

# マルチ移動エージェントシステムにおける記憶情報の ピアツーピア通信に基づく大域的最適化

川上 広太<sup>†</sup> 岩沼 宏治<sup>‡</sup> 鍋島 英知<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>山梨大学 大学院 医学工学総合教育部 コンピュータ・メディア工学専攻

<sup>‡</sup>山梨大学 大学院 医学工学総合研究部

## 1 はじめに

マルチエージェントシステムとは、複数のエージェントの自立的かつ協調的な行動によって問題解決を実現するシステムである。エージェントは全員が同じ目標を持っていることもあれば、それぞれ個別の目標を持っていることもある。そのためマルチエージェントシステムにおいて、エージェント間の協調は重要な問題であり、協調機構に関する多くの研究がある。システムとして効率的なエージェント間の協調動作を実現する研究や、エージェントの内部状態に主観情報を導入し、各エージェントが主観的協調関係に基づき協調動作を行う研究などがある。これらの方法は、システムや個々のエージェントのインテリジェンスを高めることで効果的な協調動作を行うミクロ的な研究である。[3]

これに対し、実世界における社会構造や命令・支持システムを抽象化した情報伝達構造に注目し、その情報伝達構造を変化させることで効果的な強調を行うマクロ的な研究も行われている。[1]

一方、現在はエージェントに行動を学習させる研究も盛んに行われている。[2] エージェントに行動を学習させる背景には、ロボットに自律的に行動決定をさせたいとする要求がある。現在のロボットは、人間が直接もしくは遠隔から操縦することにより行動をしているものがほとんどである。しかし、現実世界ではロボットが自身の状態を把握し、自律的に行動決定をし、人間の操縦無しで行動することがしばしば必要となる。一般に、直接実機で学習を行うには膨大な時間とコストが必要であるため、最初から実機で学習させることは困難である。そこで、計算機上でエージェントをロボットに見立ててシミュレーションを行い、その結果を実機でのテストにフィードバックすること

によって学習時間とコストを節約する工夫が通常行われている。

本研究のマルチエージェントシステムでは各エージェントは自分の利益のために行動をする状況を考える。しかし、全てのエージェントが自己利益を追求することによる衝突問題を考慮し、その問題解決のために各エージェントの記憶情報を局所通信であるピアツーピア通信を用いてシステム全体の大域的準最適化をはかる。通信の結果得られた情報を基に利害を考察し、自己利益の追求をさらに行うことで、システム全体の効率化を図る。

## 2 マルチエージェントシステム

近年、エージェントという語は幅広く使われており、その概念や定義はいささか不明瞭といわざるを得ない。そこでまずこの章ではエージェントについての定義を行い、マルチエージェントシステムがなぜ注目されてきているか、そしてマルチエージェントシステムの利点について説明する。

### 2.1 エージェント

まずエージェント(図1)について定義する。エージェントとは一般的な意味では自分の代わりにこなしてくれる代理人のことをいうが、コンピュータサイエンスにおける意味では「エージェントはある環境をセンサである受容器を用いて知覚し、効果器を通して行動するもの」と述べられる。このとき知覚した情報を実際の行動に変換する知的メカニズムもエージェントの構成要素である。人間の処理で言えば、目から情報を近くし、それ脳で処理し、その結果を筋肉に伝え行動するものといえる。これらのエージェントが集まったシステムをマルチエージェントシステムと



図 1: 基本的なエージェントのフレームワーク

呼ぶ。[2]

## 2.2 マルチエージェントシステムの利点 [2]

マルチエージェントシステムにはどのような利点があるのだろうか。まず、最初の利点は問題解決能力の向上である。例えば、1つのエージェントではできないことが、複数集まることによってできるようになる可能性がある。あるいは1つのエージェントの能力が低くても複数が協力することでより高度な仕事を達成できる可能性もある。

次の利点は適応能力である。例えば、問題の規模が拡大したり問題の対象が変更されたり、もしくは問題自体が複雑化された時に、マルチエージェントシステムでは新たなエージェントを追加したり、エージェント間の相互作用を動的に調整することによってうまく対処をできる可能性がある。

さらに、ロバスト性も利点である。例えば、あるエージェントが故障などによって使い物にならなくなっても、他のエージェントが代役を果たすことでマルチエージェントシステム全体の処理の停止を防ぐことが可能になる。

