

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

The Short-Term Traffic Prediction System using Pheromone Communication Model

玉置 洋*¹ 長岡 諒*¹ 安場 直史*¹ 矢野 純史*² 香川 浩司*² 森田 哲郎*²
 Hiroshi Tamaki Ryo Nagaoka Naohumi Yasuba Junji Yano Kouji Kagawa Tetsuo Morita
 沼尾 正行*³ 栗原 聡*³
 Masayuki Numao Satoshi Kurihara

*¹大阪大学大学院 情報科学研究科 情報数理学専攻

Department of Information and Physical Sciences, Graduate School of Informartion Science and Technology, Osaka University

*²住友電気工業株式会社 情報通信研究所

Information and Communications Labs, Sumitomo Electric Industries, Ltd

*³大阪大学 産業科学研究所 知能システム科学研究部門

Department of Knowledge Systems, The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

To realize the more comfortable transportation infrastructure, the efficient prediction of traffic congestion is indispensable. In this paper, we propose a traffic-jam prediction system that is based on the pheromone communication model. This system predicts traffic congestion in the immediate future by local coordination, so the system doesn't need a center-server or a large amount of traffic log data. The pheromone model we applied is a kind of multi-agent model, which is inspired by social insects' behaviors. In our system, each road becomes local server and predicts own prospective traffic density by getting traffic information of neighbor local server as a pheromone. The verification experiment we conducted showed that our system is superior to traditional prediction system, especially in the point of adaptability.

1. 序論

近年の道路交通システムの発達はめざましいものであり、現在では人と道路と車両とをネットワークでつなぐ新しい交通システムとしてITS (Intelligent Transport System) の研究が大きく注目を集めている。ITS が取り組むべき問題は多岐にわたるが、その中でも渋滞問題は重要な位置を占めている [1]。例えば、東京での1kmあたりの渋滞による損失額は年間で約4億円にも達するなど、その解決は急を要するものとなっている。また、渋滞問題解決のために必要となる数ある技術の中でも、渋滞予測は的確なカーナビゲーションなどのためにも不可欠となる要素である。渋滞予測についての研究は多数報告されているが、それらは大まかに次のように分類できる。

- 長期的渋滞予測
過去の交通データを統計的に解析し、渋滞の発生するパターンを発見する方法 [4]。
- 短期的渋滞予測
リアルタイムの情報をもとに、数分～数十分先の比較的短期間後の渋滞を予測する手法 [5]。

現在主に用いられているのは前者であるが、この手法は道路構造に起因するような定期的な渋滞に対しては有効だが膨大な過去データを必要とする上、事故などの突発的イベントへの対応やGW・お盆等に見られる不定期な渋滞の予測に弱いといった難点がある。また、これを補う後者の手法は長期的渋滞

予測が苦手とする短時間先の予測を得意とするが、リアルタイム情報をVICS等の集中制御型センターサーバから得ているため、通信や計算に要するタイムラグによるボトルネックや、サーバ障害に大きく影響を受けてしまうといった弱点がある。

そこで、本論文ではこれらの課題を解決するための分散制御型の短期的渋滞予測システムを提案する。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、センターサーバを必要としないシステムである。我々はこの分散処理型のマルチエージェントシステムを実現するため、近年盛んに研究されているフェロモンコミュニケーションモデルに着目した。

フェロモンコミュニケーションモデルは自然界の蟻や蜂といった社会性昆虫の行動を基に考案されたものであり、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 [3]。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。

また、同様にフェロモンを用いた分散制御型の渋滞予測には [2] などがある。ここではフェロモンの持つ蒸発・拡散という影響により局所的かつ短時間先の渋滞予測が効果的になされたことが実証されているが、これは各車両が統一されたプローブカーシステムを実装しているという仮定の下で論じられている。現在、プローブカーシステムは各自動車メーカーが同時に開発を行っているものであり、近い将来に全車両が統一されたシステムを搭載しているとは考えにくい。そこで我々は、車両ではなく各道路サーバをエージェントとする、より現実的なシステムの構築を行った。

以下、第2章にて提案する渋滞予測アルゴリズムについて述べ、第3章にてシステムの検証実験の結果を報告し、第4章にて結論を述べる。

連絡先: 玉置洋, 大阪大学, 産業科学研究所沼尾研究室, 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1, Tel:06-6879-8426
 Fax:06-6879-8428, E-mail:tamaki@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

