情報処理学会論文誌 Vol. 50 No. 1 31–41 (Jan. 2009)

VANETにおけるGeocastによる要求を想定した位置依存情報の複製配布方法

山中 麻理子[†1,*1] 石原 進[†2]

アドホックネットワークでは端末の移動や障害物によるリンク切断によって，端末は他の端末が保持するデータにつねにアクセスできるとは限らない．このような環境でのネットワーク内の他の端末が保持するデータの可用性を向上するための手段として，データの複製やデータを保持している端末に関する情報を他の端末に配布することが有効である．本論文では，車々間アドホックネットワーク（VANET）における位置依存情報の複製配布手法として，道路構造と隣接車両の現在位置，進行方向を基にして複製の配布制御を行う手法 Road-aware Direction based replica distribution scheme（RD 方式）を提案する．RD 方式では，各車両は 1 回のブロードキャストでより多くの車両に対して複製が配布されるように，交差点で複製を配布する．このとき，自身が配布した複製を受信した車両によって情報発生位置周辺の異なる交差点で複製の再配布が行われるように，次に複製の再配布を行う車両を適切に選択する．シミュレーションの結果，RD 方式は従来の新たな通信可能車両が現れた時点で複製を配布する手法と比較して，効率的に複製を配布することができることを確認した．また，特に車両密度が低い状況において周辺車両の進行方向を基に複製配布を選択すると，高い要求到達率が得られることを確認した．

A Scheme for Distributing Replicas of Location Dependent Information Requested by Geocast on VANETs

Mariko Yamanaka[†1,*1] and Susumu Ishihara[†2]

It is difficult for mobile hosts to access the data on other hosts at all time in mobile ad hoc networks due to obstacles and link disconnections caused by movements of hosts etc. Distributing replicas of data objects is a useful technique to improve accessibility to those data on mobile ad hoc networks. In this paper we propose Road-aware Direction based replica distribution scheme (RD scheme) for distributing location-dependent data on vehicular ad hoc networks. In the RD method, a vehicle distributes replicas of a data item of location-dependent information at intersections in order to distribute the replicas to many hosts with a small number of broadcasts. When each vehicle distributes replicas, it selects vehicles which redistribute the replica so that the replica will be redistributed at different intersections by smaller number of vehicles. The simulation results show that the replica is efficiently distributed in RD method compared with a traditional method in which replicas are distributed when a vehicle encounters other vehicles. We also confirmed that next distribution vehicles should be selected according to the movement direction of vehicles.

1. はじめに

近年，最先端の情報通信技術を用いて人と車両と道路を一体のシステムとして構築し，道路交通の安全性，輸送効率，快適性の向上などを目的とした高度道路交通システム（Intelligent Transport Systems: ITS）の研究開発が進められている．現在では，路車間通信や移動体通信サービスを利用して情報センタへ収集された情報をカーナビゲーションシステムなどの車載器に配信する道路交通情報通信システム（Vehicle Information and Communication System: VICS）[1] やオンデマンド型の交通情報提供サービスが提供されている[2]．しかし，これらのサービスは固定の通信インフラを用いて提供されているため，利用可能範囲が制限される点やインフラの整備や管理に膨大なコストがかかる，情報の提供・収集の際に通信費用が発生することや，1 度情報センタへ情報を収集してから情報配信を行うため，情報の提供に遅延が発生することなどの問題がある．

このようななか，車両間で動的に無線マルチホップネットワークを構築する車々間アドホックネットワーク（Vehicular Ad hoc NETwork: VANET）が注目されており，VANET を利用したセンタレスプローブ情報システムの開発などが進められている[3]．VANET では，既存の固定通信インフラを用いることなく車両間で通信を行うため，カバーエリアの制限がなく柔軟にネットワークを構築することが可能である．しかし VANET では，ネットワークを構成している車両の移動や障害物の影響により，トポロジが頻繁に変化するため車両間の接続性は保証されない．このような環境において車両間で情報の共有を行うことを想定した場合には，他の車両の保持する情報につねにアクセスできるとは限らない．この問題

†1 静岡大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Shizuoka University
†2 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University
*1 現在，株式会社デンソー
Presently with Denso Corporation