また並列性という利点も存在する。例えば、エージェント間の整合性をとる処理が少ない問題の場合、エージェントは並列かつ非同期に動作できるので、全体の処理の高速化と効率の向上をはかることができる可能性がある。

最後の利点は、モジュール性である。マルチエージェントシステムはエージェント単位でモジュール化されているため、はじめからシステムの詳細設計をしなくても、設計済みのエージェントを再利用、または組み合わせることによって設計コストと時間を低く抑えることができる可能性がある。また、システムのテストや維持管理もエージェント単位で行うことができる。

ただしこれらの利点を得るためには、エージェント間の協調やエージェント・システム全体のインテリジェンスの向上などが必要なのである。

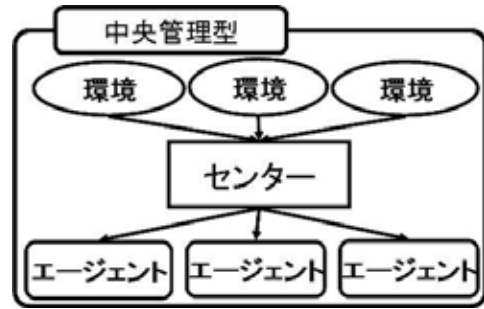


図 2: 中央管理型

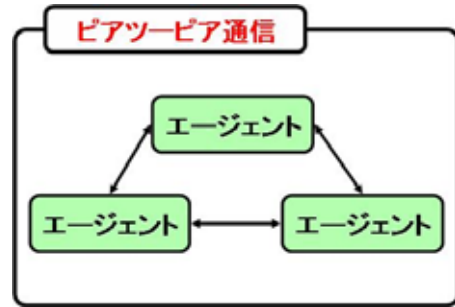


図 3: ピアツーピア型

## 3 エージェントの自己利益追求とシステムの大域的最適化

本来、人は自分の利益を出来る限り最大限にするように動くものだが、多くのシステムはそのような場合様々な衝突や不利益が発生してしまう。そこで本研究では、各エージェントは自己の利益を最大限にするように行動をしながらも、システム全体も準最適化を果たすようなシステムの構築の手法について研究を行う。

### 3.1 情報通信

本研究の目的を満たすことは非常に困難である。そのため、システムの条件としてエージェント間で情報通信を行うことができると仮定する。

情報通信には、多くのセンサを設置することによりその周りの情報を取得し、センターなど一括管理をして各エージェントに送信をするような中央管理型通信(図2)や、エージェント同士が1対1で通信を行うピアツーピア通信(図3)などがある。その通信はコストなどの関係から出来る限りローカルなものが良く、本研究ではピアツーピア通信を採用する。

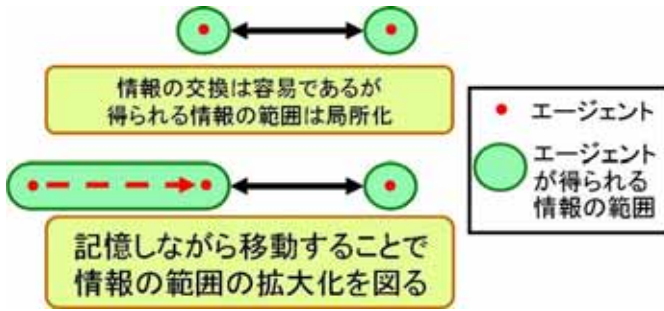


図 4: エージェントの移動と記憶

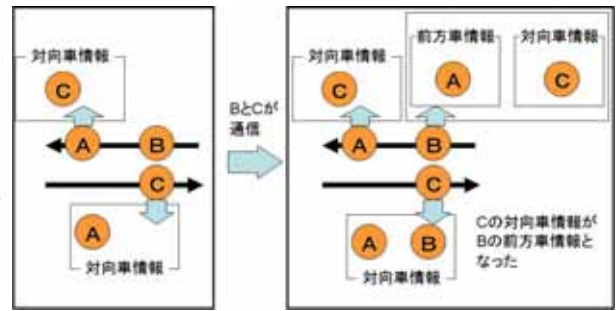


図 5: 通信概要

### 3.2 ピアツーピア通信の問題点と解決策

それぞれの型の特徴として、中央管理型は情報を1箇所で管理するために故障に弱くなるという面があるが、多くのセンサを設置することによってより大きな範囲の情報の取得を同時に行うことができるという面がある。一方ピアツーピア型では各エージェントが情報を管理するために、故障に強くサーバは不要になるという利点があるが、情報の取得範囲が非常に狭くなってしまおうという問題がある。このようなローカルな情報でグローバルな世界を最適化するのは非常に困難である。