2. 渋滞予測アルゴリズム

2.1 アルゴリズムの概要

今回我々が想定する道路環境は以下のようなものとする。

- ある交差点から次の交差点までの片方向の道路を最小単位としての道路と定義する。よって、一つの道路内には複数車線が存在することはあるが分岐は無く、通常の両方向通行の道路は向きが逆となる二つの道路が存在すると考える。
- 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ものとする。
- 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。

以上の環境を用いることより、センターサーバやプローブカーのシステムを必要としない渋滞予測を行う(図1)。

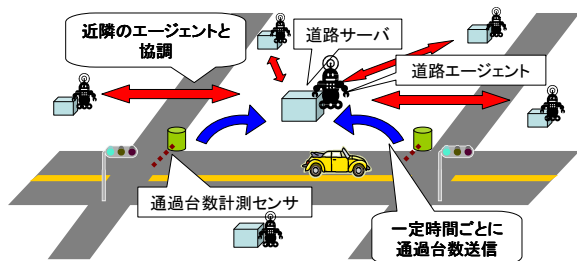


図1: 想定する道路環境

ここで、交通渋滞を考える上で重要な二つの流れについて述べる(図2)。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。本研究ではこれらを交通量フェロモン $\Delta\tau$ 、渋滞拡散フェロモン q 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 e を考慮することにより、より高精度な渋滞予測を行うことを試みた。

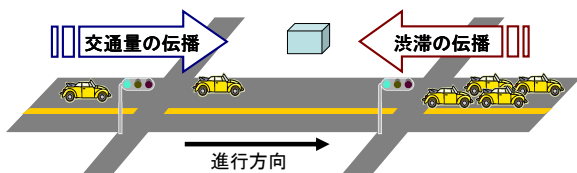


図2: 渋滞に関する二つの流れ

渋滞予測は各道路エージェントごとに一定時間間隔(タイムスパン)で図3のように行われる。 $\tau(p, t, x)$, $\Delta\tau(p, t, x)$ は、それぞれ道路 p , 時刻 t における x 分後の予測交通密度, 予測交通変化量を表す。渋滞予測は1分後, 2分後, ...と逐次的に計算され、本研究では5分後までの予測を行った。また、渋滞予測を行う頻度を示すタイムスパンについては、現在のVICSの情報提供間隔(5分程度)よりも短い1分間隔とした。

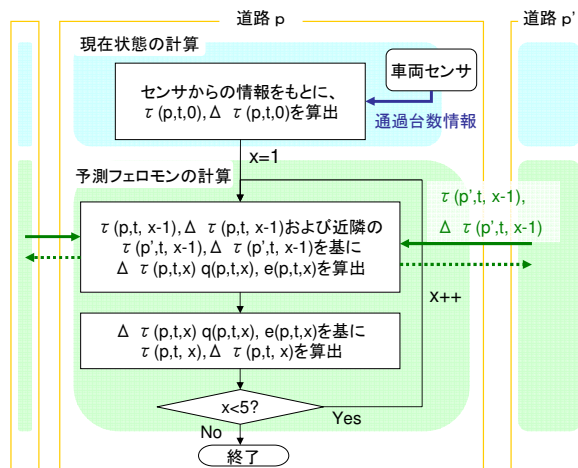


図3: アルゴリズムの流れ

2.2 現在状態の計算

各道路の車両センサは一定時間ごとの流入量 $I(p, t)$, 流出量 $O(p, t)$ を計測し、道路エージェントに送信する。 $I(p, t)$, $O(p, t)$ はタイムスパン t において道路 p に何台の車が入り出たかを表す。情報を受け取った道路エージェントは、まず次式を用いて現在状態での交通密度を計算する。

$$N(p, t) = N(p, t - 1) + I(p, t) - O(p, t) \quad (1)$$

$$d(p, t) = \frac{N(p, t) \times l_{car}}{l_p \times L_p} \quad (2)$$

ここで、 $N(p, t)$, $d(p, t)$ はタイムスパン t での車台数, 交通密度であり、 l_{car} , l_p , L_p はそれぞれ車一台あたりの長さ^{*1}, 道路長, 車線数を表す。

2.3 予測フェロモンの計算

次に、各道路エージェントは渋滞予測として短時間後の予測交通密度を表す予測フェロモン τ を逐次計算によって求めていく。逐次計算の初期値としては $\tau(p, t, 0) = d(p, t)$, $\Delta\tau(p, t, 0) = I(p, t) - O(p, t)$ を用いる。図3に示すように、自身の $\tau(p, t, x - 1)$, $\Delta\tau(p, t, x - 1)$ および近隣道路の $\tau(p', t, x - 1)$, $\Delta\tau(p', t, x - 1)$ を基に交通量フェロモン $\Delta\tau(p, t, x)$, 渋滞拡散フェロモン $q(p, t, x)$, 蒸発率 $e(p, t, x)$ を計算し、それらをもとに $\tau(p, t, x)$ を算出する。

