

自律車両に基づく動的車両割当戦略の導入評価

The Impact of Introducing Dynamic Assignment Strategy Based on Autonomy Vehicles

高橋 淳*¹ 金森 亮*² 伊藤 孝行*³
Jun TAKAHASHI Ryo KANAMORI Takayuki ITO*^{1,3}名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻 *²名古屋工業大学
School of Techno-Business Administration, Nagoya Institute of Technology Nagoya Institute of Technology

In this paper, we propose a dynamic route-exchanging mechanism based on anticipatory stigmergy and demonstrate its efficiency. Basically, each vehicle submits its intention about its near-future position (60 seconds). Then the traffic management center calculates the congestion information at near-future for each link (road). This is anticipatory stigmergy. If there is an over-congested link after 60 seconds, the vehicles assumed to come to those links are allowed to negotiate with each other so that some of them will change their near-future routes. In this mechanism, vehicles automatically negotiate based on their rational judgment on the trade-off between travel time needed for passing the assigned route and the "concession coefficient" that represents how a driver can concede the way. The experimental results demonstrate that our new route-exchanging mechanism performs well for the efficiency of traffic flow when the saturation level of probe vehicles is greater than 70%.

1. はじめに

本稿では、次世代交通システムのための自動交渉に基づく経路割当機構を提案し、マルチエージェントシミュレーションによりその有効性を検証する。自動車が解決すべき問題を解決する方法として、交通情報提供、及びロードプライシングなど、ITSによる次世代交通システムが注目されている。

本稿では、交通システムにおいて、者車間で渋滞や混雑解消を目的として間接的に共有する交通情報を Stigmergy と呼ぶ。既存の、通行ゲートによる実世界での古典的な通行ゲートによって、「長期の過去の通過所用時間」の実績データを蓄積し、統計に処理したものを Long-Term Stigmergy と呼ぶ。また、実世界では、実用化段階であるプローブカーなど動的な交通状況において、「最近の過去の通過所要時間」の実績データを利用したものを Short-Term Stigmergy としている。

本研究では過去に、予見的な交通情報 (Anticipatory Stigmergy) を共有することで、効率的な交通マネージメントの可能性を示した [Takahashi 13]。見込み交通量を基に経路探索を行う予見的経路情報の共有方法を提案した。特に、所要時間の実績データに基づく経路と代替経路の2つの経路選択肢を持つ車両 (ドライバー) に対して、交通混雑・渋滞を回避する経路割当戦略を導入することで効率的な交通マネージメントが実現できることを示した。

一方、予見的な交通情報を共有する場合、ドライバーはお互いの意思決定の情報が分からないため、経路選択についての振動現象が観察されている。つまり、車はお互いの意思決定に関する情報が分からず、多くの車が混雑がない予想される経路 X を選択する。さらに、 X が混雑すると分かると、多くの車が異なる経路 Y を選び、その結果今度は経路 Y が混雑してしまう。以上のような、人間のグループの予想に基づく振る舞いの振動現象は、El Farol Bar Problem, マイノリティゲーム, 混雑ゲームなどで研究されている。

上のような振る舞いの振動現象を解決するためにいくつかの基礎的な研究が行われている。Klein et al. [Klein 04] は、情報

遅延によって、緊急時のリソースが効率的に利用できず、振動がおこってしまう問題を、マイノリティゲームと関連づけている。そして、リソース利用の振動を緩める為に、情報をあえて与えないという戦略の効果を示している。本稿が対象とする交通システムにおいても、情報を与えない戦略は考えられるが、ドライバー間での不公平感が問題である。

本稿では、経路を再割当てするために“車両間の経路変更交渉”を提案する。ここでは、ドライバーの経路間の所要時間差に対する合理的判断に基づいて交渉を行う。評価実験において、代替経路を用いた車両割当戦略及び、経路割当変更交渉の有効性を示し、プローブカーの普及率が変化した場合の有効性を検証する。

2. 自律型車両による動的経路割当手法

2.1 動的経路割当手法

動的経路割当手法は、図1に示されているように、過去の実績値において最短経路、及び Anticipatory Stigmergy を用いた代替経路に車両を割り当てるものであり、混雑ゲームの考え方を組み込んだものである。

混雑ゲームは、施設の利用者が増加するにつれて、負のコストが増大するモデルである。交通マネージメントにおいて、各車両は最も短い時間でたどり着きたいと考える為、リンク (施設) を利用する車両が増加し、負のコスト (所要時間) が増大する。そこで、経路情報提供では、車両を適切に割当てることがある。

