

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500133

研究課題名(和文) トップダウン制御可能なマルチエージェント協調・競合アルゴリズムの提案

研究課題名(英文) Proposal of top-down controllable multiagent coordination mechanism

研究代表者

栗原 聡 (KURIHARA SATOSHI)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：30397658

研究成果の概要(和文)：局所的な情報に基づいて自律的に動作する多数のエージェントにて構成されるマルチエージェントシステムを構築する際に、システムをボトムアップに構成する手法と、トップダウンに構築する手法とを融合させる方法の創出を目的とし、両者を競合させて動的平衡状態とする方法を提案した。そして、次世代知的交通制御システムを題材として、渋滞状況予測手法と信号機制御手法を提案し、両手法を効果的な融合を実現させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have proposed a new framework to integrate the bottom up and top down coordination of multiagent systems consisting of many autonomous agents having a local view. We have proposed the methodology in which both coordination types perform competition to make a dynamic equilibrium. We have evaluated the effectiveness of our proposal by applying this methodology to the systems of anticipating the traffic jam and controlling traffic lights of the new generation intelligent traffic control systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：知的エージェント、マルチエージェント、ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

次世代交通制御システムや電子商取引システム、ユビキタス情報通信システムなど、近年において、大規模複雑系システムの構築に向けた研究が盛んである。巨大なシステムをそのまま設計することは困難であり、通常、それらの構築に際しては、多数のサブモジュールがお互いに連携する構築形態が採用されることになる。よって、最大の課題は、個々のモジュールをいかに連携させるかという点に帰着される。

例えば、次世代交通制御システム構築について外観すると、まず、東京都の1km当りの渋滞損失額は435百万円/年、全国を合計すると、2914百万円/年もの損失である。これを解決するためには、渋滞をできる限り発生させない新しい知的な交通制御システムを構築する必要がある。現在もVICSなどのシステムが導入されつつあるが、集中制御的なシステムであり、時々刻々変化する交通状況に追従することが困難であり、また信号機システムも基本的に静的に制御されてお

り、現実の交通状況に対応した制御ができてはいない。新しい交通制御システムは、車や信号機などが自律的に情報を発信、互いに協調・競合することで渋滞の発生を防ぐ仕組みにて構築される必要がある。その際、車や信号機はそれぞれ自分の近隣の情報のみを持つことが想定され、それらが協調・競合することでボトムアップに交通システム全体が構成されることになるが、トップダウンにシステム全体を制御して、よりシステムを最適な状態に移行させたり、緊急車両の効率的なナビゲーションを行う必要もある。その場合、ボトムアップに構成されるシステムをトップダウンな方法にて効率的に制御すること、また効率性の高いシステムを構築することを念頭に置いた車や信号機の自律性を設計する必要がある。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、局所的な情報に基づいて自律的に動作する多数のエージェント(サブシステム)が、互いに協調してボトムアップに構成するシステムにおける、個々のエージェントの有用な設計法の創出を目指した。単にボトムアップにシステムを構築する方法だけでなく、ユーザが意図するシステムを効率的に構築できること、またユーザによるトップダウンなシステムの制御を可能とすること重点目標とした。

本研究は、次世代知的交通制御システムや、電子市場システム、またインターネットやユビキタス情報通信を基盤とする様々なアプリケーションを始めとする、次世代型の巨大かつ複雑なシステムを構築するために必須な主要基盤技術と位置づけることができる。

3. 研究の方法

(1) まず、フェロモンコミュニケーションモデルによる短期的渋滞予測システムの構築に取り組んだ。現在における渋滞予測システムである VICS などでは対応できない数分先の渋滞予測を目指し、分散制御型の短期的渋滞予測システムを提案した。これは各交差点に簡単なサーバを設置し、各サーバ上の道路エージェント同士が協調することで局所的な渋滞予測を行うものであり、これを実現するためにフェロモンコミュニケーションモデルを導入した。フェロモンコミュニケーションモデルは環境のすばやい変化にも柔軟かつ頑健に対応できるモデルとして様々な分野で応用されている。今回は各道路エージェントが自身の道路の渋滞度を表すフェロモンを近隣の道路エージェントとやり取りすることで効果的な渋滞予測を行う

