

都市内交通システムにおける 部分的情報共有型カーナビゲーションシステムの効用に関する考察

相良 博喜^{*}, 谷本 潤^{**}

^{*} 九州大学大学院博士課程・修士(工)日本学術振興会特別研究員

^{**} 九州大学大学院総合理工学研究院・教授・工博

従来のカーナビゲーションシステムの普及による交通システムの高度情報化は社会全体の混雑緩和にはつながらないとの指摘がある。VICS等の情報は画一的で時間遅れがある為、ある経路へ車両が一極集中する現象を引き起こす可能性があるからである。そこで、本研究は、カーナビゲーションシステムの経路選択戦略によって引き起こされる渋滞のメカニズムについて考察し、車両個々の効率を向上させ、かつ、システム全体の効率を向上させる経路選択戦略を考案した。本論文では、一つの方法として、経路情報を部分的に共有することにより経路選択の一極集中を回避する手法を提案している。

A Study on Social Diffusive Impacts of a Novel Car-Navigation-System Shearing Individual Information in Urban Traffic Systems.

Hiroki Sagara^{*}, Jun Tanimoto^{**}

^{*} Graduate student, Kyushu University, IGSES, M.Eng.

^{**} Professor, Kyushu University, IGSES, Dr.Eng.

As one of the authors' trials to establish a modeling for *Human-Environment-Social Systems*, a multi-agent simulation model to deal with urban traffic congestion problem involving automobiles embedded with several strategies of Car Navigation Systems (CNS) were presented. Shortest Time Route with Route Information Sharing strategy (ST-RIS) that is assumed one of the solutions for a novel CNS based on bilateral information amid automobile agents. A question which strategy is most appropriate to solve urban traffic congestion can be seen a social dilemma, since the social holistic utility is opposing to each agent's individual utility. The presented model shows that this social dilemma is observed as a typical Chicken type dilemma, or a typical Minority Game, where an agent adopted with a minority strategy can earn more utility than other strategies. Consequently, the model have pointed out that ST-pRIS, which is a further advanced strategy from ST-RIS, only partial information shared among agents, has a moderate potential to be diffused in a society from the Evolutionary Game Theory point of view.

1. 緒言

自動車による円滑な都市内交通をめざしたシステムに道路交通情報通信システム VICS を用いた混雑緩和があげられている。しかし、このカーナビゲーションシステムは、画一的な渋滞情報を元に経路を探索するため、同じような経路を多数のカーナビゲーションシステムが選択してしまい、混雑が発生してしまう^{1),2),3),4)}。このように画一的な情報を元に多数のエージェントが行動した場合、予せぬ混雑が発生するという現象は、遊園地などの巨大集客施設における誘導モデルなどでも観察されている⁵⁾。

社会的集団における、有限の資源をめぐる複数のエージェント間の競合に関しては El farol bar 問題⁶⁾や Minority game⁷⁾をはじめとする一般資源割り当て問題として様々な領域で議論されている。

カーナビゲーションシステムの高度情報化による情報の高度共有がもたらす行動の集中化に焦点を当てた研究として山下らの情報共有型カーナビゲーションシステムがある¹⁾、山下らは個人効用だけでなく、群ユーザー支援という概念を取り入れたシステム(後述の ST-RIS 戦略)を導入することにより、社会全体効用の低下を抑制しうることを示した。しかし、このシステムにより、社会全体の効用を高めることはできるが、採用した個々の車両の効用がその他の車両の効用より劣ってしまうため、社会的浸透性、すなわち普及のインセンティブの点では疑問が残る。Savittら⁸⁾や赤石ら⁹⁾によると、情報共有する集団のサイズのコントロールや、情報の誤認を組

み込むことにより、適応的な戦略を構築することが可能であることを示唆している。これらをヒントに先述の問題、すなわち社会効用を高めつつ、既往のカーナビゲーションシステムより優れたシステム(すなわち経路選択戦略)は構築し得ないのであるか?