2.2 経路割当交渉

本稿では、図2に示されるような、基本的に車両は提供された経路情報に従うが、最短経路を選択したい車両が情報提供された経路に対して、変更依頼できる仕組みを考える。具体的には、実績データに基づく経路の利用を希望する車両が迂回路に割当てられた場合に経路の変更交渉を行うものである。

経路変更交渉モデルとして Logit モデルを導入する。Logit モデルはミクロ経済学の効用理論に基づく離散選択モデルの1つであり、交通行動分析や交通計画の研究分野での適用が多い。

本稿では、車両が経路所要時間差と譲歩定数を考慮して、代替経路への変更依頼に対して承諾するか否かを選択する車両の

連絡先: 金森 亮, 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学, kanamori.ryo@nitech.ac.jp

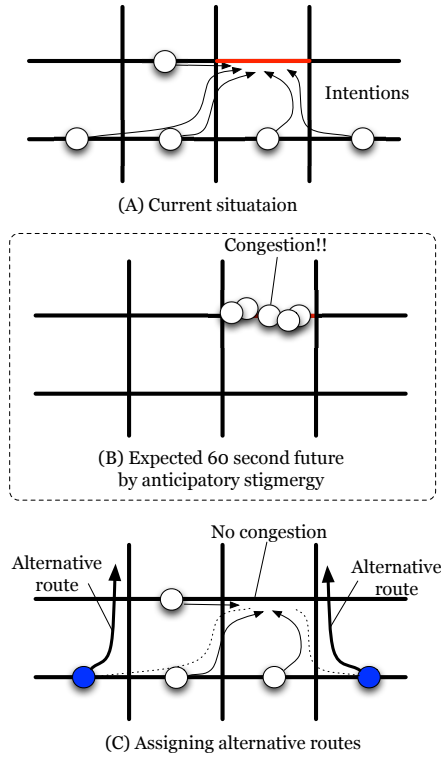


図 1: 動的経路割当

判断行動の表現として Logit モデルを適用する。

代替経路に割当られた車両は実績データに基づく経路を進んだ場合に比べて大きな時間的損失を被る場合、経路割当の依頼を行う。代替経路に割当てられた車両の実績データに基づく経路 *usual* の選択確率 P_{usual} は以下の式 (1) の様に表現できる。

$$P_{usual} = \frac{\exp(-\beta_0 c_{usual}^{rs})}{\exp(-\beta_0 c_{usual}^{rs}) + \exp(-\beta_0 c_{ant}^{rs})} \quad (1)$$

ここで、 β_0 は経路間の予測所要時間差に対するパラメータ、 c_{usual}^{rs} は実績データに基づく経路の予測所要時間、 c_{ant}^{rs} は代替経路の予測所要時間とする。

全車両が最短経路を選択すると渋滞が発生してしまうので、代替経路を選んだ場合の損失を考慮し、交渉を受け入れるか判断する。経路変更依頼を受けた車両は経路間の所要時間差及び、譲歩係数を考慮した式 (2) に基づく代替経路 *ant* の選択確率 P_{ant} に基づいて、経路変更依頼を承認するかを判断する。ここで、経路を変更することで被る時間的損失が小さく、依頼を受け入れると合意した場合、経路割当が交換される。

$$P_{ant} = \frac{\exp(-\beta_0 c_{ant}^{rs} + p)}{\exp(-\beta_0 c_{usual}^{rs}) + \exp(-\beta_0 c_{ant}^{rs} + p)} \quad (2)$$

ここで、 p は譲歩係数とし、1 秒と設定した。

2.3 経路情報提供手法

【Case 1 : Past Stigmergy】

Case 1 の特徴を以下に示す。

- 通過実績値を蓄積し、時間帯別通過所要時間を統計に処理 (Long-Term Stigmergy)
- 動的な交通状況下のリンク平均通過所要時間を利用 (Short-Term Stigmergy)