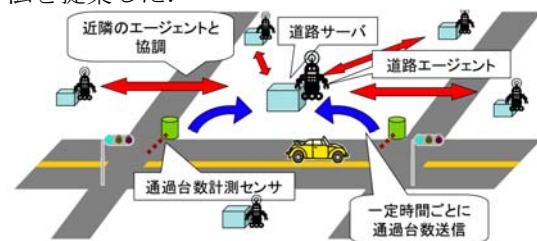
ことを試みた。

(2) 更に、複数の交通情報を効率的に利用する最適な交通情報提供手法の構築を行った。目的は予測ではなく、正確な交通情報を提供するシステムを構築することである。現在運用されている、VICS や Probe システムはそれぞれの持つ制約のため十分なエリアカバー率および精度を達成することは難しい。そこで、本研究では高精度・高エリアカバー率の交通情報提供システムの実現を目指し、フェロモンシステムや蓄積データベースなど複数の情報源を活用して情報未提供区間の補完を行うと共に、それらの各情報源の予測値に信頼度を設定することによって、各道路リンクが最適な情報源の選択を行うシステムを構築した。

(3) 最後に、交通システム制御において上記2つのテーマと同じく重要なシステムである信号機制御についての取り組みを行った。マルチエージェントモデルとフェロモンコミュニケーションモデル、そしてばねモデルを組み合わせた分散自律型の信号機制御法の提案を行った。具体的には、個々の信号機に自律性を与え、隣接信号機とローカルに協調することで、ボトムアップ型の制御を行うものである。まず、ばねモデルの導入により、動的に現示の比率(赤信号や青信号の比率)を変更することでの交通状況への即応方法を提案した。交通量をばねにかかる力として現示の比率を常に適正值に更新するというものである。そして、現在は手作業にて制御されている、幹線道路に対するグリーンウェーブ型の隣接信号機間の現示切り替えタイミング自動制御方法も提案した。法定速度にて走行する場合に、ある区間において赤信号にて停車することがないように隣接信号機を制御するものである。マルチエージェント協調モデルを利用することで、動的にグリーンウェーブを行うエージェント集合を自己組織化させる方法を提案した。

4. 研究成果

項目(1)に関して：最適化手法としても有名な、アリのフェロモンコミュニケーションモデルを利用する手法を提案した。



上図に我々が想定する道路環境を示す。各道

路の両端には車両の通過台数を計測するセンサが設置され、一定時間ごとの通過台数をその道路サーバのエージェントに送信する。各道路には簡易なサーバが設置され、車両数計測センサから送られる情報および近隣の道路サーバの情報を用いて現在の渋滞度の算出や渋滞予測を行うエージェントが割り当てられている。次に渋滞現象について考える。交通渋滞を考える上で重要な二つの流れがある。一つは交通量の流れであり、上流道路から下流道路へと車の進行方向と同一の向きに伝播する。もう一つは渋滞の流れであり、下流から上流へと伝播することが知られている。これは、渋滞とはある道路が交通のボトルネックとなり発生する先詰まりの状態であり、後方に新たに車が待ち行列を作ることによって伸びていくという渋滞の性質によるものである。そこで、本研究ではこれらを交通量フェロモンと渋滞拡散フェロモンとして扱い、さらに渋滞発生・解消に伴う渋滞度変化を表す蒸発率を考慮することにより、より高精度な渋滞予測を行うアルゴリズムを提案した。その結果、下表に示すように、提

	1分後	3分後	5分後
フェロモン予測値	0.98	0.94	0.86
持続予測方式	0.86	0.66	0.45

案手法の予測性能の高さを確認することができた。これは、提案手法であるフェロモン予測値と、従来手法である持続予測方式において、1分3分5分のそれぞれの時刻後の渋滞を予測し、実際の渋滞度合いをどれくらい予測出来たのかの数値を示したものであり、提案手法がいずれも高い数値となっている。