本研究は、カーナビゲーションシステムの経路選択戦略によって引き起こされる渋滞のメカニズムについて考察し、車両個々の効率を向上させ、かつ、システム全体の効率を向上させる経路選択戦略を考案することを目的としている。

2. シミュレーションモデル

本研究における交通流動シミュレーションでは、スケールの異なるミクロ的な経路選択とマクロ的な現象である交通渋滞とを同時に扱う。時間および空間はマルチエージェントに基づく離散型モデルで扱う。

2.1. 街路モデル

交通網は道路を表すリンクと交差点を表すノードで構成されている。リンクはいくつかのメッシュに区切られており、一つ一つの区画をブロックと呼ぶ。ノードには信号があり、各車両はある一定の確率で赤信号にあたり、一定時間停止する。

2.2. 車両エージェント

ブロックごとに定義される交通流特性に基づいて、ある時刻の車両密度から各車両エージェントの速度を求めて、単位時間ステップ間に走行する距離だけリンク下流側から順次移動させていく。また、更新するリンクの順序はランダムとす

る．本研究では，OV モデル¹²⁾の最適速度関数を速度式として用いる．

2.3.車両エージェントのナビゲーション戦略

各車両エージェントは経路選択戦略を有する．本研究では以下の戦略を想定した．

(1)最短距離経路戦略 Shortest Distance (SD) 戦略

この戦略を採るドライバーは，目的地までの経路でもっとも経路長が短くなる経路を選ぶ．プログラム上では経路間の重み l_{ij} にノード間の距離をとり，ダイクストラアルゴリズムにより最短距離経路を算出する．なお，各経路が等距離の場合は，距離が等しい経路からランダムで最短経路を選択する．

(2)混雑経路記憶型最短距離経路戦略 Shortest Distance and Congestion Memorize (SD-CM) 戦略

この戦略をとるドライバーは記憶サイズ M のメモリを持つ．最初のトリップの間，通過したリンクの中で車両密度が上位 M 個のリンクとそのリンクの車両密度を記憶する．次のトリップでは，記憶したリンクを通らないという条件で最短距離となる経路を選択し，記憶したそれぞれのリンクの車両密度にある一定の忘却率 ($0 < \dots < 1$) を掛ける．そのトリップの間に通過したリンクと記憶したリンクの中で車両密度が上位 M 個のリンクを記憶し，これを繰り返す．

(3)最短時間経路戦略 Shortest Time (ST) 戦略

この戦略をとるドライバーは，各経路の渋滞情報を元に目的地に到達するまでの時間が最短になるような経路を選択する．そのためにはプログラム上では，経路間の重み l_{ij} に予想所要時間をもって，A*アルゴリズムにより最短時間経路を算出する．リンク l に対する予想所要時間は次のようにして算出する．

$$ETT_l = \sum_{i \in B_l} \frac{L}{V_i} \quad (4)$$

ここで， ETT_l ：リンク l を通過する予想所要時間[s]， L ：ブロック長さ[km]， B_l ：リンク l にあるのブロックである．

SD 戦略と異なり ST 戦略では，各車両エージェントは渋滞情報の変化に合わせて，最短時間経路の再計算を行う．再計算を行う頻度を GS [step] (混雑情報の更新を同程度の頻度で行わなければ，経路再計算の意味が無いので，混雑情報の更新頻度も GS とする) とする．

ST 戦略は現在の混雑情報を元にして経路選択を行うことができるため，通常の場合 SD に比べ短時間で目的地に到達できる．現実社会で言えば，VICS を搭載したカーナビゲーションにより経路決定するドライバーを模擬しているといえる．

(4)経路共有型最短時間経路戦略 Shortest Time and Route Information Sharing (ST-RIS) 戦略

この戦略をとるドライバーは各経路の渋滞情報と合わせて，ST-RIS 戦略をとるドライバーの通過予定経路を集積した情報をを用いて経路を選択する．

具体的には，次の手順で経路を選択する．まず，ST-RIS 戦

略をとるドライバーは ST 戦略の場合と同様に混雑情報を元に目的地までの最短時間経路を算出する．それらの情報を集積し，各リンクにおける通過確信度 PA_l を算出する．まず，出発点から最初に経路選択されたリンクには $PA_0=1$ を割り当て，最短時間経路で想定される通過予定経路上のノードにおいては PA_{i-1} をそのノードにつながっているリンク数 r_i でわって $PA_i=PA_{i-1}/r_i$ を割り当てる．概念的には， PA_i は現在位置から目的に向かって割り引いたノード通過確率を意味する．こうして車両エージェントごとに各リンクに割り当てられた通過確信度をそれぞれのリンクごとに通過車両エージェントについて合計した値を TPA_l とする．これを基に，以下により定義する予想所要時間 ETT_l^* [s] を経路間の重み l_{ij} にとって，A*アルゴリズムにより最短時間経路を算出する．