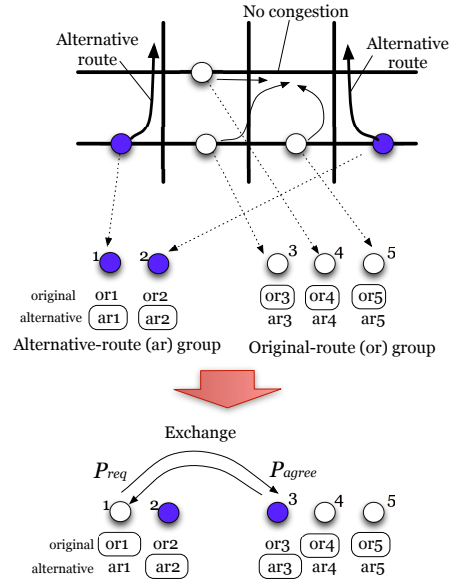


図 2: 経路割当変更交渉

- Long-Term Stigmergy と Short-Term Stigmergy に重みづけを行い、効果的利用

GPS 等を装備した車両であるプローブカーの時刻別の車両の位置情報から、各リンクの通過所要時間を算出することができる。このプローブカーによるリンク通過所要時間の蓄積データを Long-Term Stigmergy として考える。各リンクの通過所要時間は交通状況に応じて変動するため、本稿では、蓄積データの平均値 (ave_t) と標準偏差 (sd) の和をリンク評価値 (v_t) と設定する。なお、蓄積データの更新間隔は 24 時間 (1 日) とする。

一方、より動的な交通状況下での情報提供を想定し、Short-Term Stigmergy を最寄りの固定インフラによって限られた範囲内で、共有できると想定し、リンク通過所要時間の平均値のみをリンク評価値とする。

【Case 2 : Anticipatory Stigmergy】

Case 2 の特徴を以下に示す。

- Case 1 を用い、Anticipatory Stigmergy を収集し、共有
- 推定交通量から渋滞発生箇所を推計し、回避経路探索
- 予想混雑リンクを通過予定の車両を、プローブカーの普及率に応じて回避経路に割当

Anticipatory Stigmergy による経路探索手順は以下である。

- 固定インフラから提供される Case 1 に基づく、経路情報に従い 60 秒後の存在 (到着) リンクの位置情報を固定インフラに送信し、共有する
- 共有された見込み交通量からリンク通過所要時間をリンクパフォーマンス関数である式 (3) にて推計する。ただし、非集中型マネジメント下において、Anticipatory Stigmergy を得ることができないリンクは自由走行時間を用いる。そして、プローブカーの普及率を評価する為に、60 秒後の見込み交通量が装備率によって変化する。つまり、プローブカーの普及率が低い場合、見込みより多くの車両が存在する可能性が高いため、見込交通量が増加する。

$$v_a = \begin{cases} t_0(l) \left(1 + \alpha \left(\frac{vol(l)}{\gamma \times Cap(l)} \right)^\beta \right), & l \in IA \\ t_0(l), & l \notin IA \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 v_a は推定リンク所要時間 (リンク評価値)、 $t_0(l)$ は自由走行時間、 Sat はプローブカーの普及率、 $Vol(l)$ は 60 秒後のリンクの見込み交通量、 $Cap(l)$ はリンクの交通容量、 α, β はパラメータ $\alpha = 0.48, \beta = 2.82$ 、 γ は交通容量補正パラメータ ($\gamma = 0.4$ と設定) とする。

- (c). リンク評価値 (v_a) に基づき、(所要時間) 最短経路探索を行い、60 秒後の推計された交通状況下における最短経路情報を取得する。

本稿では、プローブカーより発信される 60 秒後のリンク交通量が閾値を超え、渋滞が発生した場合、該当リンクに対して、リンクの交通容量に割当比率を乗算した車両数を上限としてランダムに代替経路に割当る。

ただし、本稿では、プローブカーの普及率を考慮して、割当比率を変動させる。具体的には、プローブカーの普及率が低い場合は、Anticipatory Stigmergy よりも多くの車両が存在する可能性が高い。そこで、式 (4) で得られた台数を代替経路に割当る。

$$\frac{Vol(l)}{Sat} - \gamma \times Cap(l) \quad (4)$$

【Case 3 : 経路変更交渉モデル】

Case 3 の特徴を以下に示す。

- 代替経路に割当られた車両が Case 1 による経路に割当られた車両と割当変更の交渉
- 交渉依頼確率は、経路間の所要時間差によって変化
- 交渉合意確率は、経路間の所要時間差、及び譲歩係数によって変化