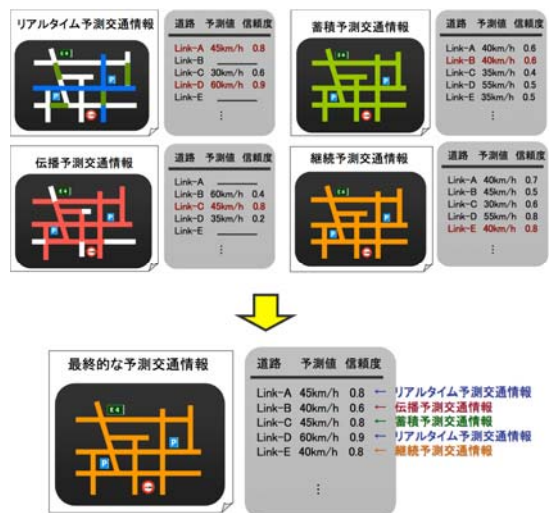
本研究において、まずはボトムアップ型情報処理の有用性を示すことが出来た。

項目（2）に関して：

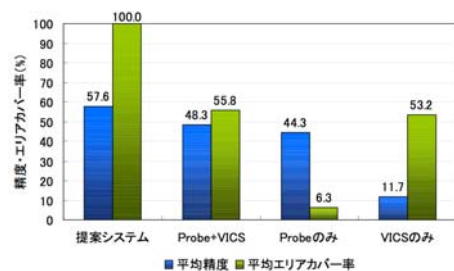
本研究では、項目（1）の基盤ともなる、より正確な渋滞情報を把握する課題に取り組んだ。現在においても渋滞を把握するための、車両感知器などの定点観測型の路上インフラが実用化されている。VICS、および通信機器を搭載した車両自身がセンシングデバイスとなり自身の走行情報を提供するProbeシステムなどであり、これらを主として交通情報が収集されている。しかし、VICSには導入・維持コストが多くかさむことによるエリアカバー率の低迷といった欠点が指摘されており、これに替わる新規に導入されつつあるProbeシステムではこのエリアカバー率の拡大が急務となっている。しかし、現状ではProbeの普及率はまだまだ極めて低いため、Probe・VICSを併用しても満足いくエリアカバー率が得られておらず、それに伴って得られる交通情報の精度も低くなってしまう。

これに対する解決策として、我々は項目（1）と同様のボトムアップに得られる情報と、トップダウン的に解析される情報を組み合わせる手法を提案した。まず、我々が構築したシステムでは、5分や15分などの一定時間間隔で全対象道路リンクについて解析を行い、予測交通情報を出力することを目指した。ここでの交通情報とは交差点同士を接続する道路の平均旅行速度であり、解析はこの道路単位で行う。一回の解析では、得られた入力情報や近隣道路の入力情報に加え、トップダウンに解析される統計データである蓄積データベース、そして直前の解析結果などから（1）リアルタイム予測交通情報、（2）蓄積予測交通情報、そして（3）継続予測交通情報の3種類の予測交通情報をそれぞれの道路ごとに生成する。

ここで問題となるのが、全く情報が得られていない道路に対していかに交通情報をリアルタイムに生成するかである。そこで、我々は、項目（1）にて利用したフェロモンシステムを用いて欠損データの補完を行った。その戦略は、情報が存在する各道路リンクで得られたリアルタイム予測情報を周囲の道路へ適切に伝播させることで伝播予測交通情報を生成させるというものである。以上、ボトムアップおよびトップダウン生成される各予測データに対して、各道路リンクにおいて最も信頼度の高いものをもって、その時点での予測値（出力する交通情報）とした（下図参照）。



その結果、下図に示すように従来手法に比



べ高い予測精度ならびに情報提供エリアカバー率を達成することができた。

以上、本研究においては、項目（1）にて有用性を示したボトムアップ型情報処理に対し、これを補完するトップダウン型情報処理を競合させることで両タイプの情報処理を有効に利用する方法を提案した。