そこでシステムの条件としてさらに、エージェントは移動可能であると考え、移動するエージェントに情報を運んでもらうことを考える。各エージェントは取得した情報を記憶していき、移動した先で他のエージェントとその記憶情報の交換を行うものとする。(図4)

## 4 システムの具体的モデル

ここまでの条件をふまえたシステムの具体的モデルとして、カーナビゲーションシステムを取り上げる。それぞれの車をエージェントとし、各車は出来る限り最短時間で目的地に到着をすることを旨とする。システムの最適状態は、全ての車が渋滞に巻き込まれず最短時間で目的地まで到着することである。ところが全ての車がただ最短経路を通る場合、多くの車が同じ道を選んでしまうことが多々ある。その場合、道路には許容量があるため、許容量を越えると渋滞を引き起こしてしてしまう。渋滞すると結果的に回り道をしたほうが早く到着できることになる。このような渋滞を感知するためにはグローバルな情報が必要になるが、本研究ではピアツーピアで渋滞情報の取得を目指す。

### 4.1 車同士のピアツーピア通信

各車はすれ違った瞬間に情報を交換するものとする。すれ違ったとき各車は自分の車の情報を相手に送信し、その情報をお互い記憶して移動していく。

移動した先で新たな車とすれ違った場合、自分の車の情報とは別にこれまで記憶した情報も送信する。この記憶された情報は受け取った車にとっては前方の車の情報となる。前方の車の情報を受け取ることによって前方の道路の状態、渋滞であるかどうかを予測するのである。

通信の概略が図5である。まず、車は対向車とすれ違ったときに通信を行う。取得した情報は対向車情報として貯蓄される。対向車とすれ違うたびにその情報は貯蓄されていく。

次に貯蓄された情報を同じく対向車と交換する。ある車にとっての対向車情報は、その車とすれ違った車にとって前方車情報となる。この前方車情報を基に渋滞を予測しリルートを行う。

### 4.2 通信を行う情報

渋滞を予測するためにはどのような情報が必要か考察する。今回は必要最低限の情報として、以下の3つを用意した。

- ・エージェント ID
- ・道路番号とその位置
- ・タイムスタンプ

簡単に言えば「誰」が「何処」で「何時」に存在したかというだけの情報である。道路番号は渋滞を予測する上では欠かせないものである。またタイムスタンプは、古い情報は役に立たない可能性がありその情報の整理に必要である。そしてエージェント ID であるが、ID が無い場合、同じ車の

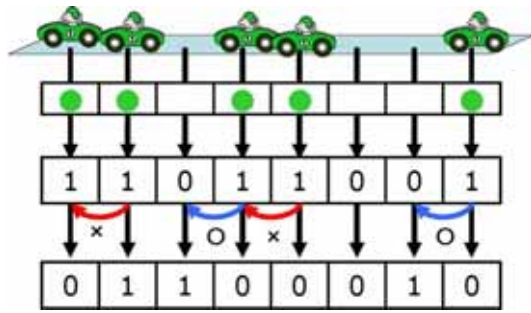


図 6: セルオートマトン法概略図

別の情報が判別できない可能性が大きく，出来る限り必要な情報である．情報のプライバシーの観点から ID はできれば加えたくない情報でもあるが，この問題は，ワンタイムパスワードのように電源を入れるごとに変わる ID システムを用いることで保護可能であると考え，今回の情報に加えることにした．

### 4.3 車の交通渋滞モデル

車の交通渋滞のモデルとしてセルオートマトン法 [4] (図 6) の導入を考える．これは有限種類の状態を持つセルオートマトンを並べ，全てのセルの状態は隣接セルの状態によって，次々に遷移するシステムである．車や人などといった自己駆動粒子には「前が空いていれば進むことができ，空いていなければ停止している」という共通の性質が存在している．そこで車や人を 1 つの粒子として考え，道路をセルをが並んだものとして表すことを考える．