$$N_l' = \frac{TPA_l}{L \cdot b_l} \quad (5)$$

$$N_l^* = \min(rs \cdot N_l + (1-rs) \cdot N_l', N_{jam}) \quad (6)$$

$$ETT_l^* = \sum_{i \in l} \frac{BL}{V_i^*} \quad (7)$$

ここで， V_i^* ： N_l^* を用いて(3)式より求めた速度， b_l ：リンク l のブロック数[Block]である．

(6)式の N_l^* は，現在の渋滞の影響(得られている渋滞情報から与えられるブロック i の車両台数 N_i [1/s])，ST-RIS 戦略を共有する車両エージェントにより引き起こされる将来の混雑の影響(リンク始点を通過する ST-RIS 戦略エージェント数をリンク l 全体に均等分布していると仮定して TPA_l を処理した結果求まる平均台数 N_l' [1/s]) の重み平均 (rs がその按分比) した予想車両台数[1/s]を意味する．ただし， TPA_l の定義上，ある車両エージェントについて PA_l のトリップ和を取ると 1 以上になるので， N_l^* 算出に当たっては，車両台数上限が N_{jam} を超えない条件を入れる必要がある． $(1-rs) \cdot rs$ は ST-RIS 戦略による将来影響(ST-RIS の現在状況を $PA_0=1$ により含んでいる) と現在混雑の影響の比を意味する．

(5)経路部分共有型最短時間経路戦略 ST and partial RIS (ST-pRIS) 戦略

情報画一化はカーナビゲーションシステムを介して付与する情報にばらつきを与えることで回避できる．そこで，この戦略では同じ ST-RIS 戦略を取る車両エージェントの情報共有の範囲を制限することで，各個エージェントの持つ情報にばらつきを与える．具体的には，自身が現在保持している予定経路上にいる先行車両の内，前方 N_f 台の ST-pRIS 車両の将来経路情報 (TPA_l) だけを収集し，ST-RIS と同様に予想混雑度を計量する．この戦略は，進行方向後方車両エージェントの情報は無駄情報である可能性が高く(追い越しが無いので)，一方，前方車両の情報はこれから自身が通る予定経路に関するものであり有用である可能性が高いことを前提としている．ただし，現在混雑情報と情報共有車両エージェントの将来混雑情報との按分比 rs は 0.8 とし， $N_f=50$ [台]とした．

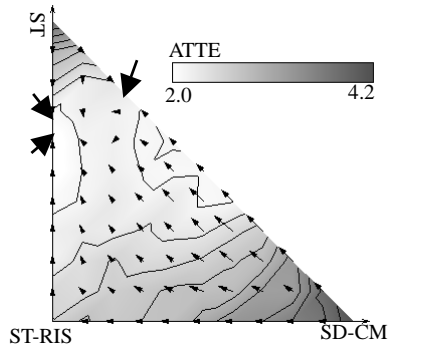


図 1 SD-CM, ST, ST-RIS の戦略組での ATTE と戦略シェアの変化ベクトル (case1)

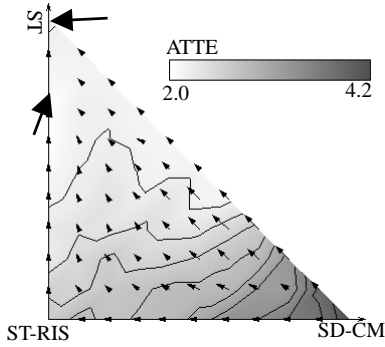


図 2 SD-CM, ST, ST-RIS の戦略組での ATTE と戦略シェアの変化ベクトル (case2)

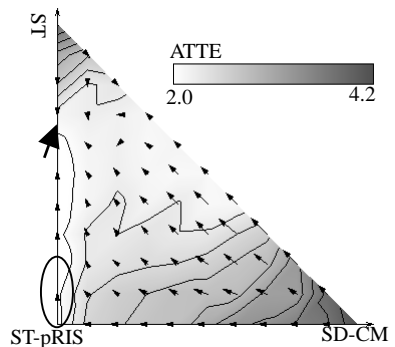


図 3 SD-CM, ST, ST-pRIS の戦略組での ATTE と戦略シェアの変化ベクトル (case3)

2.2. 各戦略の効率評価

異なる移動距離の車両エージェントの移動効率を評価するために、(8)式で定義される旅行時間効率を考える。

$$TTE = \frac{TT \times V_{ideal}}{Sd} - 1 \quad (8)$$

ここで、 TTE ：旅行時間効率、 TT ：初期位置から目的地間の移動（トリップ）所要時間[s]、 Sd ：トリップ最短距離[km]とする。 TTE は各車両エージェントのトリップ毎に定義され、この値をさらに同じ戦略をとる全てのエージェントで平均した値を $ATTE_k$ (k ：全戦略)と定義し、各戦略の評価パラメータとする。これが0に近い程、理想的な経路を通ったことになる。

