制限速度を守る”等の交通規則も含まれる。一方、各エージェントごとにもつ個性知識ベース *KB2* は、行動決定や操作を行う場合の選択肢に対する重みや加 (減) 速率、積極性などのパラメータが含まれる。これによって運転手の性格による運転法の違いを表現する。

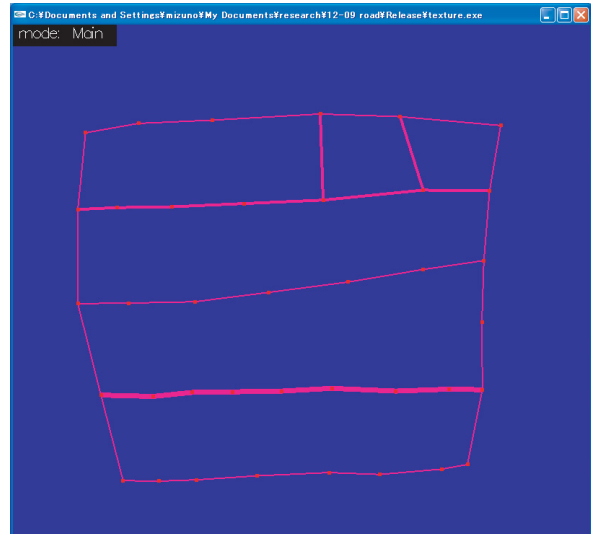


図 7: 道路整備インタフェース

3.4 処理手順

本方式の車両エージェントに関する全体の処理手順を図 5 に示す。本方式ではまず各エージェントの初期化を行う。その後、単位時間ごとに各エージェントの処理、エージェントの追加削除、出力 (描画) を繰り返していく。以下では、車両エージェントの各処理 (図 6) について説明する。

第一認知 各車両エージェントは、まず、前方の自動車や交差点などを認知する第一認知を行う。この第一認知により例えば、前の自動車が遅いので追い越しをかけるなどの行動の決定を行う。このときに認知するものとして以下のようなものが挙げられる。

- 前方の車
- 道路標識, 表示 (道路の制限速度)
- 交差点との距離
- 停止線の有無など

ここで、ある道路を走行する車両エージェントは、その道路エージェントが持つ待ち行列で管理されている。したがって、車両は、3.3 節の動的データ *rd.k* が保持している待ち行列 (双方向リスト) $cqueue_k$ を参照して自身の前方を走行

する車の現在地座標を得ることができ、これを用いて距離計算を行なう。道路標識、表示も同様に rd が保持している情報を得ることができる。交差点との距離、停止線の認知は、 n_node が保持している情報を参照することによって得ることができる。

行動の決定 第一認知の決定において行動の決定を行う。たとえば、前方の車が迫ってきたときに、このとき $KB2_i$ による重みにより減速、追い越し、車線変更の中から確率的に行動を決定する。これにより、個々の車両エージェントに個性を持たせる。

第二認知 第二認知は行動を行なう直前に行う認知であり、第一認知では行なっていない車両の認知も行なう³。例えば行動が追い越しと決定していた場合、第一認知と同様の方法で、周りの自動車を認知し、追い越し可能な状況なら以下で述べる操作の繰り返しによって追い越し行動を行う。

操作 操作は、 $accel()$ 、 $brake()$ 、 $handle()$ の3つで構成される運転動作の単位である。この3つの操作を組み合わせることにより、 $Curr$ や spd を更新する。これによって、追い越しや車線変更などの行動を実行する。

3.5 行動決定のための知識

車両エージェントは、表1、表2に示す知識を用いて行動の決定を行なう。表1において、 thc 、 $thj1$ 、 $thj2$ は閾値であり $thj1 > thj2$ である。また、 w_1, w_2, w_3 は、第一認知の結果、複数の行動候補がある場合の重みを表している。各重みの値は車両エージェントごとの個性知識ベースに記述されており、各エージェントはこの重みに応じて確率的にいずれかの行動を決定する。個性知識ベースには、この他にも、自身が出すことができる最高速度の上限や各環境の認知率など、個々に値が異なるパラメータが記述されている。表2は、表1において決定された“交差点動