#### 4.3.1 セルオートマトン法単純モデルの妥当性

この手法は、「取り扱いが容易」で「現実に近い」良いモデルである．

まず「取り扱いが容易」という点であるが，このシステムに存在する情報は「ある」か「ない」かだけである．つまり 0 か 1 で全てを表すことができるため非常に計算も容易となる．

次には「現実に近い」かどうかという点である．渋滞学における渋滞の定義は密度と流量によって定義される [4]．密度とはある区間内に，粒子がどれだけ存在するかを表し，流量はある時間内に，その区間を粒子がいくつ通過したかを表す量である．この密度を横軸に，流量を縦軸に取った図を

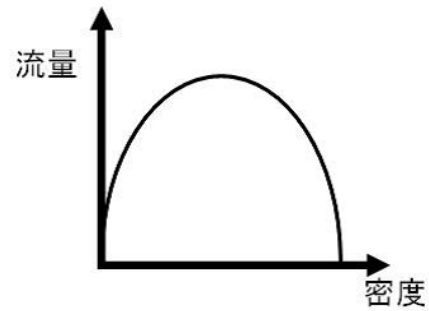


図 7: 人の基本図

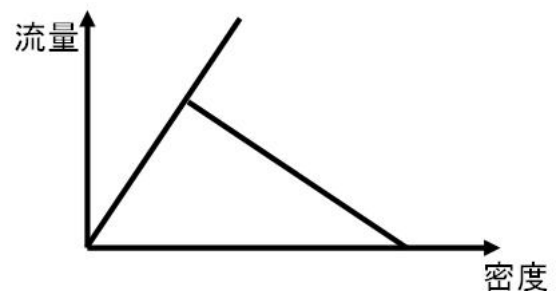


図 8: 車の基本図

基本図とよぶ(図 7, 8)．この基本図は，人の渋滞でも車の渋滞でも山のような形となる．この基本図において流量が最大になる密度を臨界密度といい，密度が臨界密度以下のときに渋滞していない状態，臨界密度以上のときに渋滞している状態と定められる．車の場合の基本図は正確には単純な山なりではなく漢字の人のような形になる．これは人の基本図には見られないものであり，車の流れの重要な性質である．上に突出している部分は自由流の状態に少しずつ車の数を増やしていくことで，車間距離が詰まっていながらも高速で走っているような非常に危険な状態である．この突出した部分を準安定状態と呼び，本来なら渋滞をしているはずの密度であるのに，自由走行状態のままである状態である．この状態の場合，信号やトンネルの入り口，上り坂口のようなサグ部といった箇所でのスピード低下によって簡単に渋滞が引き起こされる．ここでセルオートマトン法によるサーキット状の道での単純モデルによるシミュレーションの基本図は図 9 のようになる．残念ながらこの形には準安定状態は現れていない．そのためこのままでは車のモデルとしては難があり，車の渋滞現象の本質は捉え切れていないことがわかる．

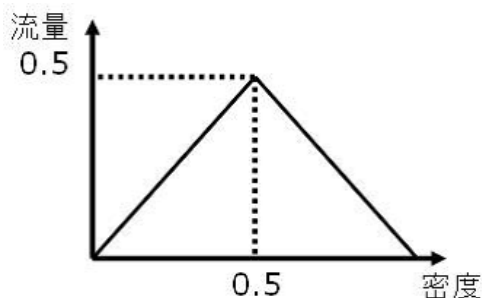


図 9: 単純モデルの基本図

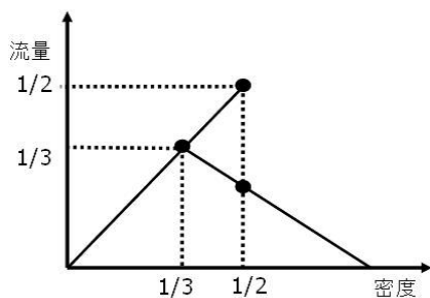


図 10: スロースタートルールモデルの基本図

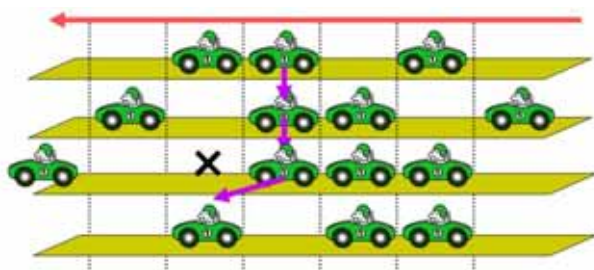


図 11: スロースタートルール

#### 4.3.2 スロースタートルール

単純モデルでは、車の自然渋滞の原因である重要な準安定状態を表現することができない。そこでこの単純モデルを少し改良して準安定状態を持つモデルを作る。そのひとつの方法としてスロースタートルール[4]をがある。スロースタートルールとは一度止まった粒子は次に動けるようになっても1回休んでから動くというものである(図11)