© 2009 Information Processing Society of Japan

に対し，アドホックネットワークを構成する各端末の保持している情報に対するアクセス性能を向上させるための手法として，発生した情報の複製や情報を保持している端末に関する情報をネットワーク内の他の端末に配布する複製配布が有効である．

筆者らは固定されたサーバの存在しない VANET に焦点を当て，道路交通情報などの，ある特定の位置に関連した情報（位置依存情報）を共有するシステムを想定したデータ配信技術の検討を進めている．サーバレスの環境では，情報要求者が，取得したい情報をどの車両が保持しているかを特定することは困難である．このような環境下でも，発生した情報をその発生位置周辺に存在する車両に保持させる機構があれば，要求者は情報を取得したい特定の位置へ向けて要求メッセージを送信（Geocast）することで情報の取得が可能となる．本論文では，Geocast によってアクセスされる位置依存情報を想定し，それらへのアクセスの成功率の向上を目的とした複製配布手法 Road-aware Direction based replica distribution scheme（RD 方式）を提案する．

従来提案された車両間の位置依存情報の配布や複製管理方式[3),7)–9)] では，道路構造を考慮した複製の配布が行われていなかった．一方，RD 方式では，複製の配布は交差点で行われる．これは，交差点では車両密度の増加と車両間の通信に対する障害物の影響の軽減が期待されるため，1 度のブロードキャストにより，効率良く多くの車両に複製を配布できるためである．また複製配布の際には，複製を受信した車両により情報発生位置周辺の異なる交差点で複製の再配布が行われるように，隣接車両の現在位置や進行方向を考慮して次に複製の再配布を行う車両を指定する．

以下，2 章では VANET におけるパケット配送および情報の共有に関する関連研究について述べる．3 章では RD 方式の詳細について述べ，4 章ではシミュレーション評価結果を示す．5 章でまとめを述べる．

2. 関 連 研 究

VANET では，車両は道路などの物理的構造に従って移動する，車両の密度と速度は交差点，信号の配置，場所，時間などにより大きく変化する．そのため，パケットの経路制御や複製の配置においてもこれらの点を考慮する必要がある．

Lochert らは，既存の位置ベースルーティングの市街地環境における性能低下を指摘し，障害物などの影響を考慮した位置ベースのユニキャストルーティングプロトコル GPCR を提案している[4)]．GPCR では，交差点にいるノードに優先的にパケットを受信させて交差点間の通信を行うようにすることで，市街地ブロックを迂回するようにパケットを転送する．交差点間の通信は Greedy Forwarding によって行われ，交差点間の通信は GPSR で用いられているものと同様の Perimeter ルーティングと Greedy Forwarding を併用した手法が用いられている．Zhao らは車両密度にばらつきのある VANET では宛先位置までの物理的距離とパケット配送遅延が必ずしも比例するとは限らないことを指摘している[5)]．提案されているプロトコル VADD では各車両があらかじめ各道路に対する交通パターンなどを把握していることを前提とし，パケット配送遅延が最も小さい道路に存在する車両にパケットの転送を行う．また，パケットの配送には Carry and Forward を用いることで周辺に通信可能な車両が存在しない状況においてもパケットが破棄されてしてしまうことを防いでいる．以上の 2 つがユニキャストによるパケット配送プロトコルであったのに対し，Korkmaz らは市街地におけるマルチホップブロードキャストプロトコルを提案している[6)]．このプロトコルは，ブロードキャスト通信の信頼性の向上や交差点における各方向へのパケット配送などを目標として設計されている．GPCR と同様に交差点におけるパケット配送に注目し，交差点に導入されたリピータが交差点から各方向に延びる道路上にいる車両に対してパケットの配送を行う．