³後方の車（追い越し・車線変更時）や対向車（右折動作時）など。

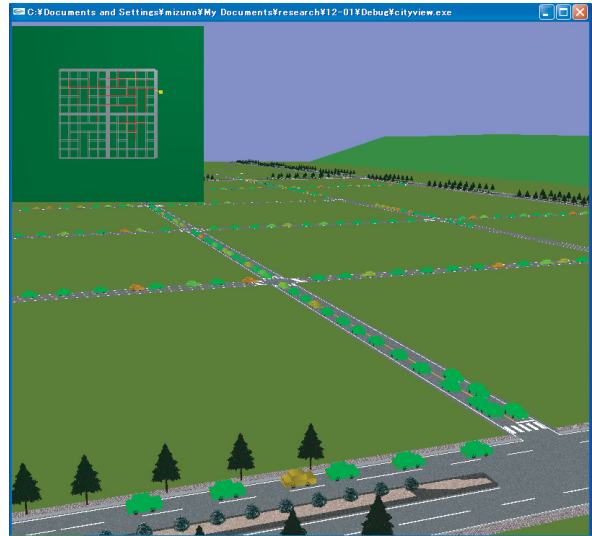


図 8: 実行例 1: 上空から見下ろした交通流（大規模な渋滞の発生）

作”という行動に対する、詳細な行動（操作）およびその実行条件（第二認知）を表わしている。

3.6 道路整備インタフェース

本研究では、頻繁に渋滞する箇所の任意の近辺に新しい道路を生成することができるインタフェースを構築中である。これによって、道路をどのように新設するかによって、渋滞がどのくらい緩和するかを評価することが可能となり、都市工学や交通工学分野に応用することができる。図7は、現在構築中のインタフェース実行画面を示している。図7では、マウス操作により、まず、交差点となるべきグラフの頂点を生成し、次に、頂点間をつなぐ辺（道路）を生成することによって任意の箇所に道路を新設することができる。新設する道路の道路種（幹線、準幹線、および区画道路）や車線数、交差点内の信号の有無や右折レーンの有無などの設定もこのインタフェースを用いて行なうことができる。

また、BMPなどの画像ファイルを背景として読み込むことが可能となっており、例えば、市販の道路地図を読み込んでそれに沿って道路網を生成することによって、現実の道路網におけるシミュレーションも可能となる。