項目（3）に関して：

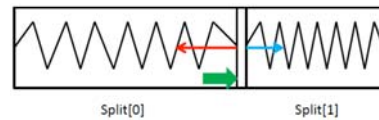
本項では、上記2項と異なり、交通制御におけるもう一つの重要な機能である信号機制御に取り組んだ。一般道路における渋滞の最大の原因は交差点での信号待ちであり、交差点の信号を交通量に応じていかに最適にコントロールするかが大きな課題である。

現在使われている信号機制御システムには、パターン制御方式と、中央管理型の制御方式の二つがある。パターン制御方式は、事前の交通調査に基づき、交通状況に対応する複数の制御パターンを予め設定し、パラメータを何組か用意して、時間帯によって切り替える方法である。この方法では、日中や夜間などの、ある程度予測できる交通状況には対応できるが、交通事故など、突発的に変化する交通状況には対応が難しい。中央管理型の制御方式は、個々の信号機が交通量を感知し、中央サーバが信号機の情報に最適な制御パラメータを計算し、それぞれの信号機に適応する方法である。この方法では、予期しない交通状況にも対応することができるが、中央サーバで全信号機の制御パラメータを計算するため、状況の変化に対して即応性が低くなるという問題がある。当然ながら、制御対処地域が広がると計算コストが増大するという問題もある。以上の点から、我々は、各信号機に自律性を与え、分散して制御をおこなう方式を採用した。

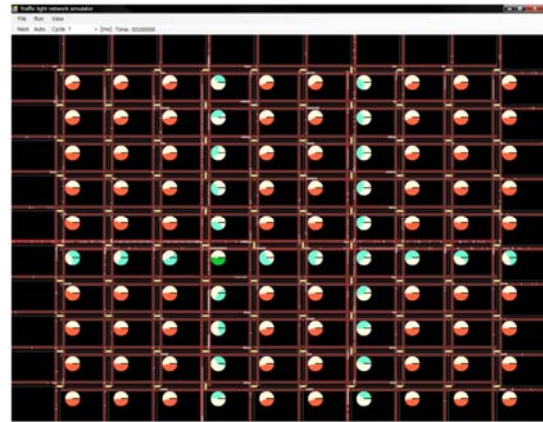
そして、信号機の制御においては、1 サイクルにおける青信号の割合であるスプリット値の制御と、近隣の交差点との、一周期の開始時間のずれの値であるオフセット値の制御が重要であり、本研究では両者に対して最適な制御方法の確立を目指した。

（3-1）スプリット値制御について

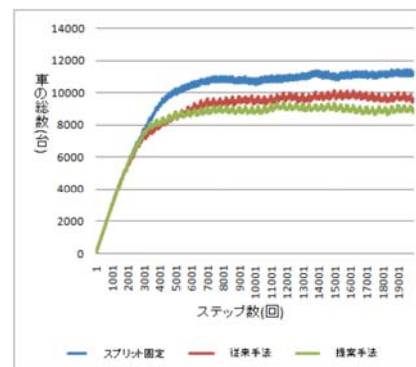
信号機制御においても、個々の交差点にエージェントを配置させ、局所的な情報のみを用いて自律的に制御パラメータを変化させる方法を提案した。ただし、本テーマにおいては、一つの交差点の信号機のスプリット値の比をバネモデルにてモデル化し、自身の交差点の東西方向の交通量と南北方向の交通量を比較し、交通量の差をばねのつり合い式に盛り込むことでスプリット値の調整を行う方法を提案した（右上図参照）。



そして、下図に示すシミュレータを実装して



の評価を行った。その結果、下図に示すよう



に、青線の提案手法においてより多くの車両を通過させることを確認することができた。

本研究の位置づけは、信号機制御における項目（1）と同様のボトムアップ型の情報処理の有用性を示したものである。

（3-2）オフセット値制御について

オフセット制御は通称「グリーンウェーブ型制御」とも呼ばれる。交通流の密度が高い道路において、隣接する信号機の青が開始される時間をお互いが調整することで、法定速度にて走行する場合に、その区間を赤信号に止まらずに走行できるようにする制御方法である。現在はどの区間をどのように連携させるかを経験的に手動にて決めており、動的に変化する渋滞状況に対応することができない。