スロースタートルールを導入したモデルの基本図は図10のようになりはっきりと準安定状態が現れていることがわかる。

本研究ではこのモデルを使用しシステムの実装を行っていく。

#### 4.4 リルート方法

車エージェントの情報通信や動作や環境のモデルをここまで説明した。次にそれらの情報をどのように使えば、渋滞を回避するリルートを行うことができるかを考える。各車は交差点の手前に到着時、リルートを行うと仮定する。このときの判断基準として二つの手法を用意した。

第1の手法は車数による渋滞予測であり、前方車情報の中から各道路に存在する車の数を数えるものである。このときその道路区間が渋滞している状態といえるのは図10の基本図より、準安定状態以上の密度、つまり道路のセル数の3分の1以上の時である。このとき道路は渋滞している、もしくは渋滞をしかねない状態であるといえる。道路の密度が3分の1以上のとき、その区間を走行するのに最低必要な時間  $\text{minTime}$  を、車1台につき負荷時間  $\text{weightTime}$  分だけ増加させ、その値から再び最短時間経路を計算し最短経路を求める手法である。

第2の手法は交換する情報に車が停止しているかどうかという情報を加えるて用いる。渋滞している車は停車していると判断でき、スロースタートルールの概念から停止している車に巻き込まれるとより時間がかかることが判断できる。そこである区間上で停止している車の数だけ、その区間を走行するのに最低必要な時間  $\text{minTime}$  を、停止している車を1台ごとに負荷時間  $\text{stopTime}$  分だけ増加させ、その値から再び最短時間経路を計算し最短経路を求める手法である。

この2種類の手法によって渋滞の予測を行い、各エージェントはより早く目的地への到着を目指す。

### 5 システムの実装

本研究ではシステムのシミュレータを JAVA によって実装を行った。

#### 5.1 エージェントの動作

各車エージェントは目的地を所持して、あるノードに発生する。目的地に着いたときは消滅し、新たな車エージェントとしてどこかのノードに再度発生する。各エージェントは道路マップの情報は持っているが、その道路上に存在する車の情報等は最初は持っていない。生成された後はダイクストラ法により最短経路を探索し、目的地に向かって



図 12: 道路マップ

動いていく。

各車エージェントは方向が逆の道を走行して行く対向車とすれ違った瞬間に情報の交換を行う。

## 5.2 環境

本研究では甲府市内の主要道路を有向グラフで表現し、そのグラフ上をエージェントがスロースタートルール付きセルオートマトン法によって走行を表現する。そのマップは図 12 のように表現された。

## 5.3 シミュレータの動作

道路の各交差点には渋滞の引き金となる信号を配置した。信号が赤のときには各車エージェントはその交差点を渡ることができず停止する。

シミュレータの表示について説明する。このシミュレータでは、Experiment タブにおいて各道路における車エージェントの動向を見ることができる。道路マップのグラフ枝上を車エージェントが動いていく。車エージェントは動くことができるときには青色で表現され、止まっている時には赤色で表現される（図 13）

Setting タブではシミュレータの環境とエージェントの動作パターンを選ぶことができる（図 14）現在、エージェントの数と P2P 通信を行うかどうかをここで入力可能であり、またエージェントはナンバー 0 のエージェントのスタート地点と目的地を選ぶことができる。

result タブでは実験の結果が表示される。（図 15）ここでは各車エージェントが最短ステップの何倍の時間で到着したかの数値が延べ 1 万個になるまで表示され、最終的にその平均時間が表示される。