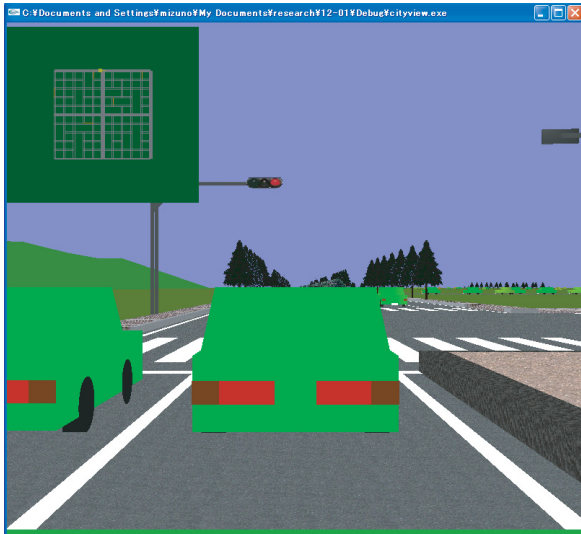


図 9: 実行例 2: ドライバー視点からの交通流

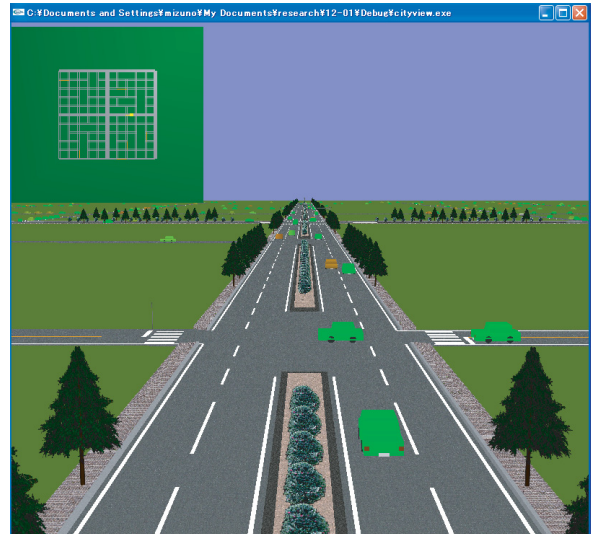


図 10: 実行例 3: 車両エージェントの行動（車線変更・追い越し）

4 実行例

交通流をシミュレートするために、提案した方式を交差点数（グラフの頂点数）= 121，交差点間をつなぐ道路数（グラフの辺数）= 204 からなる道路網に適用した。図 8～図 11 はその実行例を示している。これらの図において、車両エージェント、すなわち自動車は直方体を重ねたものとして表現し、直方体の色の違いは、それぞれの持つ最高速度を表わしている。また、すべての図において、画面左上隅に現在シミュレートしている道路網とその状態（渋滞情報）⁴が示されている。渋滞情報⁴は、その程度に応じて、3 段階（なし（つまり、道路の色）、橙（混雑）、赤（渋滞））でリアルタイムに表示することができる。

図 8 は、上空から見下ろした交通流を示しており（フライスルーモード）、交差点を起点とした大規模な渋滞が発生していることが分かる。図 9 は、ドライバーの視点から見た交通を示している（フライスルーモード）。図 9 では、前の車が赤信号にしたがって停車しており、その車に追突しないよう減速・停止していることが分かる。図 10 では、画面奥から手前に向かってくる 2 台の車のうち、後ろの車が低速な前の車を認知して、車線変更して追い越そうと

していることが分かる。また、図 11 では、幹線道路同士の交差点において、右折しようとしている車が対向車を認知して、対向車が通過するまで交差点内に待機していることが分かる。

5 おわりに

本論文では、マルチエージェントを用いて交通流のシミュレーションおよび可視化を行なう方式について述べた。本方式でモデル化した車両エージェントは、(1) 2 種類（規則、個性）の知識ベースに基づいて行動決定を行なう、(2) 単純な操作（アクセル、ブレーキ、ハンドル）を段階的に組み合わせることによって行動を実現する、などの特徴を持つ。車両エージェントが行動決定に用いる知識ベースはシステムから独立しているため、知識の追加・削除などの保守改良が容易に行なうことができる。また、提案した方式を実装して交通流を 3 次元可視化することで、エージェント同士の相互作用によって交通渋滞などの現象が発生していることを確認した。

今後は、知識ベースの精度をさらに高めると共に、車両エージェントに知的ルート選択 [15] の知識を導入する予定である。また、交通流に関する種々の検証を行なうためのインタフェース（任意の地点での

