

交通流の円滑化に向けた協調カーナビの提案

山下 倫 央^{†1} 車 谷 浩 一^{†1} 中 島 秀 之^{‡2}

近年ユビキタス計算技術の発展により、都市生活を変えうる新たなシステムの設計が可能になりつつある。本論文では、各車両の経路情報（現在地、目的地、現在地から目的地までの経路）を共有し、その共有情報に基づいて各車両が経路を算出するシステムを協調カーナビとして提案する。協調カーナビを用いる各車両は経路情報共有サーバに経路情報を通知し、経路情報共有サーバは集めた経路情報に基づいて将来の混雑状況を見積もり、その情報を各車両に配信する。将来の混雑情報を受け取った各車両は経路を再計算し、経路を変更する。協調カーナビにおいては、このような情報共有とそれともなう経路変更が繰り返される。本論文の目的は、協調カーナビが個人およびシステム全体の移動効率の向上に対して効果があることを検証することである。協調カーナビが適切に機能し、普及可能であるかを評価するための指標として新規利用性、継続利用性、社会的普及性を導入した。3種類の道路網を用いたシミュレーションにおいて、i) 協調カーナビを用いるドライバーの平均旅行時間が他のドライバーよりも短くなり、ii) 協調カーナビを用いるドライバーの割合が増加するにつれて、全体の平均旅行時間が短くなった。シミュレーションの結果から、経路情報を共有する協調カーナビが新規利用性、継続利用性、社会的普及性を全般的に満たし、移動効率の向上に関して効果的であることを確認した。

Approach to Smooth Traffic Flow by a Cooperative Car Navigation System

TOMOHISA YAMASHITA,^{†1} KOICHI KURUMATANI^{†1}
and HIDEYUKI NAKASHIMA^{‡2}

With maturation of ubiquitous computing technology, it has become feasible to design new systems to improve our urban life. In this paper, we introduce a new application for car navigation in a city. Every car navigation system in operation today has the current position of the vehicle, the destination, and the currently chosen route to the destination. If vehicles in a city could share this information, they could use traffic information to globally plan semi-optimal routes for each vehicle. Thus, we propose a cooperative car navigation system with route information sharing (RIS). In the RIS system, each vehicle transmits route information (current position, destination, and route to the destination) to a route information server, which estimates future traffic congestion using this information and feeds its estimate back to each vehicle. Each vehicle uses the estimation to re-plan their route. This cycle is then repeated. Our purpose in this paper is to confirm the effectiveness of the proposed cooperative car navigation system with multiagent simulation. To evaluate the effect of the RIS system, we introduce new indexes; new use incentive, continuing use incentive, and social diffusiveness. In our traffic simulation with three types of road traffic networks, we observe that the average travel time of the drivers using the RIS system is substantially shorter than the time of other drivers. Moreover, as the number of RIS drivers increases, the average travel time of all drivers decreases. As a result of simulation, we confirm that a cooperative car navigation with the RIS system generally satisfied new use incentive, continuing use incentive, and social diffusiveness, and has a effect for the improvement of traffic efficiency.

1. はじめに

近年、位置取得技術や通信手段を代表とするユビキタス計算技術の発展により、多くの生活の場面において新たな情報支援サービスを提供することが可能になってきている¹¹⁾。しかし、従来研究においては、情報支援サービスが特定の1人のユーザを支援すると

^{†1} 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology (AIST)

^{‡2} 公立はこだて未来大学
Future University-Hakodate

いう個人支援の側面に焦点が当てられており、マルチエージェント技術はユビキタス計算技術と結びついてはなかった。このような現状をふまえて、我々はユビキタス計算環境における群ユーザ支援^{8),9)}に取り組んできた。群ユーザ支援は個々人の利便性を落とすことなく、ユーザ全体つまりシステム全体の効率を向上させることを目指している。従来の個人ユーザ支援における情報提供システムが単に個々のユーザの利便性のみを考慮しているのに比べて、群ユーザ支援においては個人の利便性と同等に、システム全体の効率も考慮している。本論文では、ユビキタス計算環境の一例として道路交通システムを取り上げ、我々が提案するカーナビゲーションシステムの効果を示すマルチエージェントシミュレーションの結果を報告する。

2. 協調カーナビの概要

2.1 従来の交通情報システム

道路交通システムにおいて、車両の現在位置を取得し、目的地までの経路を自動的に提示するカーナビゲーションシステム(以下「カーナビ」と呼ぶ)が近年急速に普及している。さらに、VICSと接続したカーナビゲーションシステム(以下「VICSカーナビ」と呼ぶ)が導入されている。VICS(Vehicle Information and Communication System: 道路交通情報通信システム²⁷⁾)とは、渋滞や交通規制等の道路交通情報をリアルタイムに送信する情報通信システムである。

VICSに代表される交通情報システムの発展をふまえて、より効果的なカーナビゲーションシステムを開発するために、配信される交通情報の種類と移動効率の関係を検証する研究がさかに行われている^{2),7),15),23)}。さらに、実際に道路を走行している車両から車両速度や旅行時間を収集し、混雑状況を推定し配信するといったプローブ情報の利用に関する実証実験や商用サービスもすでに始まっている^{22),24)-26)}。

しかし、多くのドライバが配信される混雑情報に従って経路選択をした場合、空いている経路に車両が集中する輻輳の同期が発生し、道路交通システム全体としての効率下がってしまうことが従来研究によって明らかにされている^{10),18)}。混雑情報を精緻化しても、輻輳の同期は本質的に解消できず、かえって車両の集中を加速させてしまうことがある。

この問題に対して従来研究では、過去の交通量の履歴やVICS情報を用いて交通量を予測し、混雑しないと予測された経路を選択する手法がとられていた。しかし、交通量は過去の履歴に基づいて予測されるため、交通事故や工事等による急な交通規制といった過去の

履歴がない状況が発生した場合に交通量の的確な予測は困難である。また、全員が混雑に関する予測情報を用いて経路選択をすると、かえって混雑が悪化し、旅行時間が伸びてしまうというシミュレーション結果も報告されている¹⁴⁾。近年では、交通量の予測システムは、予測交通情報の配信による直接的な道路交通システムの効率向上よりも、ドライバ個人の旅行時間の見積り^{17),20)}、交通信号システムの入力情報²¹⁾、交通施策の事前評価¹⁹⁾に用いられることが多い。

また、走行している車両どうしの車車間通信により混雑情報を伝播させ、混雑を回避する手法も研究されており、その効果が検証されている¹⁾。車車間通信による情報の伝播を利用しているため、車車間通信の普及率が低い場合には混雑緩和に対して効果が低く、現状からの普及が難しいことが問題としてあげられる。