そこで、信号機に搭載された各エージェントが、自身が管理する交差点の状況や、隣接するエージェントとの通信から得られる情報を用いて、互いに協調を行い、エージェントが自律的に制御パラメータを調整する手法の提案を行った。制御の中心となる起点エージェントと、起点エージェントに従って制御を行う従属エージェント、そして、他の

エージェントと協調を行わない独立エージェントの3種類のエージェントを考え、以下の手順にて協調動作を行う（概略を示す）。

行程 1. 道路ネットワーク中の、あるエージェントが起点エージェントとなる。エージェントが起点エージェントとなる条件は、管理する交差点の車流入総数がしきい値を超えている、あるいは自身が従属エージェントであるが、起点エージェントが管理する交差点の車流入総数を、自身が管理する交差点の車流入総数が超えていることである。

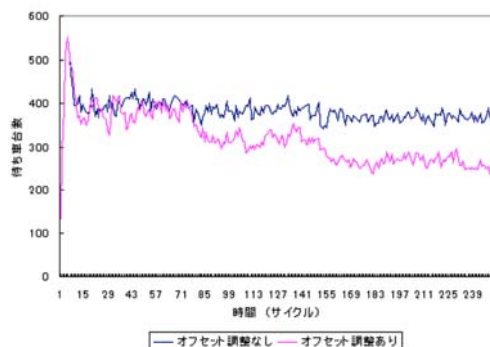
行程 2. 起点エージェントは、隣接交差点との間において、交通量またはしきい値を超えている場合、交差点の信号機を管理するエージェントに対しオフセット調整の提案を行う。

行程 3. 起点エージェントから提案を受け入れた交差点のエージェントは、その起点エージェントの従属エージェントとなり、オフセットの調整を行う。

行程 4. 従属エージェントとなった、交差点のエージェントは、隣接交差点との間の道路の交通量がしきい値を超えている場合、隣接する交差点の信号機を管理するエージェントに対しオフセット調整の提案を伝達する。

行程 5. 行程 3. と同様に、提案を受け入れたエージェントは従属エージェントとなる。このように提案の伝達を繰り返し、グリーンウェーブを形成する。

そして、前項（3-1）と同じシミュレーション環境にて評価を行ったところ、下図に示



すように、ピンク線にある提案手法において比較対象の従来手法よりも信号待ちとなる車両台数を減少させることに成功した。

なお、本テーマにおいては、グリーンウェーブに関わっていない信号機同士は項目（3-1）で提案したスプリット値制御を行う。つまり、（3-2）においては、スプリット制

御という処理と、オフセット制御という処理が同時に実行されることになり、ここで重要な点は、オフセット制御に関わる交差点においては、それらのスプリット値は皆同じ値であるということである。スプリット制御においてはスプリット値の変更が目的であり、一方、オフセット制御においてはグリーンウェーブを形成するためにスプリット値を変更したくはない。つまり両手法が常に競合しつつ系全体としての最適性を実現する動的平衡状態が形成されるということである。

以上本研究をまとめると、本研究にて得られた知見は以下のようなになる。

- （1） 従来において集中制御型にて構築されていたシステムにおいてボトムアップ型の制御が動的な環境への適用性において有用であることを示した。
- （2） しかし、統計データなど、集中制御型の有用性も存在することから、両者を競合させる手法を提案した。
- （3） 最後に、異なる制御方法の競合のさせ方において、動的平衡状態を形成させる方法の有用性を示した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① 白井富士, 矢野純史, 西村茂樹, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, 栗原 聡, マルチエージェントモデルによる信号機オフセット制御法の提案, *人工知能学会論文誌*, Vol. 26, No. 2, 2011, pp. 324-329. (査読有)
- ② 玉置 洋, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, 栗原 聡, 複数の交通情報を効率的に利用する最適な交通情報提供手法の構築, *人工知能学会論文誌*, Vol. 25, No. 3, 2010, pp. 394-399. (査読有)
- ③ Koichi Moriyama, Mitsuhiro Matsumoto, Ken-ichi Fukui, Satoshi Kurihara, and Masayuki Numao, Reinforcement Learning on a Futures Market Simulator, *Journal of Universal Computer Science*, Vol. 14, No. 7, 2008, pp. 1136-1153. (査読有)