本研究と同じように，VANET において位置依存情報の複製の配布を行う研究も行われている．Maihöfer らは，一定期間特定の領域に対してパケットを留め続けるためのプロトコル Abiding Geocast を提案している[7)]．Abiding Geocast では情報生成端末によって設定された期間，特定領域に対して繰り返し情報の配送が行われる．情報配送の方法としては，固定サーバを用いる手法（サーバ法）や特定領域内の移動端末が動的にサーバとなる手法（選出法），特定領域内の端末が新たに遭遇した端末に配送する方法（隣接法）が提案されている．このプロトコルでは，一定期間特定領域に対し繰り返し情報の複製が配布される点で本研究と同じアプローチをとっているが，複製配布時に道路構造を考慮していない点で本研究とは異なる．また，屋代らは特定の地理的位置に存在する移動ノードにとどまろうとするモバイルエージェント，Nomadic Agent を用いて，位置依存情報を配布する方法を提案しているが[8)]，道路構造については考慮していない．一方 Xu らは，出会った車両と保持している情報を交換し合うことで，特定領域内に情報を留める手法を提案している[9)]．この手法では，情報発生からの経過時間が短く，情報発生位置からの距離が小さい情報ほど優先的に保持する．それにより，情報発生位置周辺で一定期間情報を配布することが可能となる．本研究が交差点で複製を配布するのに対し，この手法では通信可能な車両が現れるたびに情報の交換を行っている点で本研究とは異なる．

© 2009 Information Processing Society of Japan

3. Road-aware Direction-based replica distribution scheme（RD 方式）

本章では RD 方式の動作を説明する．

3.1 想定環境

本論文では，以下のような環境を想定している．

- VANET を構成している各車両は信号などの交通ルールに従い，道路上を移動する．
- 各車両は，現在位置周辺の領域に関する情報（位置依存情報）の生成を行う．生成した情報には，その発生時刻と位置，および有効期限が与えられる．
- 各車両は GPS などにより現在位置の取得が可能である．
- 固定のデータサーバは存在せず，他の車両がどのような情報を保持しているかは未知である．
- 各車両は，利用したい情報を保持していない場合には，情報を取得したい位置へ向けて Geocast により要求メッセージを送信する．
- 要求メッセージを受信すると，指定された領域に関する情報を保持している車両は，応答としてその情報を返送する．
- 端末には十分な記憶容量があり，車両間で交換する情報によって記憶領域が不足することはない．

3.2 動作概要

RD 方式では，各車両が定期的に Hello メッセージを送信し，他の車両から受信した Hello メッセージを基に隣接車両リストを作成し保持していることを前提とする．Hello には，各車両の i) 現在位置，ii) 進行方向，iii) 保持している複製のうち自身が新しく生成・受信したものから一定数の複製の情報の 3 種の情報を含んでいる（**図 1**）．

RD 方式では，各車両は交差点で複製を 1 ホップのブロードキャストにより送信する．これは，交差点では車両密度が高く，かつ見通し通信可能な車両が多いため，1 度のブロードキャストで多くの端末に複製を受信させることが可能なためである．車両の移動速度や密度のばらつきを考慮すると，情報生成直後に 1 カ所の交差点で 1 度複製の配布を行っただけでは情報発生位置周辺に複製を留めることは困難である．そこで RD 方式では，情報発生位置周辺にある複数の異なる交差点で複製がブロードキャストされるように動作する．すなわち情報の有効期限を満たしている間，情報を生成した車両または複製の再配布を行うように前ホップの車両から指定された車両（複製配布車両）が 1 度だけ情報発生位置周辺

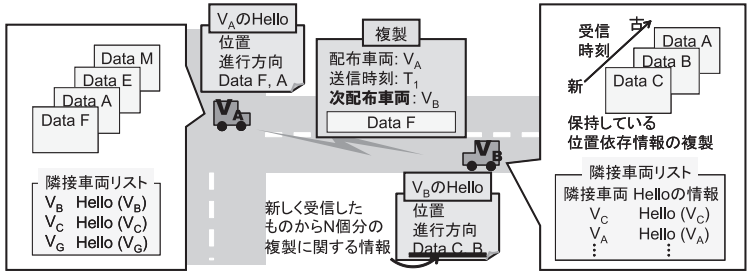


図 1　各車両の保持している情報
Fig. 1　Data held by each vehicle.