VICSカーナビが急速に普及しつつも、渋滞緩和に対する効果的な交通情報システムがない現状をふまえると、混雑情報の配信による車両の集中がさらに混雑状況を悪化させてしまう可能性がある。そのため、混雑緩和に向けた交通情報システムが求められている。また、混雑情報の配信による集中は道路交通システムだけでなく、大規模テーマパーク⁶⁾やイベントホール¹²⁾でも発生するため、汎用的な解決方法が強く求められている。

2.2 経路情報の共有

本論文では、特定経路への車両の集中に対して、通過予定の経路情報の共有による経路の分散化を考える。混雑情報の配信による車両の集中の原因は、混雑情報(現在空いている経路)の配信時には、実際にその経路は空いているため、多数の車両がいっせいにその経路を選択してしまうことにある。そして、各車両の経路決定から混雑の発生までには時間的な隔りがあるため、混雑情報が配信された時点で広域的な車両運行状況だけを観測しても混雑発生を検知するのは困難である。

しかし、このような「現在は空いているが、その後車両が集中して混雑が発生する経路」は各車両が「どこにいて、どこを通過してどこに向かっているのか」という経路情報を集約できれば事前に検知可能である。そして、事前に検知された「現在は空いているが、その後車両が集中して混雑が発生する経路」を車両に配信すれば、一部の車両がその経路を変更して、車両の分散が期待できる。実際、VICSカーナビは現在位置、目的地、現在位置から目的地までの経路といった経路情報を持っているので、車両群で経路情報を共有できれば、さらに効率的なナビゲーションシステムを実現

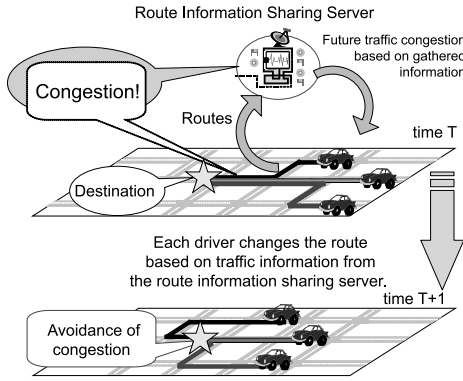


図 1 協調カーナビの概要
Fig. 1 Outline of cooperative car navigation.

できる。各車両が自ら経路を決定しつつも、特定の経路への集中を防ぎ、大域的に準最適な経路群を算出することが可能である。

我々は、各車両が経路情報を共有し、その共有情報に基づいて経路を算出するシステムを協調カーナビとして提案する。提案システムにおいて、各車両は経路情報を経路情報共有サーバに通知する。サーバは集めた経路情報を基に将来の混雑状況を見積もり、協調カーナビを利用する各車両に配信する。各車両はサーバの配信した情報を基に経路を再び計算し、経路を変更する。このとき各車両は大域的な効率を考慮せず、サーバから配信された情報に基づいて自分自身の旅行時間を最小化する経路を選択する。そして、このプロセスが繰り返される。図 1 は協調カーナビの概要を示している。

2.3 評価項目

本論文の目的は、協調カーナビが移動効率の向上に効果を持つことを示すことであり、その効果を新規利用性、利用継続性、社会的普及性という 3 点から評価する。新規利用性、継続利用性、社会的普及性の一般的な定義を以下に述べる。

新規利用性は、あるドライバーが他のナビゲーションシステムから協調カーナビへ変更するための誘因である。新規利用性を満足することは、協調カーナビのある普及率において、協調カーナビを用いたドライバーの移動効率が他のシステムを用いた場合の移動効率よりも高いことを意味している。

継続利用性は、協調カーナビを用いたドライバーが他のナビゲーションシステムに変更せず協調カーナビを使い続けるための誘因である。継続利用性を満足することは、協調カーナビの普及率が増加しても、協調カーナビを用いたドライバーの移動効率が下がらないことを意味している。

社会的普及性は協調カーナビが広く普及するための条件である。社会的普及性を満足することは、協調カーナビの普及率の増加にともない、その他のドライバーの移動効率が上がることを意味している。

本論文では、協調カーナビが与える影響を新規利用性、継続利用性、社会的普及性を評価するうえで、ドライバーの移動効率を各経路選択方法を用いるドライバー群の平均旅行時間とする。ある 2 人のドライバーが同じ経路選択方法を用いても、出発地や目的地、周囲の車両の経路選択方法や車両密度が異なれば、移動距離が同じでも旅行時間が異なってしまう。そのため、各ドライバーの旅行時間に着目するのではなく、それぞれの経路選択方法を用いるドライバー群の平均旅行時間の比較を行う。

また、この平均旅行時間は交通流シミュレーションの 1 試行の結果ではなく、複数試行における平均値を用いる。道路交通システムにおいては、出発地から目的地までの旅行時間は各車両どうしや各経路選択方法どうしが影響を及ぼし合うため、同じ出発地と同じ目的地に対して同じ経路を移動しても他の車両の経路が異なれば経路上の混雑状況は異なり、旅行時間は変わってしまう。そのため、1 試行の結果の比較ではなく、複数回の平均を比較して、経路選択方法の優劣の比較を行う方が妥当である。

以上をふまえて、本論文で用いる新規利用性、継続利用性、社会的普及性の具体的な定義を以下に述べる。ここで、協調カーナビの普及率 $d \in D$ (D は普及率の集合) における協調カーナビを用いるドライバー群の複数試行の平均旅行時間を \overline{T}_{RIS}^d とし、その他の経路選択方法を用いるドライバー群 X の平均旅行時間を \overline{T}_X^d とする*1。

新規利用性 協調カーナビの普及率 d において、新規利用性を満足することは式 (1) を満たすことである。

$$\overline{T}_X^d - \overline{T}_{RIS}^d > 0, \forall d \in D \tag{1}$$

継続利用性 継続利用性を満足することは、協調カーナビの普及率が d から d' に増加するのにともない ($d < d'$)、式 (2) を満たすことである。

$$\overline{T}_{RIS}^d \geq \overline{T}_{RIS}^{d'}, \forall d \in D \tag{2}$$

社会的普及性 社会的普及性を満足することは、協調

*1 協調カーナビを用いるドライバーの経路選択方法は経路情報共有戦略 (Route Information Sharing : RIS と略記) であるため、協調カーナビを用いるドライバー群の複数試行の平均旅行時間を \overline{T}_{RIS}^d とする。

カーナビの普及率が d から d' に増加するのにもない ($d < d'$), 式 (3) を満たすことである.

$$\bar{T}_X^d > \bar{T}_X^{d'}, \forall d \in D \quad (3)$$

3. マルチエージェントモデリング

3.1 交通流モデル

本研究で, ミクロレベルの各車両の経路選択行動とマクロレベルの混雑の発生の関係を検証するために, できる限り単純な交通流モデルを構築する. そのために, 信号 (赤信号での停車), 交差点での右折車待ち, 交差点以外での U ターン, 複数車線, 追い越し, 行き止まり, という要素を考慮に入れない.