渋滞が予想されたリンクにおいて、下記の流れに沿って車両の経路変更の交渉が行われる。

- 該当するリンクを通過予定の車両をランダムに割当る。ここで、代替経路に割当てられた車両を車両 AS、Case 1 の経路に割当られた車両を車両 P とする。
- 車両 AS は経路間の予測所要時間差から求める式 (1) に基づいて、車両 P に対して依頼を出すか判断する。
- 経路変更依頼を受けた車両 P は経路間の所要時間差及び、譲歩係数を考慮した式 (2) に基づいて、経路変更依頼を承認するかを判断する。
- 承認された場合は、車両 P への交渉成功リストに登録。
- 交渉成功リストの中で、車両 AS の予測所要時間を最も削減する車両は Case 1 に割当られ、経路変更依頼を承認した車両 P は代替経路に割当られる。

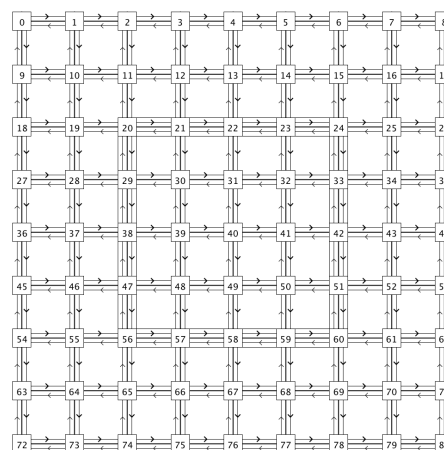


図 3: network

3. 実験設定

本稿では、個々の車両の走行挙動や他との相互関係を簡単に再現できるセルラオートマタに基づいて自動車交通流シミュレーションを構築する。具体的な車両の挙動規則はルール 184 と同様に設定する。

評価実験で用いる道路ネットワークは図 3 の通り、ノード数：81 個、上下別リンク数：288 本のグリッド・ネットワークである。リンク長は一律 200m とし、車線数は中央環状部^{*1}は 2 車線、その他は 1 車線とする。また、各リンクの規制速度は 1 車線区間：10 ~ 25km/h、2 車線区間：20 ~ 30km/h でランダムに設定しており、セル数は式 (1) に従い算出される。なお、本稿で適用するセルラオートマタに基づく交通流シミュレータでは、今回は 1 タイムステップを 1 秒とし、所要時間等を算出している。経路選択の多様性と混雑・渋滞の発生を考慮し、本稿の OD 交通量を 1000 台設定する。^{*2}

また、本実験において、リアルタイムの情報を各車両が受信できる範囲を設定しており、範囲は車両が現在向かっているノードから 2 リンク先までである。ここで、リアルタイムデータとは直近数分間のリンク通過所要時間 (Short-Term Stigmergy) 及び、数分後の収集されたリンク交通量である Anticipatory Stigmergy を指す。また、車両が所属しているノードは車両が通過しているリンクの進行方向側のノードのことである。

4. 評価

Case1 ~ Case3 の経路情報収集・提供手法による自動車交通流の効率性、割当戦略の必要性和有用性について、以下の点について考察する。

- 総所要時間のケース間比較
- 渋滞損失時間のケース間比較
- プローブカーの普及率に対する総所要時間の比較

今回の比較分析では、500 日の出力結果のうち最後の 100 回分の平均を用いている。後の章で感度分析を行う、長期 Stigmergy

*1 中央環状部は 20 21 22 23 24, 20 29 38 47 56, 24 33 42 51 60, 56 57 58 59 60.

*2 O-D 交通量はそれぞれ 0 80, 2 78, 5 74, 6 74, 8 72, 9 71, 13 66, 14 66, 15 65, 及び 16 63 に 100 台を設定した。

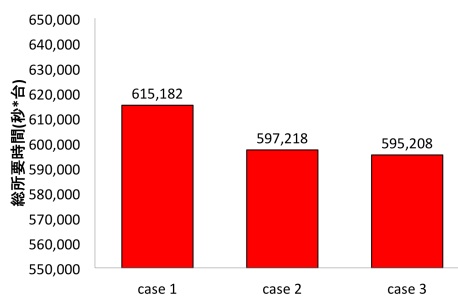


図 4: 総所要時間のケース間比較

の重み ω を 0.6, Anticipatory Stigmergy に基づく予見的経路情報への車両割当比率を 50%とし, プローブカーの普及率を 100%とする。

まず, 自動車交通流の効率性の代表的な指標として総所要時間があり, Case 1, Case 2, 及び Case 3 をの結果を整理したものが図 4 である。Case 1 の総所要時間が 615,182(秒*台) に対して, Case 2 の総所要時間が 597,218(秒*台) であり効率的であるので, 代替経路を用いた経路割当が有効であることが確認された。そして, Case 1 と Case 2 の間には, 5%の統計的有意差が確認された。また, Case 3 の総所要時間は 595,208(秒*台) であり, Case 2 と比べ, 効率的であり, 経路割当変更交渉が有効であることが確認された。ただし, 統計的有意差を確認することはできなかった。以上のことから, 替経路は有効であり, 経路割当変更交渉が総所要時間において更に有効的に働く。