の交差点で複製の配布を行う．複製配布車両は，次に複製の配布を行う車両（次配布車両）を指定し，その車両の ID を付加した複製を 1 ホップのブロードキャストにより配布する．複製を受信したすべての車両は，データの有効期限が切れるまでその複製を保持する．複製を受信した車両のうち，次配布車両として指定されている車両は，次に到達した交差点で複製を送信する．

3.3 複製配布処理

複製配布車両は，自身が配布した複製を受信した車両が，それぞれ異なる交差点で複製を再配布するように，保持している隣接車両リストの情報を基に次配布車両を指定し，複製をブロードキャストする．複製を受信した車両は，複製に付加されている情報から自身が次配布車両として指定されているかを確認する．指定されていれば，次に到達した交差点で複製の配布を行う．

筆者らが想定している位置依存情報は，事故情報や道路上で撮影された写真など，特定の位置に関連のある情報である．したがって，その位置周辺でこそ価値があると考えられる．そこで，複製配布を行う範囲（複製配布範囲）を設定し，複製の配布を行う領域を情報発生位置周辺に制限する．複製配布を予定している車両でも，複製配布時にすでに複製配布範囲から外れていた場合には複製の配布は行わない．

3.4 交差点における次配布車両の指定方法

複製を配布する際には，交差点の各方向にいる複数の車両を次配布車両とすることで，それらの車両の移動後，それぞれ異なる交差点での複製の再配布が行われやすくなると考えられる．そこで，複製配布車両（**図 2**：車両 A）は，交差点の各方向にいる複数の車両を次配布車両として指定するために，まず通信可能範囲内にいる車両をグループ化する．次に，

© 2009 Information Processing Society of Japan

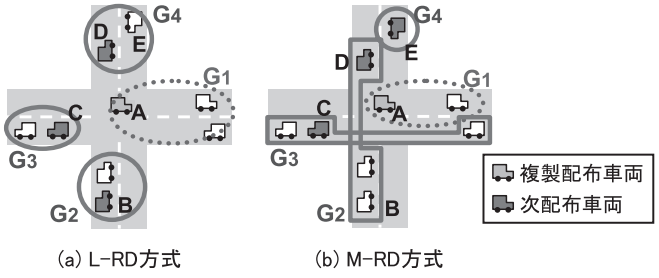


図 2　次配布車両の選択
Fig. 2　Selecting the next data forwarder vehicle.

自身の所属するグループ（図 2：G1）を除く各グループ（図 2：G2〜G4）に対し，1 台ずつ複製の次配布車両を指定し，複製の配布を行う．

なお，通信可能な範囲の境界付近にいる車両を次配布車両として指定しても，移動により複製の送信時には通信ができないことが想定される．このため，実際の通信可能範囲よりも若干小さい範囲内の車両から次配布車両を選択する．

周辺車両のグループ化には，以下の手法を用いる．

3.4.1　位置ベースのグループ化手法（Location based grouping: L-RD）

L-RD 方式では，複製配布車両（図 2 (a)–車両 A）のいる交差点から延びる道路セグメント（交差点間の道路）のうち，各車両が現在存在する道路セグメントを基にグループ化を行う（図 2 (a)）．各グループ内の車両のうち，複製配布車両のいる交差点とは異なる交差点に向かう車両を次配布車両とする（図 2 (a)–車両 C，D）．これらの車両が複数存在する場合には，複製配布車両との通信の確実性を考慮し，複製配布車両からの距離が最も小さい車両を次配布車両とする（図 2 (a)–車両 C）．一方，グループの中で複製配布車両のいる交差点に向かう車両しか存在しない場合には，複製配布車両からの距離が最も大きい車両を次配布車両とする（図 2 (a)–車両 B）．

L-RD 方式では，複製配布直後には複製を配布した交差点から延びる道路セグメントのうち，周辺車両が存在するすべての道路セグメントに次配布車両が存在する状態となる．しかしこの後，次配布車両として指定した車両によって異なる交差点で複製の再配布が行われるとは限らない．たとえば，図 2 (a) では，次配布車両として指定された車両 B，C，D はそれぞれ図の左方向および上方向に移動しており，下方向にある次の交差点では複製の再配布が行われない．

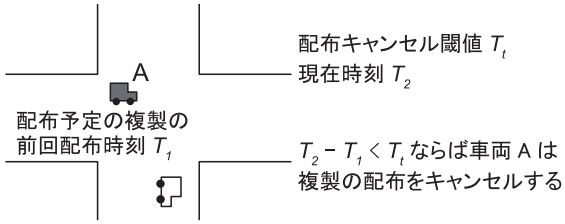


図 3　前回の送受信時刻からの経過時間による複製配布のキャンセル
Fig. 3　Canceling broadcast of replicas using elapsed time from the last send/receive time.