交差点をノード, 交差点間の道路をリンクとし, さらにリンクをいくつかのブロックに分割する. 1 ブロックの長さは, 車両が自由流速度 V_f で 1 シミュレーションステップを走行した距離に等しい^{4),13)}. リンクをブロックに分割した後, 各ブロックに交通流の下流側から上流側に順に番号を割り当てる (図 2). i 番目のブロックに関して, ブロック長 L_i , 車両数 N_i , 車両速度 V_i , 車両密度 K_i を定義する. ここで, ブロック i の車両密度 K_i は $\frac{N_i}{L_i}$ である. ブロック i における車両速度 V_i は, 車両密度 K_i を用いたグリーンシールドの関係式を拡張した式 (4) に基づいて更新される.

$$V_i = \max \left(V_f \left(1 - \frac{K_i}{K_{jam}} \right), V_{min} \right) \quad (4)$$

式 (4) において, K_{jam} は飽和密度である. 現実的には渋滞が発生しても車両はわずかながら前進しているので, ブロック i での最小移動速度を V_{min} とする.

隣接するブロック i とブロック $i+1$ において, 車両位置を以下のように更新する. 各車両の移動の計算を下流側のブロックから上流側に向かって行う (図 2). 最初に, 各ブロックの車両速度が式 (4) に基づいて求められる. ブロック i にいる各車両は移動速度 V_i に基づいて前進する. 車両 j がブロック $i+1$ からブロック i に移動するときは, 車両速度は V_{i+1} から V_i に変更される. ブロック $i+1$ にいる車両 j がブロック

i に移ろうとしたときにブロック i の車両密度 K_i が飽和密度 K_{jam} を超えている場合は, ブロック $i+1$ からブロック i に入ることはできない. この場合, 車両 j はそれ以上前進できず, ブロック $i+1$ の先頭にとどまる. 車両 j_2 の前にいる車両 j_1 の移動の計算後, もし車両 j_1 が車両 j_2 の移動速度 V_{i+1} での前進可能距離よりも近くにいた場合, 車両 j_2 は車両 j_1 に最低車間距離 D_{min} まで近づく. 車両 j_2 がさらに前進するのに十分な移動速度を持っていても, 車両 j_1 の後ろにとどまる. 全車両の位置の更新後, 各ブロックでの移動速度が式 (4) に基づいて更新される. 次のステップにおいて, 各車両は現在の移動速度によらず, 更新された移動速度 V_i までただちに加速または減速する.

3.2 経路選択戦略

ドライバーの出発地から目的地までの経路選択に関して, 3 種類の経路選択戦略を用意する. 各戦略の詳細を以下に述べる.

3.2.1 最短距離経路戦略 (SD)

最短距離経路戦略 (Shortest Distance Route: SD と略記) を用いる SD ドライバは出発地から目的地までの経路長を最短にする経路を選択する. SD ドライバは現在の混雑情報を利用せず, 地図のみを持っているドライバーに相当する.

3.2.2 最短時間経路戦略 (ST)

最短時間経路戦略 (Shortest Time Route: ST と略記) を用いる ST ドライバは, 道路交通情報センタが配信する期待通過時間 (現在の混雑状況) に基づいて経路を選択する. 期待通過時間は現在の混雑状況から算出される通過時間である. ST ドライバは, VICS センタの配信する混雑情報を車載機を通じて取得し, 経路を決定するドライバーに相当する.

道路交通情報センタは 1 ステップごとに以下のように期待通過時間を算出し, ST ドライバに配信する.

- (1) 現時点での車両密度 K_i を用いて式 (4) から, 各ブロックの移動速度を算出する.
- (2) ブロック i の通過時間をブロック長 L_i と移動速度 V_i から算出する. リンク l の期待通過時間 (Expected Travel Time) ETT_l をリンク l の含む全ブロックの通過時間の総和とする.

ST ドライバは交差点に到達するたびに, 目的地までの期待通過時間を最小化する経路を再計算し, 経路を変更する.

3.2.3 経路情報共有戦略 (RIS)

協調カーナビによる経路情報共有戦略 (Route Information Sharing: RIS と略記) を用いる RIS ド

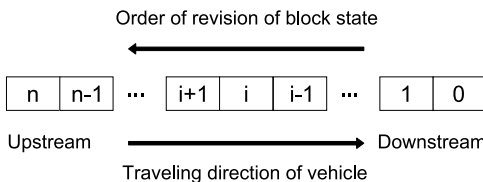


図 2 車両の進行方向とブロックの状態更新の順序

Fig. 2 Direction of vehicle movement and revision of blocks.

ライバ（協調カーナビを用いるドライバ）は経路情報共有サーバの算出する期待混雑度に基づいて経路を選択する．経路情報共有サーバは期待混雑度を以下のよう算出する．

- (1) RIS ドライバは期待通過時間を最小化する経路を選択し、その経路情報を経路情報共有サーバに通知する．
- (2) 経路情報共有サーバは RIS ドライバから集めた経路情報を用いて各リンクの通過重み (Passage Weight) を算出する．RIS ドライバ j のリンク l に対する通過重み $PW_{l,j}$ を次のように定義する．ある経路が現在地から目的地までの間に p 個のリンクを含んでいる場合、目的地から現在地までの各リンクに 1 から p を昇順に割り当てる．各リンクに割り当てられた番号を目的地から現在地までのリンク数 p で正規化したものを通過重みとする^{*1}．
- (3) 経路情報共有サーバは各リンクの総通過重みを算出する．リンク l の総通過重み (Total Passage Weight) TPW_l を、式 (5) で表されるように、すべての RIS ドライバのリンク l に対する通過重みの総和として定義する．

$$TPW_l = \sum_{k \in RIS} PW_{l,k} \quad (5)$$

式 (5) において、 RIS は RIS ドライバの集合である．

- (4) 経路情報共有サーバは各リンクの期待混雑度を算出し、RIS ドライバに配信する．リンク l の期待混雑度 (Expected Traffic Congestion) ETC_l をリンク l の期待通過時間 ETT_l と総通過重み TPW_l を用いて、以下のように定義する．

$$ETC_l = ETT_l \times (TPW_l + \alpha). \quad (6)$$

1 ステップごとに処理 (2) ~ (4) が繰り返される．RIS ドライバは交差点に到達するたびに、目的地までの期待混雑度の総和を最小化する経路を再計算し、経路を変更する．