次に, 経路割当変更交渉導入に関する分析として, 通過所要時間から自由走行時間を引いた渋滞損失時間を考察する。渋滞損失時間を削減することは心理的な負荷軽減効果が期待され, 交通事故の削減効果も期待され, 重要な指標の 1 つとなる。評価実験の結果, 1000 台のうち 582 台の車両が Case 2 と比べて Case 3 にした場合の渋滞損失時間が削減していた。従って, 経路割当変戦略において, 経路割当変更交渉は有効である。

今までは, プローブカーの普及率を 100%として, 検証してきたが, 最後に, プローブカーの普及率別に総所要時間を検証する。図 5 に示されているように, プローブカーの普及率が 70%以上の場合, 代替経路を利用した Case 2 及び Case 3 が効率的になっていることが確認できた。Anticipatory Stigmergy が普及率に応じて変化するため, 動的な車両割当戦略が, 普及率が 100%でない状態においても有効であることが確認できた。普及率が 90%以上では, 5%の統計的有意差が確認されている。普及率が 60%以下の場合, Case 1 の方がより効果的であった。普及率が低い場合, 代替経路に割当られた車両が通過する道路に, 固定インフラが把握できない車両(自由走行時間による経路を選択)が存在した為, 迂回路を選択したにも関わらず, 渋滞に巻き込まれていることがあげられる。

5. 関連研究

Chen et al.[Chen 10] は交通マネジメントとして Agent Technology を適用した事例を包括的にレビューしており, 動的経路情報提供は重要な研究分野であることを示している。経路情報提供に関する既存研究は数多いが, その多くは過去の所要時間の実績データの利用を対象としている。Adler et al.[Adler 05] は, 複数の指標をエージェント毎に設定し, 交通マネージャーとの中間者に対して交渉を行う。ただし, 基本的

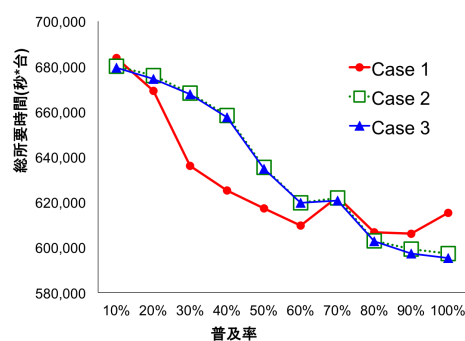


図 5: プローブカーの普及率に対する総所要時間の変化

には過去の情報を利用し, 探索している。

6. まとめと今後の課題

本稿では, プローブカーの普及率に応じた, 60 秒後の予測位置情報 (Anticipatory Stigmergy) による代替経路を活用した経路情報提供手法, 及び自律型プローブカーによる所要時間差に応じた経路割当交渉を提案した。評価実験の結果, 代替経路を活用した車両割当は総所要時間において有効である。また, 経路割当変更交渉はランダムによる割当よりも総所要時間, 及び渋滞損失時間において削減効果があることを確認した。そして, プローブカーの普及率が 70%以上になると, 車両割当戦略が効率的に働くことを確認した。今後の課題として, Anticipatory Stigmergy による代替経路を活用した経路情報提供手法を精緻化された交通シミュレータで実際の大規模なネットワークによって有効性を確認することが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は, 内閣府の先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発プログラム)により助成を受けています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [Adler 05] Adler, J. L., Satapathy, G., Manikonda, V., Bowles, B., and Blue, V. J.: A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 39, No. 4, pp. 297 – 318 (2005)
- [Chen 10] Chen, B. and Cheng, H. H.: A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2010)
- [Klein 04] Klein, M., Metzler, R., and Bar-Yam, Y.: Handling Emergent Resource Use Oscillations, in Neogita, M., Howlett, R., and Jain, L. eds., *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, Vol. 3215, pp. 809–816, Springer Berlin Heidelberg (2004)
- [Takahashi 13] Takahashi, J., Kanamori, R., and Ito, T.: Stability Evaluation of Route Assignment Strategy by a Foresight-Route under a Decentralized Processing Environment, in *WI/IAT2013* (2013)