(a) 交通量フェロモンの計算

まず、 x 分後の交通変化量の予測値として交通量フェロモン $\Delta\tau(p, t, x)$ を計算する。交通変化量は時間と共に上流から下流へ伝わるものであり、どれくらいの速度で伝わるのが問題となる。ここで、この伝播速度を交通量伝播速度 $S(p, t, x)$ として次のように定義する。

$$S(p, t, x) = s_p \times bs_p \times jf(p, t, x) \quad (3)$$

ここで s_p は1タイムスパン内でどれだけ進めるかを表す道路速度であり、道路 p の最高速度から計算される。また、 bs_p はこ

*1 正確には車両長 + 静止時の車間距離

の道路の進行方向の信号機の青時間 split^{*2}であり、 $jf(p, t, x)$ は渋滞に起因する伝播速度の低下割合を示す渋滞要因である。

$$jf(p, t, x) = \begin{cases} 1.0 & (\tau(p, t, x-1) < \alpha) \\ 1.0 - \tau(p, t, x-1) & (\tau(p, t, x-1) \geq \alpha) \end{cases} \quad (4)$$

α は渋滞要因が効果を表す閾値であり、今回は $\alpha = 0.5$ を用いた。交通量伝播速度 $S(p, t, x)$ は1タイムスパン内でどれだけだけの距離を交通量が伝播するかを示す値なので、道路長 l_p との比が重要となる。

$$\Delta\tau(p, t, x) = \sum_{p' \subset N_b} f(p, p') \times \Delta\tau'(p', p, t, x) \quad (5)$$

$$\Delta\tau'(p, t, x) = \begin{cases} \Delta\tau(p, t, x-1) & (S(p, t, x) > l_p) \\ \frac{S(p, t, x)}{l_p} \times \Delta\tau(p, t, x-1) & (S(p, t, x) \leq l_p) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 N_b は道路 p の上流の道路集合であり、 $f(p, p')$ は p と p' の関係によって変化するパラメータである。本研究では、 $p' = p$ が直進の場合 $f(p, p') = 0.7$ 、左折・右折の場合はそれぞれ 0.2, 0.1 とした。

(b) 渋滞拡散フェロモンの計算

渋滞の伝播は、基本的に前方の道路が詰まってしまうことにより発生する。すなわち、自身の道路の渋滞度と前方の道路の渋滞度の差によって渋滞拡散フェロモンを考えるものとする。

$$q(p, t, x) = \sum_{p'' \subset N_f} g(p, p'') \times q'(p'', p, t, x) \quad (7)$$

$$q'(p'', p, t, x) = \{\tau(p'', t, x-1) - \tau(p, t, x-1)\} \quad (8)$$

N_f は道路 p の下流の道路集合であり、 $g(p, p'')$ は $f(p, p')$ と同様に道路の関係によって変化するパラメータである。今回は、 $g(p, p'') = f(p, p')$ とした。

(c) 蒸発率の計算

この蒸発率は、交通量や渋滞の伝播による渋滞度の増減ではなく、その道路で起こる渋滞の発生・解消を扱うものである。すなわち、交通変化量 $\Delta\tau(p, t, 0) = I(p, t) - O(p, t)$ を見て、通常よりも $\Delta\tau$ が大きければ渋滞が発生しており、逆に $\Delta\tau$ が小さければ渋滞が解消に向かっていているものとする。ここで、その道路 p の通常の変動量を把握するため、道路 p の交通変化量の分散 v_p を過去一日分のデータから求めておく。

$$e(p, t, x) = \begin{cases} \beta_1 & (v(p, t, 0) > x \times v_p) \\ 1.0 & (-x \times v_p < v(p, t, 0) < x \times v_p) \\ \beta_2 & (v(p, t, 0) < -x \times v_p) \end{cases} \quad (9)$$

上式では、観測された交通変化量の通常との差分が大きいほど、渋滞の発生・解消が大規模なものになるとして考えている。また、 β_1, β_2 はそれぞれ蒸発の度合いを表すパラメータであり、今回は $\beta_1 = 1.1, \beta_2 = 0.9$ を用いた。