式 (6) において、 α が大きければ相対的に TPW_l が ETC_l に与える影響が小さくなり、 α が小さければ TPW_l が ETC_l に与える影響が大きくなる．また、 $\alpha = 0$ の場合は、現時点であるリンクがどんなに混雑していても、今後通過する予定の車両がない場合（つまり、 $TPW_l = 0$ の場合）に、そのリンクの

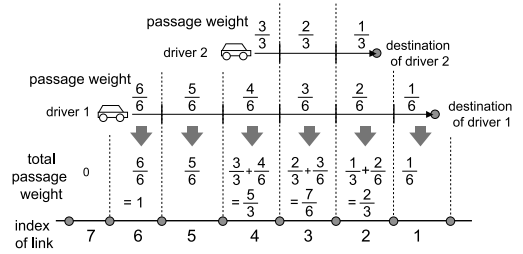


図 3 各リンクの総通過重みの算出例
Fig. 3 Sample calculation of total passage weight.

期待混雑度 ETC_l が 0 になり、現在の混雑状況を反映できなくなってしまう．そのため、 α は正の定数とする．

図 3 は各リンクの通過重みと総通過重みの算出例を表している．ドライバ 1 はリンク 6 上の現在地からリンク 1 上の目的地までリンク 6, 5, 4, 3, 2, 1 を通る経路を持つので、ドライバ 1 の各リンクの通過重みは、

$$PW_{1,1} = 1/6, PW_{2,1} = 2/6, PW_{3,1} = 3/6, PW_{4,1} = 4/6, PW_{5,1} = 5/6, PW_{6,1} = 6/6. \quad (7)$$

と算出される．ドライバ 2 はリンク 4 上の現在地からリンク 2 上の目的地までリンク 4, 3, 2 を通る経路を持つので、ドライバ 2 の各リンクの通過重みは、

$$PW_{1,2} = 0, PW_{2,2} = 1/3, PW_{3,2} = 2/3, PW_{4,2} = 3/3, PW_{5,2} = PW_{6,2} = 0. \quad (8)$$

と算出される．ドライバ 1, 2 の通過重みから、リンク 1 ~ 6 の総通過重みは以下の値となる．

$$TPW_1 = 1/6, TPW_2 = 2/3, TPW_3 = 7/6, TPW_4 = 5/3, TPW_5 = 5/6, TPW_6 = 1. \quad (9)$$

3.3 通過重みと期待混雑度の意味

通過重みは、RIS ドライバが現在地から通過リンクに到達するまでの時間を考慮した通過リンクの交通量に対する影響力である．現在地に隣接したリンクならば、車両が移動して、すぐにそのリンクの交通量を増加させられるため、そのリンクの交通量に対する影響力は大きい．しかし、目的地を含むリンクは確実に通過（到達）されるが、車両が到達するまでに時間がかかるため影響力は小さい．現在地から目的地までの通過重みの設定に関して議論の余地があるが、本論文の目的は経路情報の共有に基づく協調カーナビが交通システムの移動効率の向上につながるという大枠を示す

*1 たとえば、目的地を含むリンクには $1/p$ が、現在地を含むリンクには $1 (= p/p)$ が割り当てられる．

表 1 道路網の設定
Table 1 Settings of networks.

	lattice	radial and ring	Tokyo
Number of nodes	36	32	120
Number of links	60	56	200
Number of blocks	1,200	1,168	4,034

ことであるため、現在地から目的地まで線形に減少する単純な通過重みを用いる。

期待通過時間は、現在の車両密度から算出したリンクの通過時間であるが、協調カーナビにおいては現在の混雑状況を表す無次元の指標として扱われている。また、総通過重みは、これから通過しようとする車両群によって引き起こされる混雑状況を表す無次元の指標である。期待通過時間 ETT と総通過重み TPW の積である期待混雑度は、現在を含めた今後の混雑状況を表す無次元の指標である。あるリンクが現在は空いていて、これから通過する車両が少ない場合は期待混雑度は小さい。それに対して、現在混んでいて、これから通過する車両が多い場合には期待混雑度は大きい。現在混んでいても、これから通過する車両が少ない場合や、今は空いていても、これから通過する車両が多い場合にはそのリンクの期待混雑度は前述の 2 つの間の値をとる。

4. 計算機実験

4.1 実験設定

本論文では、SD、ST、RIS の 3 つの経路選択戦略の比率と道路網の構造に着目し、シミュレーションを行う。経路選択戦略の比率に関して、SD ドライバの比率を 20% で固定し、ST ドライバと RIS ドライバの比率を 0 : 80 から 80 : 0 まで 10% 刻みで変化させ、SD ドライバ、ST ドライバ、RIS ドライバの比率に関して、9 通りの設定を利用する。将来カーナビゲーションシステムが十分に普及した状態でも、カーナビゲーションシステム自体を搭載しない車両や、カーナビゲーションを使わずに目的地まで移動する車両がある一定割合はつねに存在し続けることが想定されるため、SD ドライバの比率を 20% に固定する。

道路網の構造に関して、図 4、図 5、図 6 に示される格子状網、放射環状網、東京状網の 3 種類の道路網を用いる。図 6 に示される東京状網は、皇居周辺 8km 四方の主要幹線道路のネットワーク構造を抽出したものである。各ドライバーの出発地、目的地は図中のリンク上のブロックにランダムに割り当てられる。最初のステップから 1 ステップごとに決められた数の車両が 25,000 台になるまで追加され、目的地に到達した車両

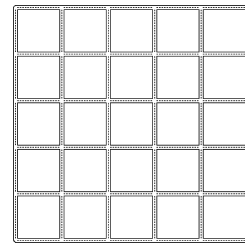


図 4 格子状網

Fig. 4 Lattice network.

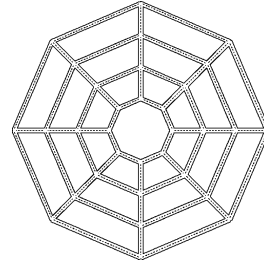


図 5 放射環状網

Fig. 5 Radial and ring network.

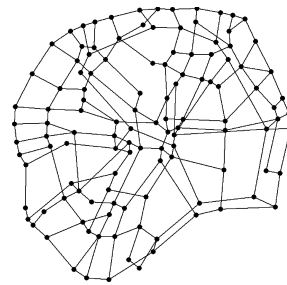


図 6 東京状網

Fig. 6 Tokyo network.