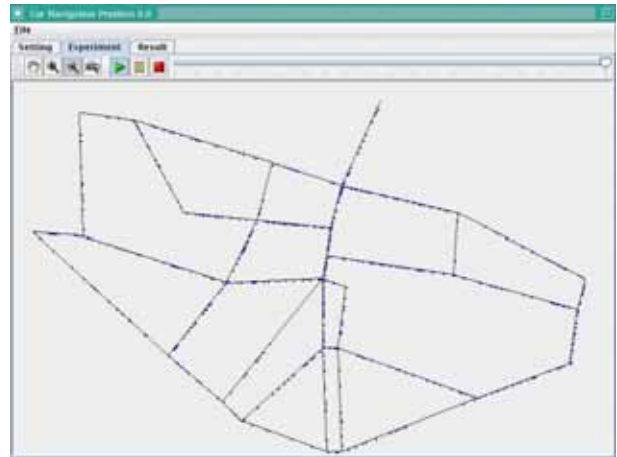


図 13: Experiment タブの表示

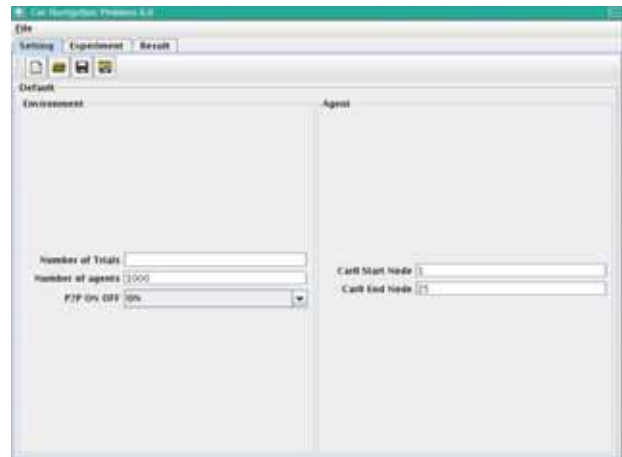


図 14: Setting タブの表示

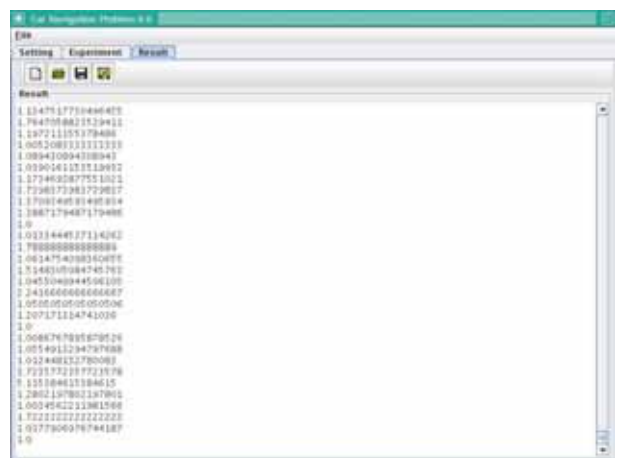


図 15: Result タブの表示

## 6 評価実験

実験は車エージェントの数を500から2000台まで100台ごととし、それぞれにおいて情報交換をしない場合、車数によるリルートを行う場合、停車している車数によるリルートを行う場合の3つの計測を行った。

評価の対象として1つは停止している車の数に注目をした。時間ごとに止まっている車の数を計測し、各手法によって車が渋滞にどれくらいの数巻き込まれているかを計測した。

また車エージェントが目的地に着いたとき、最短時間と比べてどれだけ時間がかかったかという渋滞による到着遅延率を合計1万回計測し、その平均と分散を求めた。

### 6.1 実験結果と考察

#### 6.1.1 時間経過による停車数の変化

結果として500~2000台の停止している車の数を計測した結果を示す。(図16~図19)

まず500台の結果であるが、図16のように3つの手法による違いはあまりない。これは500台の車では渋滞がほとんど起きなかったためと考えられる。次に1000台~2000台であるが、どれを見ても、停車車数による渋滞予測手法では、情報交換無しに比べて止まっている車の数がおよそ半分ぐらいまで減っていることがわかる。

この結果から本システムはエージェントを出来る限り渋滞に巻き込まないように動かすことに成功していると判断できる。しかしこの結果だけでは、多くのエージェントが無駄な遠回りをしてしまっているのか判断できない。そのため最短経路を通る時間と比べてどのくらい多くの時間がかかってしまったかを考える必要があり、その到着遅延率も求めた。