(d) 予測フェロモンの計算

(a) ~ (c) で求めた $\Delta\tau, q, e$ を基に、 x 分後の予測フェロモンは次式のように計算される。

$$\tau(p, t, x) = e(p, t, x) \times \tau(p, t, x-1) + \Delta\tau(p, t, x) + q(p, t, x) \quad (10)$$

以上の (a) ~ (d) を繰り返すことにより、各道路エージェントは逐次的に短時間先の渋滞予測を行う。

3. 検証実験

3.1 実験概要

ここでは、提案した予測モデルの有効性を確かめるために行った検証実験について述べる。実験には簡単な道路交通環境を実現できる交通シミュレータを用い、下記の二つの渋滞状況が発生させたときに提案モデルがどれほど正確に短時間先(1,3,5分後)の渋滞を予測できているかを検証した。

1. 交通量の変化により発生・解消する渋滞
2. 突発的な事故により発生・解消する渋滞

効果指標には実測値と予測値の相関係数を採用し、実験には図4に示すようなシミュレーション環境を用いた。この交通シミュレータは 5×5 の一車線格子状道路および各交差点に設置された信号機によって構成されており、各交差点間の距離は約400mとなっている。

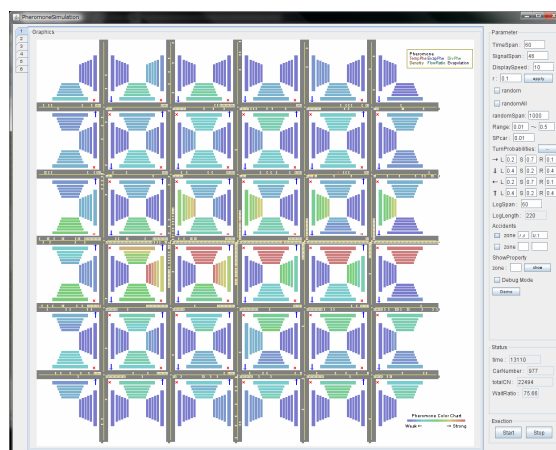


図4: 交通シミュレータ

今回の実験では $1 \text{ timestep} = 1 \text{ 秒}$ 、1タイムスパン = 60 timestep として、各道路エージェントが1分ごとに現在の交通密度および1~5分後の渋滞予測を計算するように設定した。

また、比較手法として統計的手法をベースとした短期予測手法の一種である持続予測方式 [6] による1,3,5分後の予測も併せて行った。これは、現在の渋滞状況が短期先の将来においても持続するという仮説のもとに予測を行うものである。現状のVICSの情報更新間隔が5分程度のため、今回採用した5分持続予測方はVICS対応カーナビゲーションシステムが計算する予測精度とほぼ同程度とみなすことができる。

3.2 交通量の変化による渋滞

まずはじめに、交通量が変化することによって起因する渋滞への予測がどれほど正しくできているかを検証した。渋滞学におい

*2 信号サイクルの中の青信号表示時間の占める割合

表 1: 交通量変化による渋滞予測値と実績値の相関係数

| | 1 分後 | 3 分後 | 5 分後 |
|----------|------|------|------|
| フェロモン予測値 | 0.98 | 0.94 | 0.91 |
| 持続予測方式 | 0.95 | 0.88 | 0.79 |

ては、道路ごとの交通許容量を超えた車両が流入すると渋滞が発生し、流入量はその許容量を下回ることによって渋滞は解消するとされており、この発生・解消の速度は次に述べる突発的な事故に起因するものと比べると比較的ゆっくりと行われることが知られている。ここでは、2 時間分のシミュレーションの中で車両発生確率を変化させることで特定道路の渋滞を発生・解消させ、実績値と 1,3,5 分前に算出されたフェロモン予測値および持続予測値の比較を行った。

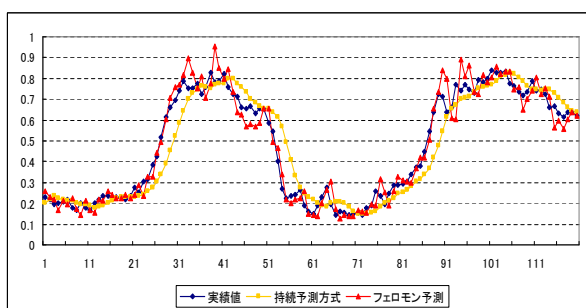


図 5: 交通量変化による渋滞予測値の比較 (1 分後予測)