は道路網から取り除かれる。これら道路網においてすべてのブロックは同じ交通容量を持っている。

交通情報システムによる交通流の円滑化の効果は、道路交通システムの混雑状況に大きく影響を受ける。混雑状況と交通情報システムによる交通流の円滑化の効果を次の 3 通りに分類する。

混雑状況 i 車両間の干渉がなく、交通情報がなくても、各車両が距離最短経路を移動するだけで最短の旅行時間を実現できる。

混雑状況 ii 車両の集中により一部で混雑が発生するが、交通情報の配信によって車両の経路が分散すれば、旅行時間を短縮できる。

混雑状況 iii 交通システム全体で混雑が発生し、混雑状況 i に比べて大幅に旅行時間が増加し、交通情報を用いて経路選択をしても旅行時間の短縮が

表 2 1 ステップにおける車両発生数 (N_{gen})

Table 2 Number of vehicles generated at one step (N_{gen}).

	lattice	radial and ring	Tokyo
N_{gen}	40, 45	30, 35	55, 65

表 3 交通流モデルの各種パラメータ

Table 3 Parameters in traffic simulation.

自由流速度 V_f	50 km/h
最低速度 V_{min}	6 km/h
臨界密度 K_c	70 台/km
飽和密度 K_{jam}	140 台/km
最低車間距離 D_{min}	3.5 m
ブロック長 L_i	138.9 m
交通容量 K_{jam}	1,750 台/h
1 シミュレーションステップ	10 秒
期待混雑度の係数 α	1.0

困難である。

本論文では、各道路網に対して交通情報システムの効果を検証しやすい混雑状況 ii を引き起こす車両発生数を用いる。混雑状況 i と混雑状況 iii の具体的な条件を以下に示し、その間の状況を混雑状況 ii とする。

混雑状況 i の条件は、出発地から目的地までの最短距離経路を自由流速度で移動した場合の旅行時間に対して、実際の SD ドライバの平均旅行時間の増分が 50%以内であるとする。予備実験^{*1}の結果、この条件を満たす 1 ステップごとの発生車両台数は、格子状網では 35 台以下の場合、放射環状網では 25 台以下の場合、東京網では 45 台以下の場合であった。

混雑状況 iii の条件は、デッドロック^{*2}の発生とする。各道路網においてデッドロックが発生する 1 ステップごとの発生車両台数は、格子状網では 50 台以上の場合、放射環状網では 40 台以上の場合、東京網では 70 台以上の場合であった。

この予備実験の結果をふまえて、本論文では、各道路網において混雑状況 i と混雑状況 iii の間にある車両発生数を混雑状況 ii を引き起こす車両発生数とし、表 2 に示される車両発生数を使用する。

交通流モデルにおいて用いられたパラメータは表 3 に記されている。式 (6) における期待混雑度を算出す

*1 1 ステップごとの発生車両数を 5 台から 80 台まで 5 台刻みで変化させ、全 16 通りの車両発生数を検証した。総発生車両数は 25,000 台、SD ドライバと ST ドライバの比率を 20 : 80 とし、RIS ドライバは含めない。

*2 あるリンクの先頭の車両が飽和密度に達しているリンクに進入できず停止して、そのリンクの先頭の車両も同様に次のリンクに進入できずに停止している。このような状況が環状に発生すると、いつまでもこの状態が解消されない。この状況を我々のモデルではデッドロックとする。

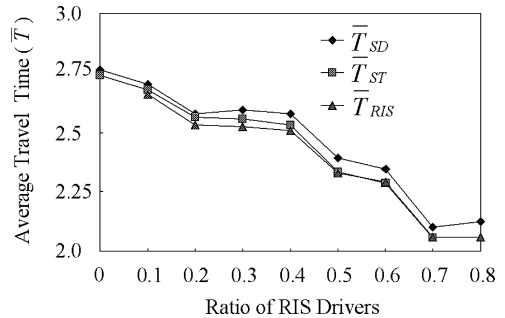


図 7 格子状網における車両発生数 $N_{gen} = 40$ の場合の平均旅行時間 (SD ドライバの割合を 20% に固定)

Fig. 7 Average travel time with $N_{gen} = 40$ in the lattice network (The ratio of SD drivers is fixed at 0.2).

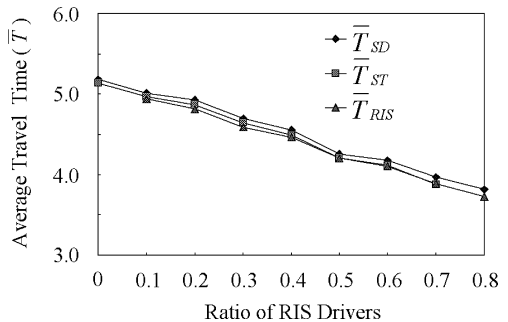


図 8 格子状網における車両発生数 $N_{gen} = 45$ の場合の平均旅行時間 (SD ドライバの割合を 20% に固定)

Fig. 8 Average travel time with $N_{gen} = 45$ in the lattice network (The ratio of SD drivers is fixed at 0.2).

る際に用いられる係数 α は、予備実験の結果から旅行時間の短縮に効果の大きかった $\alpha = 1.0$ を採用する。

4.2 実験結果

異なる道路網や車両発生数における車両の移動効率を比較するために、各ドライバの実際の旅行時間を出発地から目的地までの最短距離経路を自由流速度で移動した場合の旅行時間で正規化して用いる。

各道路網における SD, ST, RIS ドライバの平均旅行時間 (30 試行の平均) が図 7~12 に示されており、図中の横軸は RIS ドライバの割合、縦軸は各戦略を用いるドライバの平均旅行時間である。また、RIS ドライバ全員の平均旅行時間を \bar{T}_{RIS} とし、同様に SD ドライバ全員、ST ドライバ全員の平均旅行時間を \bar{T}_{SD} , \bar{T}_{ST} とする。

4.2.1 格子状網

図 7 において、RIS ドライバの割合が増加するにつれて、各戦略の平均旅行時間が減少した。RIS ドライバの割合が 40% になるまで、平均旅行時間は RIS, ST, SD の順に短い。その後、 \bar{T}_{ST} と \bar{T}_{RIS} にほとんど差は見られない。図 8 において、RIS ドライバ

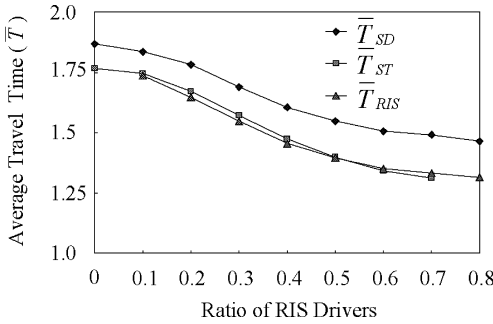


図 9 放射環状網における車両発生数 $N_{gen} = 30$ の場合の平均旅行時間 (SD ドライバの割合を 20% に固定)

Fig. 9 Average travel time with $N_{gen} = 30$ in the radial and ring network (The ratio of SD drivers is fixed at 0.2).