⁴道路エージェントが保持している。

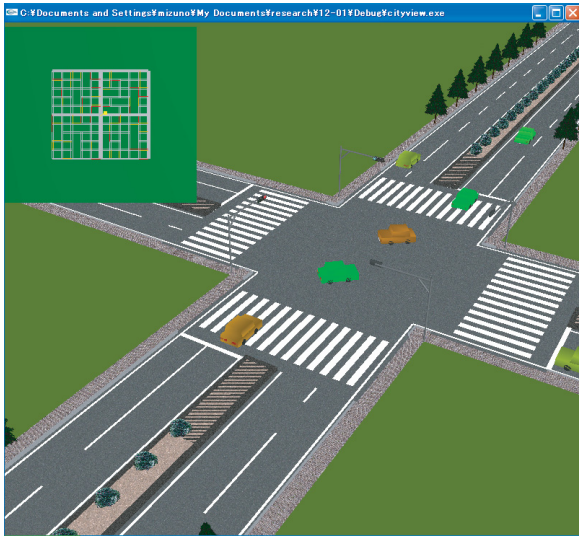


図 11: 実行例 4: 車両エージェントの行動 (交差点動作: 右折)

交通量測定や道路の拡幅・新設)との統合を行なう必要がある。また, 信号エージェントによる交通渋滞緩和のための動的な信号制御方式 [16,17] について検討することや, 現実の道路網を用いたシミュレーションを行なうことにより本方式の有効性を明らかにすることが重要である。

謝辞

道路生成インタフェースの開発にご協力いただいた本学理工学研究科下田建一氏に感謝いたします。

参考文献

[1] (社)交通工学研究会 編: やさしい交通シミュレーション, 丸善 (2000).

[2] Li, M. *et. al.*: A Cooperative Intelligent System for Urban Traffic Problems, *Proc. IEEE Symp. Intelligent Control*, pp. 162–167 (1996).

[3] 伊藤秀昭: 交通流シミュレーションの環境問題への適用, *OGI Tech. Rep.*, Vol. 11 (2000).

[4] 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, *人工知能学会誌*, Vol.15, No.2, pp. 242–250 (2000).

[5] Helbing, D. *et. al.*, Micro- and Macro-Simulation of Freeway Traffic, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 35, pp. 517–547 (2002).

[6] 棚橋巖 他: 広域交通流シミュレータ NET-STREAM, *R&D Review of Toyota CRDL*, Vol. 37, No. 2, pp. 47–53 (2002).

[7] Barrett, C. L. *et. al.*: TRANSIMS (TRANSPORTATION ANALYSIS SIMULATION SYSTEM) Volume0 – Overview, *Tech. Rep.*, LA–UR–99–1658 (1999).

[8] 山本直史, 森下信: セルラオートマトンによる交通流のモデル化とその制御, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol. 65, No. 637, pp. 3553–3558 (1999).

[9] 車谷浩一: マルチエージェント社会シミュレーション展望, *システム/制御/情報*, Vol. 46, No. 9, pp. 518–523 (2002).

[10] Mackworth, A. K. *et. al.*: A Formal Approach to Agent Design: An Overview of Constraint Based Agents, *Constraints*, Vol. 8, No. 3, pp. 229–242 (2003).

[11] Nareyek, A.: *Constraint-Based Agents*, LNAI-2062, Springer (2001).

[12] 山田雅一, 水野一徳, 福井幸男, 西原清一: マルチエージェントによる都市道路網の交通流シミュレーション, 第 21 回 NICOGRAPH 論文コンテスト, pp. 73–78 (2005).

[13] Yamada, M., Mizuno, K., *et. al.*, An Agent-Based Approach to Urban Traffic Flow Simulation, *IWAIT2006*, to appear.

[14] Nagel, K. *et. al.*: TRANSIMS for Urban planning, *Tech. Rep.*, LA–UR–98–4389 (1999).

- [15] Dia, H.: An agent-based approach to modelling driver route choice behaviour under the influence of real-time information, *Transportation Research Part C*, Vol. 10, pp. 331–349 (2002).
- [16] Chen, R. S. *et. al.*, ACTAM: Cooperative Multi-Agent System Architecture for Urban Traffic Signal Control, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol. E88–D, No. 1 (2005).
- [17] Fernandes, J. M. *et. al.*: TraMas: Traffic Control through Behaviour-based Multi-Agent System, *Proc. PAAM'99*, pp. 457–458 (1999).