3.4.2　進行方向ベースのグループ化手法（Movement direction based grouping: M-RD）

M-RD 方式では，各車両の進行方向を基にグループ化を行う（図 2 (b)）．各グループから次配布車両を選択する際には，通信の確実性を考慮し，複製配布車両からの距離が最も小さい車両を次配布車両とする（図 2 (b)–車両 C，D，E）．

M-RD 方式では，複製配布直後には次配布車両の位置に偏りがある．しかし，この後各車両が移動することにより，複製が配布された交差点の周辺にある交差点のうち，周辺車両が向かう交差点で複製の再配布が行われることになる．そのため，複製の再配布が行われる交差点を均等に分散させることが可能になると考えられる．

3.5　複製配布トラフィック削減手法

RD 方式では，各車両が交差点で複製配布を行うため，交差点での複製配布トラフィックの増大や，それにともなうパケット衝突の発生が予想される．これらを回避するため，交差点における複製配布のキャンセルを行う手法を RD 方式に追加する．

3.5.1　前回の送受信時刻からの経過時間による配布キャンセル（時間法）

複製配布後，短時間のうちに同じ複製の再配布が行われるのを防ぐため，複製の配布間隔に閾値を設定する．

複製配布車両は，交差点に到達したときに，最後にその複製を自身が送信または他の車両から受信した時刻（前回配布時刻）からの経過時間が，閾値 T_t (s) 未満である場合，配布をキャンセルする（**図 3**）．このために，各車両は自身が保持している各複製の前回配布時刻を記録しておき，i) 他の車両からその複製を受信したとき，ii) 自身がその複製を配布したとき，iii) その複製が他の車両によって配布されたのをオーバヒアしたときにその時刻を更新する．

© 2009 Information Processing Society of Japan

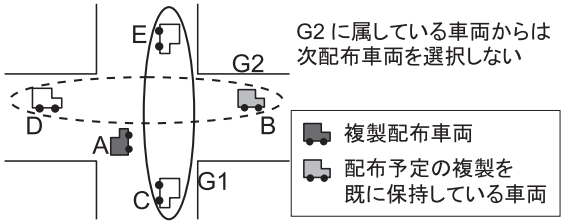


図 4　グループ内の車両の複製保持状況による次配布車両の選択のキャンセル
Fig. 4　Canceling the selection of the next data forwarder vehicle based on the existence of the replica in each vehicle group.

3.5.2　グループ内の車両の複製保持状況による次配布車両の選択および複製配布のキャンセル（グループ法）

各車両は Hello メッセージの交換により，各周辺車両が最近受け取った複製のリストを把握している．この情報を利用し，配布予定の複製をすでに保持している車両がいるグループからは次配布車両の選択を行わないようにする．すべてのグループで次配布車両が選択されなかった場合，複製の送信をキャンセルする．

たとえば**図 4** の例では，複製配布車両 A が配布を予定している複製を，車両 B が保持している．そのため車両 B が所属するグループ（図 4：G2）からは次配布車両を選択しない．

3.5.3　周辺の複製保持車両数による配布キャンセル（周辺保持数法）

複製配布車両は保持している隣接車両リストを参照し，自身が配布を予定している複製をすでに保持している車両が閾値 T_h 台以上存在する場合に，その交差点での配布をキャンセルする．

ネットワーク内の車両密度により複製配布時の隣接車両数は異なる．そのため，T_h が同じ値でも車両密度によりキャンセルの条件の満たしやすさが異なる．したがって，過去の Hello パケットの受信量などから車両密度が推測し，それが大きい場合には T_h の値を大きくするなど，車両密度によって適切な T_h の値を設定することが望ましいと考える．