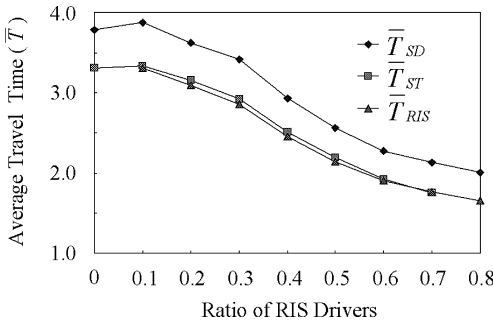


図 10 放射環状網における車両発生数 $N_{gen} = 35$ の場合の平均旅行時間 (SD ドライバの割合を 20% に固定)

Fig. 10 Average travel time with $N_{gen} = 35$ in the radial and ring network (The ratio of SD drivers is fixed at 0.2).

の割合が増加するにつれて、各戦略の平均旅行時間がほぼ一定に減少した。RIS ドライバの割合にかかわらず、 \bar{T}_{SD} 、 \bar{T}_{ST} 、 \bar{T}_{RIS} に大きな差はない。

4.2.2 放射環状網

図 9 においては、RIS ドライバの割合が増加するにつれて、各戦略の平均旅行時間が減少する。 \bar{T}_{SD} はつねに \bar{T}_{ST} と \bar{T}_{RIS} よりも大きい。RIS ドライバの割合が 70% になるまで、 \bar{T}_{RIS} は \bar{T}_{ST} よりも短い。しかし、RIS ドライバの割合が 70% の場合に限り、 \bar{T}_{ST} が \bar{T}_{RIS} を下回る。図 10 においては、図 9 と同様に RIS ドライバの割合の増加につれて、各戦略の平均旅行時間が減少する。RIS ドライバの割合にかかわらず、平均旅行時間は RIS、ST、SD の順に短い。

4.2.3 東京状網

図 11 において、RIS ドライバの割合が増加するにつれて、各タイプの平均旅行時間が減少しているが、RIS ドライバの割合が 30% の場合に限り、全タイプの平均旅行時間が増加している。 \bar{T}_{ST} と \bar{T}_{RIS} にほ

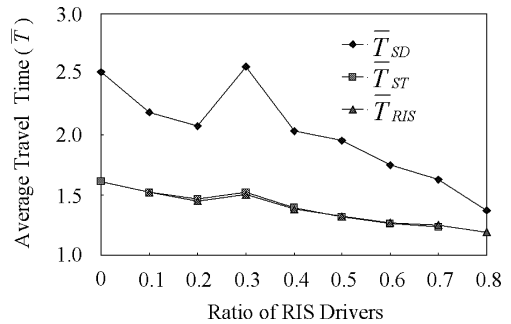


図 11 東京状網における車両発生数 $N_{gen} = 55$ の場合の平均旅行時間 (SD ドライバの割合を 20% に固定)

Fig. 11 Average travel time with $N_{gen} = 55$ in the Tokyo network (The ratio of SD drivers is fixed at 0.2).

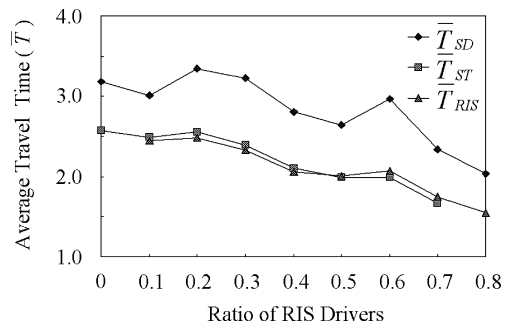


図 12 東京状網における車両発生数 $N_{gen} = 65$ の場合の平均旅行時間 (SD ドライバの割合を 20% に固定)

Fig. 12 Average travel time with $N_{gen} = 65$ in the Tokyo network (The ratio of SD drivers is fixed at 0.2).

とんど差は見られない。図 12 において、RIS ドライバの割合が増加するにつれて、RIS、ST ドライバの平均旅行時間は減少していく。しかし、SD ドライバの平均旅行時間は単調に減少せず、RIS ドライバの割合が 20、30、60% の場合には増加している。RIS ドライバの割合が 60% になるまで、平均旅行時間は RIS、ST、SD の順に短い。その後、RIS ドライバの割合が 60% を超えると \bar{T}_{ST} が \bar{T}_{RIS} を下回る。

5. 考 察

5.1 実験結果のまとめ

各道路網におけるシミュレーションにおいて、協調カーナビが新規利用性、継続利用性、社会的普及性を満たしているかどうかをまとめ、その後協調カーナビの効果について論じる。

5.1.1 格子状網

- 新規利用性：満足。
- 継続利用性：満足。
- 社会的普及性：不満足。
- ST ドライバは満足。

SD ドライバは $N_{gen} = 40$ において普及率 20%→30%, 20%→30%で不満足.

5.1.2 放射環状網

新規利用性: 不満足.

$N_{gen} = 30$ において, $\bar{T}_{ST}^{70} - \bar{T}_{RIS}^{70} > 0$ で不満足.

継続利用性: 満足.

社会的普及性: 不満足.

ST ドライバは満足.

SD ドライバは $N_{gen} = 35$ において, 普及率 0%→10%で不満足.

5.1.3 東京状網

新規利用性: 不満足.

$N_{gen} = 65$ において,

$$\bar{T}_{ST}^{60} - \bar{T}_{RIS}^{60} > 0, \bar{T}_{ST}^{70} - \bar{T}_{RIS}^{70} > 0$$

で不満足.

継続利用性: 不満足.

$N_{gen} = 55$ において,

$$\bar{T}_{RIS}^{20} < \bar{T}_{RIS}^{30}$$

$N_{gen} = 65$ において,

$$\bar{T}_{RIS}^{10} < \bar{T}_{RIS}^{20}, \bar{T}_{RIS}^{60} < \bar{T}_{RIS}^{70}$$

社会的普及性: 不満足.

SD ドライバと ST ドライバの両方に関して, $N_{gen} = 55$ において普及率 20%→30%で不満足. $N_{gen} = 65$ において, 普及率 10%→20%, 50%→60%で不満足.