2.3. シミュレーションの流れ

シミュレーションの大まかな流れは次の通りである。

まず、戦略毎の初期台数比に応じて、車両エージェントを発生させる。車両エージェントはエピソード当初、各ノードにランダムに配置され、目的地もランダムに決定される。各エージェントは、出発地・目的地決定 移動 目的地到着(1トリップ)を1エピソードが終わるまで繰り返す。トリップ

毎に次出発地、目的地はランダムに定める。また、 GS ステップ毎に各戦略が経路選択に用いる情報を更新する。1エピソード終了した時点で、各戦略の $ATTE$ を算出する。解析は5試行アンサンブルの評価とする。

社会システムの時間推移において、各戦略のシェアがどう変容していくか(シェア増減の推移)を考えるために、進化ゲーム理論で一般的なレプリケータ・ダイナミクス¹³⁾を導入する。レプリケータ・ダイナミクスとは、“その時点の期待利得に比して高利得(高適合度)の戦略ほど次世代で殖え、その増減変化率は平均利得との差分に比例する”というアイデアを微分方程式に表したもので本モデルに当てはめると、戦略シェアの時間変化は(9)式となる。

$$S_{t_k}|_{new} = S_{t_k} + \frac{ATTE - ATTE_k}{ATTE} * S_{t_k} \quad (9)$$

ただし、 S_{t_k} ：現在の戦略 k の戦略比、 $S_{t_k}|_{new}$ ：次世代における戦略 k の戦略比、 \overline{ATTE} ：社会平均 $ATTE$ 。(9)式により求められる S_{t_k} は後述のベクトル図のデータを供する。

3. 数値実験条件

数値実験では、現在の社会に新型カーナビが導入される状況を想定し、3つの戦略シェアを10%ずつ変化させ、そのシェアにおける各戦略の増減と \overline{ATTE} (社会全体の効用)を観る。まず、SD-CM(カーナビ非搭載)とST(カーナビ搭載)とST-RISの組み合わせで、 GS を変化(すなわち最短経路の再計算と渋滞情報の更新頻度を変えた)させた実験を行った(Case1, Case2)。Case2ではCase1($GS=500$)に対して経路再計算(情報更新)を高頻度($GS=100$)の設定とする。次に、Case3ではST-RISに変わってST-pRISを導入した場合、社会のシェア構成にどのような変化が見られるかを検討した($GS=500$)。

4. 結果

4.1. Case1：SD-CM, ST, ST-RIS の組み合わせ

図 1

にSD, STとST-RISの対戦組み合わせにおける戦略分布の変化ベクトルと社会全体効用を重ね併せた結果を示す。図1より、戦略比は最終的には前述したSTとST-RISの内部均衡点(図中)に吸引されることがわかる。Case2, Case3でも同様に、第3の戦略が混入すると、SD-CMは淘汰されている。社会効用最大点(図中)と内部均衡点(図中)はほぼ一致している。

4.2. Case2：SD-CM, ST, ST-RIS の組み合わせで最短経路の再計算と渋滞情報の更新頻度が頻繁な場合

結果を図2に示す。更新頻度がより頻繁になると、最終的な均衡点(図中)では、ST-RISに対するST戦略の占める割合がCase1より大きくなる。また、Case1と比較すると社会効用最大点(図中)と内部均衡点(図中)の乖離が大きくなる(ある種の社会ジレンマが深基になる状況)。

4.3. Case3 SD-CM, ST, ST-pRIS の組み合わせ

対戦結果を図3に示す。第3の戦略であるST-pRISが混入するとSD-CMが淘汰される状況は前二者と同様である。また、STとST-pRISの内部均衡点(最終的内部均衡点、図中)は、case1とほぼ同じ点にある。しかし、前二者と異なり、ST-pRISが多数派となる領域(図中)において、ATTEがcase1のST-RISと比べて低い値になっている。つまり、最終的なシェアの推移は第3の戦略であるST-pRISがSTに対して優勢な状況に落ち着き、かつ前二者の第3戦略の場合よりも社会全体の効用は向上している。

5. 考察

Case1の結果より、現在の社会、“現在普及途上にあるカーナビゲーションシステム(ST)は存在するが、情報共有型のカーナビゲーションシステム(ST-RIS)は存在しない状況(SD-CM戦略とST戦略のみの社会)”では、ST戦略のシェアはある均衡点までしか伸長できないことがわかる。これは、ST戦略がある程度多くなると、ST戦略は画一的な渋滞情報を元に経路を探索するため、同じような経路を多数のカーナビゲーションシステムが選択してしまい、混雑が発生する状況が再現されていることを示している。