〔学会発表〕（計9件）

- ① Mitsuhiro Matsumoto, Shinichi Okanao, Tetsuo Morita, Masayuki Numao, and Satoshi Kurihara, Desktop Searches based on Context Visualization using

- File Operation Logs, Proc. of The Eleventh *IASTED* International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA2011), 2011年2月15日, pp.156-161, インズブルック (オーストリア).
- ② 白井富士, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, 栗原 聡, マルチエージェントシステムを用いた信号機オフセット制御方法の構築, *人工知能学会全国大会* (第24回), 2010年6月10日, 長崎.
- ③ 小中裕次郎, 矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, 栗原 聡, バネモデルによる信号機スプリット値分散制御法の構築, *人工知能学会全国大会* (第24回), 2010年6月10日, 長崎.
- ④ Satoshi Kurihara, Hiroshi Tamaki, Masayuki Numao, Kouji Kagawa, Jyunji Yano, and Tetsuo Morita, Traffic Congestion Forecasting based on Pheromone Communication Model for Intelligent Transport Systems, Proc. of *IEEE* Congress on Evolutionary Computation (CEC2009), 2009年5月20日, pp. 2879-2884, トロンハイム (ノルウェー).
- ⑤ Satoshi Kurihara, Hiroshi Tamaki, Masayuki Numao, Kouji Kagawa, Jyunji Yano, and Tetsuo Morita, Traffic Congestion Forecasting based on Ant Model for Intelligent Transport Systems, The Third International Workshop on Emergent Intelligence in Networked Agents (WEIN09), 2009年5月10日, pp. 42-47, ブタペスト (ハンガリー).
- ⑥ Hiroshi Tamaki, Ken-ichi Fukui, Masayuki Numao, and Satoshi Kurihara, Pheromone Approach to the Adaptive Discovery of Sensor-Network Topology, Proc. of 2008 *IEEE/WIC/ACM* International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT'08), 2008年12月10日, pp. 41-47, シドニー (オーストラリア).
- ⑦ 巖 康平, 森山甲一, 沼尾正行, 栗原 聡, 多ゴールが非同期に発生する環境下における実時間リアクティブプランニング法の提案と評価, *人工知能学会全国大会* (第23回), 2009年6月17日, 香川県高松市.
- ⑧ 栗原 聡, 巖康平, 森山甲一, 沼尾正行, ユビキタス環境下における非同期多目的達成のための実時間リアクティブプランニング法の提案, *電子情報通信学会 2009年総合大会*, 2009年3月20日, 愛媛県松山市.
- ⑨ 栗原 聡, 玉置 洋, 佐藤和宏, 長岡 諒,

矢野純史, 香川浩司, 森田哲郎, 沼尾正行, マルチエージェントによる次世代交通制御システムの構築, *日本ソフトウェア科学会 ネットワークが創発する知能研究会 第4回ワークショップ JWAIN08*, 2008年8月30日, 東京工業大学.

〔図書〕 (計2件)

- ① Satoshi Kurihara, Hiroshi Tamaki, Ken-ichi Fukui, and Masayuki Numao, Ant Colony Optimization: Methods and Applications (Ed. Avi Ostfeld), InTech: Adaptive Sensor-Network Topology Estimating Algorithm based on the Ant Colony Optimization, 2011, pp. 101-112.
- ② 栗原 聡, センシングネットワークと人間行動マイニング, *人工知能学会誌*, Vol.23. No.5, オーム社, 2009, pp. 611-616.

〔その他〕

ホームページ等

http://www.ai.sanken.osaka-u.ac.jp/~kurihara/pukiwiki.php?research_page

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗原 聡 (KURIHARA SATOSHI)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号: 30397658

(2) 研究分担者

菅原俊治 (SUGAWARA TOSHIHARU)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 70396133

(平成20年4月1日～平成21年3月31日)