5.2 協調カーナビの評価

シミュレーションの結果のまとめより, いずれの道路網においても, 新規利用性, 継続利用性, 社会的普及性のすべてが完全に満足されることはなかった. しかし, ST ドライバの平均旅行時間が RIS ドライバよりも短い場合でも ST ドライバと RIS ドライバの平均旅行時間の差は小さく, また, 協調カーナビの普及率の増加にともなう全般的な傾向として, いずれのドライバの平均旅行時間も減少していた. そこで, 実験結果において新規利用性, 継続利用性, 社会的普及性が満たされていない頻度, ST ドライバと RIS ドライバの平均旅行時間の差, 協調カーナビの普及率が増加しても各ドライバの平均旅行時間が減少しなかった頻度に着目し, 協調カーナビの効果を評価する.

図7~12より, ST ドライバが RIS ドライバの平均旅行時間を下回り, 新規利用性が不満足となったのは全 54 ケース中 3 ケースで, その場合の時間差は 1.2%以内であった. また, 協調カーナビの普及率が増加して

も, RIS ドライバの平均旅行時間が減少せず, 継続利用性が不満足となったのは全 48 ケース中 3 ケースで, その場合の時間差は 1.8%以内であった.

協調カーナビの普及率が増加したのに, SD ドライバや ST ドライバの平均旅行時間が減少せず, 社会的普及性が不満足となるケースは, SD ドライバに関しては全 48 ケース中 6 ケースで, その差は 20.3%以内であった. ST ドライバに関しては全 48 ケース中 3 ケースで, その差は 3.6%以内であった. 特に東京状道路網において, $N_{gen} = 55$ での RIS ドライバの比率が 30%の場合や, $N_{gen} = 65$ での RIS ドライバの比率が 20%, 30%, 60%の場合において, 前後と異なる平均旅行時間が目立って示されている. 本論文で行ったシミュレーションでは, ST ドライバと RIS ドライバの比率は変更されるが, SD ドライバはつねに一定の割合 (20%) で存在する. SD ドライバはシミュレーションの開始時に決定された出発地と目的地に対して, 移動距離を最小化する経路を選択するため, ST ドライバや RIS ドライバの比率とは関係なく, 特定の経路に集中して混雑を発生させてしまうことがある. 特に, 東京状網では中心部近辺で SD ドライバによる混雑が不定期に発生してしまい, 協調カーナビの普及率の増加にともなわず, SD ドライバの平均旅行時間が増加してしまう. SD ドライバの平均旅行時間が大きく伸びている場合でも, ST ドライバや RIS ドライバは混雑状況に応じて経路を変更し, 混雑を回避するため, ST ドライバや RIS ドライバの平均旅行時間はわずかに増加するにとどまっている. したがって, この現象は協調カーナビの影響よりも, SD ドライバの実験設定や交通シミュレータの設定に基づくものといえる^{*1}.

協調カーナビは新規利用性, 継続利用性, 社会的普及性を完全に満たすことはできなかったが, RIS ドライバの平均旅行時間が ST ドライバに劣る場合や協調カーナビの普及率が増加しても平均旅行時間が減少しない場合があっても, その発生頻度は低く, その差も小さいことを確認した. 本論文において, 交通情報シ

*1 本論文で用いた交通流シミュレータでは, SD ドライバがいつ混雑を発生させるかを制御できず, SD ドライバ群の挙動の不確定性を除去しることができなかった. しかし, 本論文の目的は現実の道路交通システムを精確に再現することではなく, 協調カーナビが道路交通システムにおいて移動効率の向上に貢献可能なことを示すことであるため, SD ドライバが不定期に混雑状況を引き起こす要因が残っているシミュレーションであっても, 本論文で示した実験結果は有用であると判断した. SD ドライバによる不定期な混雑発生の影響を低減させることは今後の課題とする.

システムが適切に機能し、普及可能かを評価するための指標として新規利用性、継続利用性、社会的普及性を導入したが、協調カーナビがそれらを全般的に満足していることで、協調カーナビが道路交通システムの移動効率の向上につながる可能性を示すことができた。協調カーナビの改良の余地としては、新規利用性に関して ST 戦略に対する明確な優位性を確保することや協調カーナビの普及率の増加にともなう安定的な平均旅行時間の減少があげられる。

5.3 協調カーナビの実現に向けて

情報提供サービスの実現に向けた協調カーナビの実装について論じる。本論文のはじめで、RIS ドライバと経路情報共有サーバの間の通信には、携帯電話のような長距離通信を用いた直接的な通信を示唆していた。しかし、首都圏全域を覆うような広大な道路網に対して協調カーナビを適用する場合、RIS ドライバとサーバの直接的な通信は膨大な通信負荷を生じるため現実的ではない。そのため、信号機や路側機が RIS ドライバから経路情報を集め、高速専用回線を使用して経路情報共有サーバへ伝えるという路側機を中継器とした路車間通信を基本としたシステム構成が妥当であると考えている。RIS ドライバと路側機間の通信手段に関しては、近距離双方向通信としてすでに開発されている DSRC (Dedicated Short Range Communication) や赤外線ビーコンが利用可能である。また、交通信号システムと協調カーナビをつなぎ、期待混雑度等の予測情報を信号機の広域系統制御に利用できれば、交通量が増加すると判断された経路の通過量を事前に増加させ、混雑の発生を回避するような動的な信号制御による道路交通システムの効率化が望める^{3),16),21)}。さらに、道路交通システムに限らず、その他の交通システムや物流システムと協力的な連携ができれば、都市インフラの物理的な容量を増加させ、提供する情報サービスの質を向上させることが期待できる。また、本論文で提案した情報共有による協調カーナビは、車両だけでなく人流制御⁶⁾ や航空交通管制⁵⁾ といったシステムにおいても混雑回避に関して効果があると考えている。

6. ま と め

本論文では、経路情報共有サーバを用いて各車両の経路情報を共有し、各車両が共有した経路情報に基づいて経路を算出するシステムを協調カーナビとして提案した。協調カーナビの効果を検証するため、経路情報共有戦略 (RIS) のほかに最短距離経路戦略 (SD) と最短時間経路戦略 (ST) を用意し、格子状網、放

射環状網、東京状網において 3 種類の経路選択戦略の比率を変えてシミュレーションを行った。協調カーナビの効果を新規利用性、継続利用性、社会的普及性という 3 点から評価し、協調カーナビの有効性を検証した。最後に協調カーナビの現実の道路交通システムへの応用やその他のシステムとの連携について論じた。