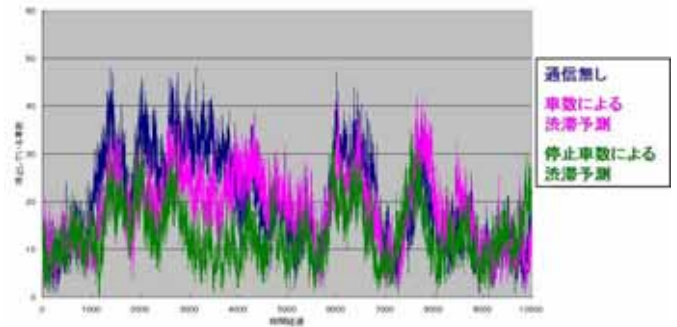


図 16: 500 台のときの時間経過による停車車数

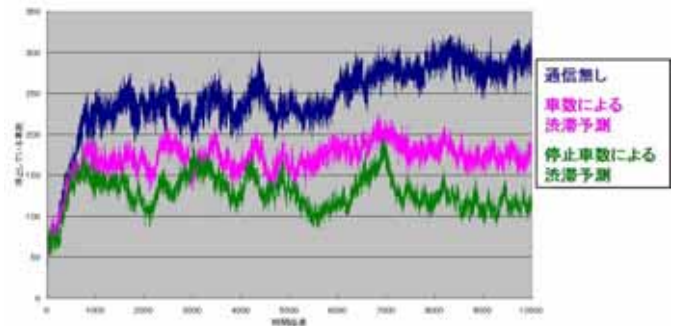


図 17: 1000 台のときの時間経過による停車車数

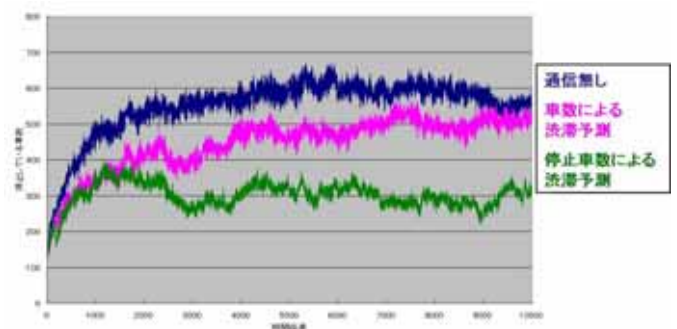


図 18: 1500 台のときの時間経過による停車車数

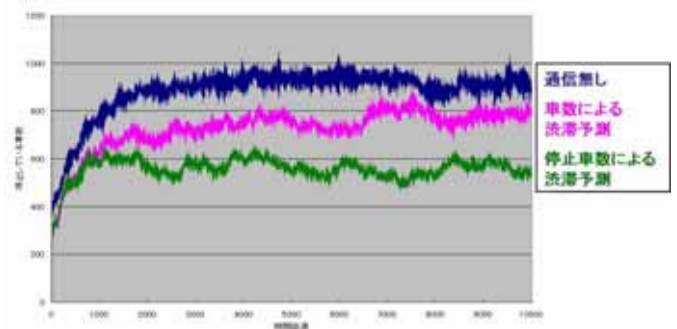


図 19: 2000 台のときの時間経過による停車車数

### 6.1.2 渋滞による到着遅延率

各手法の実験結果は平均値が図 20, 分散が図 21 のようになった。図は横軸がエージェント数であり, 縦軸が最短時間との時間比である。この結果から, 全体的に情報交換をすることによって目的地に到着するまでの時間が減少していることがわかる。特に停車数にまで注目した手法は分散が小さく本システムの全体の制御への有効性を示していると考えられる。

存在する車エージェントが少ない場合, そもそも渋滞があまり起きないため, 渋滞を予測する必要も無くリルートをすることもない。よって手法による差異はほとんど見られない。

また, 車エージェントの数が非常に多い場合も, 手法による差異は小さい。これは車の数が増えたとリルートを行っても再度渋滞に巻き込まれやすいためと考えられる。また取得した 1 万個の結果は目的地に到着したときに取得されるもののため, 近距離や渋滞に巻き込まれない車のデータが強調されてしまっている問題とも考えられる。