しかし、これにST-RIS戦略が混入すると、様相は一変し、SD-CM戦略は最終的には淘汰されてしまう。つまり、将来、VICS搭載型カーナビゲーションシステムのシェアの伸長が停滞したとしても、情報共有型のカーナビゲーションシステム(ST-RIS)を導入することにより、カーナビゲーションシステム全体としては、VICS搭載車両のシェアを伸ばすことができると思われる。

しかし、図1の社会全体効用に注目し、SD-CM戦略とST戦略の内部均衡点(図1の)における社会全体効用と最終的な内部均衡点(図1の)におけるそれを比較すると、やや後者が大であるが大きな差異はない。このことから、情報共有型カーナビゲーションシステム導入による社会全体としてみた便益は必ずしも著しく増大するわけではないことを示唆している。

また、Case2の結果より、渋滞情報の更新頻度が頻繁になると、VICS搭載型カーナビゲーションシステム(ST)が比較優勢な戦略になることがわかる。

ST-pRISの導入は、ST戦略より高い効用をあげることではできないが、多数派戦略となったとき、ST-RISより社会全体効用が高くなっている。これは、部分情報の共有が、個別情報に基づく経路選択を促し、予定経路上の近傍先行車両に関する情報のみを参照するため、情報の画一性による経路選択の一極集中をさけることができたためと考えられる。

また、この戦略は現実社会に対するアプリケーションとしても実現可能性がある。

ST-RISは情報を一極集中的に管理するため、大量の経路情報と渋滞情報を重ね合わせて予測渋滞情報を計算する巨大なコンピュータリソースが必要であると考えられる。これによ

る情報処理時間がVICS情報のフレッシュネス(更新頻度による情報の質)に重畳された時間遅れを系に惹起するため、さらなる情報画一化をもたらし、効率的な経路探索が出来なくなる可能性がある。

ST-pRISの場合、ローカルな情報のみを要するから渋滞情報の処理は各車両個々のカーナビゲーション機器に任せたい個別分散処理が可能となる。

6. 結論

カーナビゲーションシステムの経路選択戦略によって引き起こされる渋滞のメカニズムについて考察し、車両個々および社会全体の効用を向上させる経路選択戦略を提示した。

参考文献

- 1) 山下倫央, 和泉潔, 車谷浩一, “交通流における経路情報の共有に基づいた経路選択の効果の検証”, 知能と複雑系研究会, pp.71-76, (2004,3)
- 2) H.S.Mahmassani, R.Jayakrishnan, “System Performance and User Response under Real-Time Information in a Congested Traffic Corridor”, Transportation Research 25A(5) (1991) 293-307
- 3) T.Yoshii, H.Akahane, M.Kuwahara, “Impacts of the Accuracy of Traffic Information in Dynamic Route Guidance Systems”, The 3rd Annual World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, CD-ROM, 1996
- 4) 三好博昭, “ITSの外部性と最適普及水準 - VICSの社会的便益と最適普及水準の計測”, ITEC Research Paper Series 04-11(2004,12)
- 5) H.Kawamura, K.Kurumatani, A.Ohuchi, "Modeling of Theme Park Problem with Multiagent for Mass User Support", In Working Note of The International Joint Conference of Artificial Intelligence 2003, Workshop on Multiagent for Mass User Support I-7 (2003)
- 6) W.B.Arthur, “Inductive reasoning and bounded rationality”, American Economic Association Papers Proceedings, vol.84, no.2, pp.406-411 (1994)
- 7) Challet, D, Zhang, Y. C., “Emergence of Cooperation and Organization in an Evolutionary Game”, Physica A, vol.246, pp.407-418 (1997)
- 8) Savit, R. Manuca, R. and Riolo, R.: “Adaptive Competition, Market Efficiency, and Phase Transitions”, Physical Review Letter, Vol.82, No.10, pp.2203-2206 (1999)
- 9) Akaishi, J. and Arita, T.: “Misperception, Communication and Diversity”, Proceedings of Artificial Life VIII, pp. 350-357 (2002)
- 10) I.Tanahashi, H.Kitaoka, M.Baba, H.Mori, S.Terada, E.Teramoto, "NETSTREAM, a Traffic Simulator for Large-scale Road Networks", R & D Review of Toyota CRDL, 37(2)47-53 (2003)
- 11) 福田正, 竹山泰, 堀井雅史, 村井貞規, 遠藤孝夫, “新版交通工学”, pp47-48, 朝倉書店(2002,2)
- 12) 杉山雄規, “交通流の物理”, ながれ, 22, pp.95-108 (2003)