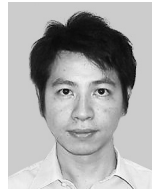
参 考 文 献

- 1) Ando, Y., Fukazawa, Y., Masutani, O., Iwasaki, H. and Honiden, S.: Performance of Pheromone Model for Predicting Traffic Congestion, *Proc. 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2006)*, pp.73–80 (2006).
- 2) Bazzan, A., Boffo, F. and Klugl, F.: Avoiding the Braess Paradox with Information Manipulation, *Proc. Workshop on Agents in Traffic And Transportation in 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (ATT 2004)*, pp.1–7 (2004).
- 3) Dresner, K. and Stone, P.: Multiagent Traffic Management: A Reservation-Based Intersection Control Mechanism, *Proc. 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2004)*, pp.530–537 (2004).
- 4) Horiguchi, R., Kuwahara, M. and Nishikawa, I.: The Model Validation of Traffic Simulation System for Urban Road Networks: 'AVENUE', *Proc. 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems '95 (IV)*, pp.1977–1982 (1995).
- 5) Jared, H., Ryan, J., James, A., Richard, L., Frost, R.L. and Stirling, W.C.: A Cooperative Multi-Agent Approach to Free Flight, *Proc. 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2005)*, pp.1083–1090 (2005).
- 6) Kataoka, T., Kawamura, H., Kurumatani, K. and Ohuchi, A.: Distributed Visitors Coordination System in Theme Park Problem, *Massively Multi-agent Systems in Public Space*, Vol.3446, pp.335–348 (2005).
- 7) Klugl, F., Bazzan, A.L.C. and Wahle, J.: Selection of Information Types Based on Personal Utility: A Testbed for Traffic Information Markets, *Proc. 2nd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2003)*, pp.377–384 (2003).
- 8) Kurumatani, K.: Mass User Support by Social Coordination Among Citizens in a Real Environment, *Multiagent for Mass User Support*, LNAI 3012, pp.1–19, Springer (2004).

- 9) Kurumatani, K.: Social Coordination with Architecture for Ubiquitous Agents: CONSORTS, *Proc. International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce 2003* (CD-ROM) (2003).
- 10) Mahmassani, H.S. and Jayakrishnan, R.: System Performance and User Response Under Real-Time Information in a Congested Traffic Corridor, *Transportation Research*, Vol.25A, No.5, pp.293-307 (1991).
- 11) Nakashima, H.: Grounding to the Real World - Architecture for Ubiquitous Computing, *Springer LNAI 2871 Foundations of Intelligent Systems*, pp.7-11 (2003).
- 12) Suzuki, R. and Arita T.: Effects of Information Sharing on Collective Behaviors in Competitive Populations, *Proc. 8th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp.36-39 (2003).
- 13) Teramoto, E., Baba, M., Mori, H., Asano, Y. and Morita, H.: NETSTREAM: Traffic Simulator for Evaluating Traffic Information Systems, *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems '97* (CD-ROM) (1997).
- 14) Yoshii, T., Akahane, H. and Kuwahara, M.: An Evaluation on Effects of Dynamic Route Guidance on an Urban Expressway Network, *Proc. 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems*, Vol.4, pp.1995-2000 (1995).
- 15) 大原 健, 能島裕介, 石淵久生: 交通渋滞解消のための大域的及び局所的最適化経路選択手法の性能比較, 知能と情報, 日本知能情報フレンジ学会誌, Vol.18, No.6, pp.867-873 (2006).
- 16) 小林正明, 清水 光, 藤井温子, 石川 洋: 交通ネットワークの交通流制御に関するシステム理論的考察, 情報処理学会研究報告, Vol.2005, No.47, pp.37-42 (2005).
- 17) 北岡広宣, 志賀孝広, 森 博子, 寺本英二, 井野口利夫: トヨタテレマティクスサービス G-BOOK 向け旅行時間予測手法の開発, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.41, No.4, pp.40-44 (2006).
- 18) 棚橋 巖, 北岡広宣, 馬場美也子, 森 博子, 寺田重雄, 寺本英二: 広域交通流シミュレータ NETSTREAM, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.37, No.2, pp.47-53 (2002).
- 19) 森 博子, 北岡広宣, 寺本英二: 愛・地球博開催時の交通状況予測シミュレーション, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.41, No.4, pp.45-51 (2006).
- 20) 割田 博, 森田緯之, 桑原雅夫, 田中 淳: 出発直前を対象とした道路交通状況予測手法の研究, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.23, pp.209-212 (2003).
- 21) 織田利彦: 交通流予測にもとづいた制御パラメータの逐次更新による信号制御, 電気学会論文誌, Vol.125, No.8, pp.800-807 (2005).
- 22) 小出勝亮, 宮崎 要, 堀口良太, 赤羽弘和: VICS 情報とプローブ情報の融合手法の研究, 第 30 回土木計画学研究発表会講演論文集 (CD-ROM) (2004).
- 23) 松井宏樹, 和泉 潔, 野田五十樹: 災害時の道路交通におけるドライバの得られる情報と交通管理策, 社会における AI 研究会, SIG-SAI-002-01 (2006).
- 24) <http://drive.nissan-carwings.com/sky/>
- 25) <http://premium-club.jp/PR/>
- 26) <http://toyota.jp/g-book/mx/index.html>
- 27) <http://www.vics.or.jp/>

(平成 19 年 4 月 6 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



山下 倫央 (正会員)

2000 ~ 2003 年日本学術振興会特別研究員。2002 年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。2002 ~ 2003 年ブルッキングス研究所客員研究員。2003 年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター入所。2005 年情報技術研究部門研究員。ゲーム理論, 社会システムシミュレーション, マルチエージェント, ユビキタスコンピューティング等に興味を持つ。人工知能学会, 観光情報学会各会員。



車谷 浩一 (正会員)

1989 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所入所。1996 ~ 1997 年スイス工科大学ローザンヌ校 (EPFL) 人工知能研究所 (LIA) 客員研究員。2001 年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センターマルチエージェントチーム長。2004 年産業技術総合研究所情報技術研究部門マルチエージェントグループ長。ユビキタスコンピューティング, 社会シミュレーション, マルチエージェント等に興味を持つ。人工知能学会, AAAI 各会員。



中島 秀之(正会員)

公立ほこだて未来大学学長・産業技術総合研究所情報技術研究部門研究顧問・東京大学大学院情報工学専門課程修了(工学博士)・人工知能を状況依存性の観点から研究・マルチエージェントならびに複雑系の情報処理とその応用に興味を持っている・認知科学会元会長,ソフトウェア科学会元理事,人工知能学会元理事,情報処理学会副会長・マルチエージェントシステム国際財団元理事・主要編著書:『知能の謎』(講談社ブルーバックス),『AI事典第2版』(共立出版),『知的エージェントのための集合と論理』(共立出版),『思考』(岩波講座認知科学8),『記号の世界』(岩波書店),『Prolog』(産業図書).