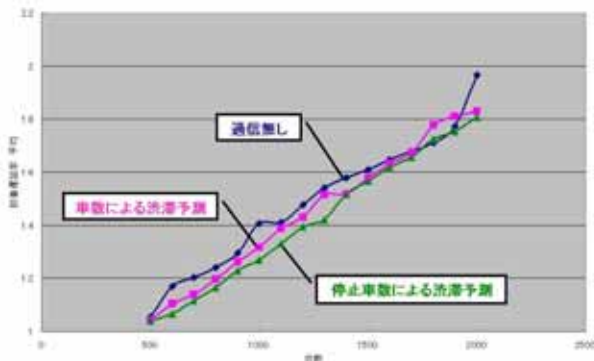


図 20: 各エージェント数における到着遅延率平均

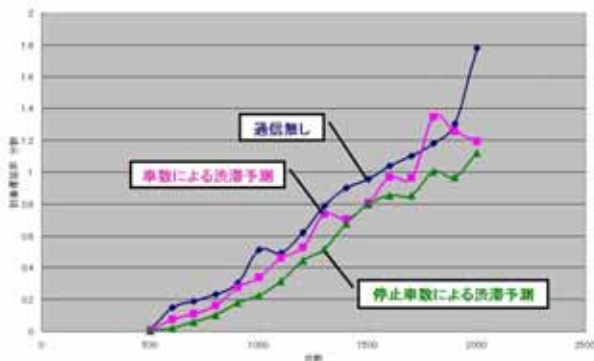


図 21: 各エージェント数における到着遅延率平均

## 7 まとめと今後の課題

### 7.1 まとめ

本研究では, 移動エージェントの記憶情報ピアツーピア通信という局所的な情報交換を行い自己利益を追求しながら, システム全体の準最適化をはかるマルチエージェントシステムの構築手法について研究を行った。

このモデルとして交通制御システムとなるカーナビゲーションシステムを取り上げ, 渋滞を避けできるだけ早く目的地に着きたいというエージェントを用意した。通信を行い, 周りの車の情報を取得することで渋滞の予測をしたいが単純なピアツーピア通信では情報が局在化してしまい, 交通制御システムのような広域の情報が求められるシステムの場合には難しい。そこで対向車の情報を記憶して移動し, 新たな対向車にとっての前方車情報として投げることで情報域の拡大を図った。

取得した少ない情報から渋滞を予測する方法として, 道路区間における車の数による渋滞予測と, 停まっている車の数による渋滞予測の 2 手法を提案した。このシステムを実装したシミュレータを作成を行った。自然な交通渋滞を引き起こすためのモデルとしてスロースタートルールをつけたセルオートマトン法を用い, 信号などによる自然な渋滞のできるモデルの構築を行った。

シミュレータを用い, それぞれの手法と情報交換無しの手法についての評価実験を行った。それぞれの手法による渋滞のでき方を考察し, その後, 各エージェントが目的地に着くまでの時間を計測, 最短時間に比べてどれだけ時間がかかったかを求めた。結果として停まっている車の情報を用いることで渋滞の予測を行うことができ, システム全体の準最適化をはかることができた。

### 7.2 今後の課題

通信する情報の内容に更なる検討が必要である。交通制御システムでは速度による渋滞予測の手法も考えられる。また古い情報も新しい情報も一括に処理するのではなく, 情報の重みを時間で変化させることで柔軟な渋滞予測をすることも考えられる。

また交通制御システム以外のモデルにおいての実験の必要がある。今回の情報の場合, 4 種類の



情報のみでシステム全体の効率化を図ることができたが、他のモデルにおいてその程度の情報だけで効率化ができるのだろうか、また共通する必要な情報はあるのだろうかということを模索する必要があると思われる。

## 参考文献

- [1] 高野洋, 岩沼宏治, 鍋島英知: マルチエージェントシステムにおける情報伝達の効果: 伝達構造と情報破棄, エージェント合同シンポジウム (JAWS2002) 講演論文集, pp.487-494, 2002.
- [2] Keiki Takadama, "マルチエージェント学習-相互作用の謎に迫る-Multiagent Learning - Exploring Potentials Embedded in Interaction among Agents-", コロナ社, 2003
- [3] 石塚悠一, 岩沼宏治: 利己的なマルチエージェント群の分散協調における時間遅れの影響, 電子情報通信学会技術研究報告, AI2001-29, Vol.101, No.308, pp.25-32, 2001
- [4] 西成活裕, "クルマの渋滞 アリの渋滞 -渋滞学が教える「混雑の真相」-", 技術評論社, 2007