実験の結果、フェロモン予測による予測値は持続予測方式よりも常に高い精度で予測を行っていることが確かめられた (表 1)。また、図 5 よりフェロモンモデルによる予測では渋滞度の変化をよりすばやく予測できていることがわかる。

3.3 突発的な事故による渋滞

次に、突発的な事故が原因となって引き起こされる渋滞への予測の性能を検証した。この渋滞は交通量変化に起因するものとは異なり、事故などで道路の交通許容量自体が低下することによって発生するものである。突発的な事故等による許容量の低下は急激に起こるため、渋滞の発生・伝播の速度は速い。この実験では、特定道路の交通許容量を一時的に減少・回復させることで渋滞を発生・解消させ、予測値の比較を行った。

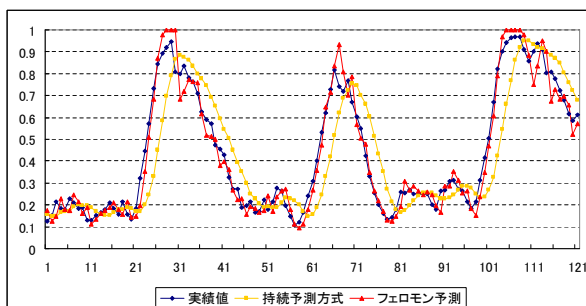


図 6: 突発的な事故による渋滞予測値の比較 (1 分後予測)

表 2 および図 6 より、この実験においてもフェロモンモデルによる予測は従来手法に比べ優位性を示した。特に渋滞度の変動が激しい突発的な事故による渋滞では、持続予測方式では

表 2: 突発的な事故による渋滞予測値と実績値の相関係数

| | 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 |

予測先時間が延びるにつれて精度が急激に落ちてしまったが、フェロモンモデルにおいては高い予測精度を維持している点にも注目したい。

4. 結論

4.1 まとめ

本論文では、フェロモンモデルを用いた分散制御型の短期的渋滞予測システムについて紹介した。第 3 章で述べたように、提案システムにおいては従来手法よりも短いスパンで短時間後の渋滞を予測できており、また膨大な過去データやセンターサーバを必要としないシステムとなっている。特に従来のシステムが苦手としている突発的な事故等による変動の激しい渋滞に対する予測に関しては、従来モデルと比較して大きく精度を高めることができ、フェロモンモデルの有する適応性、柔軟性を十分に活かすことができたといえる。提案システムでは長期的な予測には弱い面もあるため、従来の長期的予測システムとうまく組み合わせることで互いの弱点を補い合う万能的な予測システムの実現に向けても努力したい。

4.2 今後の課題

現在では、各交差点ごとの直進・右左折確率を表す $f(p, p')$ および $g(p, p')$ はすべての道路に一律で与えてある。しかし、実際には道路の規模や接続先の道路が幹線道路か生活道路かなどによってこの確率は様々であり、個別の道路に適した確率を設定することが必要となる。よって、各道路が自身の道路から流出する車の進行方向確率を自動的に学習するシステムの導入は有用であると考えられる。また、実際の道路では大型トラックやバス・タクシーといった車両の種類、坂の勾配や路上駐車などの渋滞要因が複雑に存在する。これらの効果も加味したモデルを考えることによって、より現実に応じた予測システムを構築していきたい。

参考文献

- [1] 西成活裕, "渋滞学", 新潮社, 2006
- [2] Yasushi Ando, Yoshiaki Fukazawa, Osamu Masutani, Hiroto Iwasaki, Shinichi Honiden, "Performance of Pheromone Model for Predicting Traffic Congestion", the International Conference on AAMAS2006, 2006
- [3] Marco Dorigo and Gianni Di Caro. "The ant colony optimization meta-heuristic. New ideas in optimization, Mcgraw", pp.11-32, 1999.
- [4] E. Chung, "Classification of traffic pattern", Proceedings of the 11th World Congress on ITS, 2003
- [5] 大場義和, 上野秀樹, 割田博, 森田倬之, 桑原雅夫, "高速道路における突発事象発生時の旅行時間予測アルゴリズムの開発", 第 5 回 ITS シンポジウム, pp.291-296, 2006
- [6] 金澤明浩, 杵渕哲也, 毛利仁土, 小川智章, 市河研一, 荒川賢一, "決定木を利用した交通渋滞予測手法に関する考察", 情処学 ITS 研報, vol.16, no.21, pp.141-148, 2004