4. 性 能 評 価

ネットワークシミュレータ JiST/SWANS [10] と交通流シミュレータ NETSIM [11] を用いて RD 方式の性能評価を行った．

4.1　シミュレーションモデルの概要

3,000 [m] × 3,000 [m] の 2 次元平面上に，東西・南北方向の道路を 500 [m] 間隔に 7 本ずつ計 14 本配置した（**図 5**）．この道路を走行する車両が，無線 LAN IEEE802.11b により通信を行う．通信帯域幅を 11 [Mbps] に固定し，通信可能半径は 100 [m] とした．Hello メッセージは，UDP，IP ヘッダを含めて 100 [bytes] のパケットとし，各車両は Hello メッセージを 1 [s] 間隔でブロードキャストする．Hello の有効期限は 1 [s] とし，受信から 1 [s] 経過した時点で隣接車両リストから送信元の車両の要素を削除する．複製配布範囲は，情報が生成された道路セグメントの両端にある交差点までと，その交差点から情報が生成された道路セグメントに直交する方向にある 1 つ先の交差点までとした（**図 6**）．

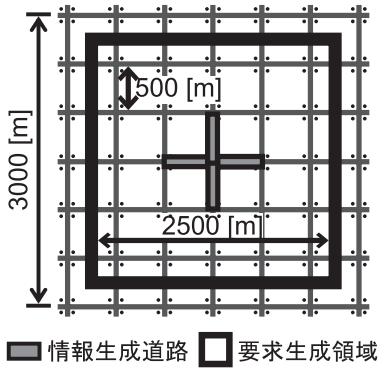


図 5　シミュレーション領域
Fig. 5　Simulation field.

なお，市街地におけるビルなどの障害物による車両間の通信への影響を再現するため，車両の位置を基に通信可能かどうかの判断を行い，通信可能距離内にいる車両どうしの通信を制限した．直交する道路にいる車両どうしが通信を行う際には，共通する交差点からいずれかの車両への距離 D が閾値 T_d [m] 以内であり，かつ車両間距離が通信可能半径以内の場合にのみ通信が可能であるものとした（**図 7**）．NETSIM での道路モデルは道路の幅が 0 として設計されているので，交差点の面積も 0 である．そこで交差点の中心から車両車両 2 台分に相当する距離 10 m を T_d の値として用いた．

4.2　移動モデル

NETSIM を用いて車両の移動シナリオを作成した．各車両は，シミュレーション領域の端にある 28 個の道路端点から流入し，領域内の道路上を自由走行速度 60 [km/h] で移動する．自由走行速度とは，他の車両あるいは交通制御といった障害がない状況を想定した場合

© 2009 Information Processing Society of Japan

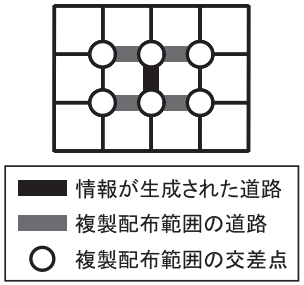


図 6　複製配布範囲
Fig. 6　Replica distribution area.

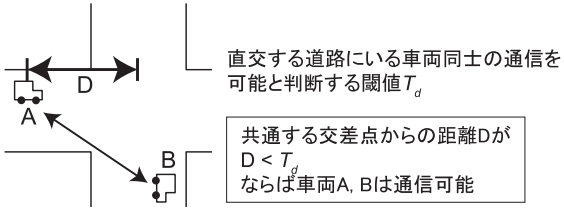


図 7　異なる道路セグメント上の車両間の通信制限
Fig. 7　Limiting communication between vehicles on different road segments.

の車両走行速度のことである．信号待ちや先詰まりなどにより，この速度を超えない範囲で各車両の移動速度は適宜変化する．

シミュレーション領域内に流入した車両は，交差点において各方向に設定されている分岐率（直進：80%，右左折：各 10%）に基づいて移動し，道路の端点に来た時点でそのまま領域から流出する．各道路は両側 1 車線道路とする．また，各交差点には青 26 [s]，黄 3 [s]，赤 31 [s] の 60 [s] 周期で切り替わる信号が設置されている．

単位時間あたりの車両流入台数は，100〜500 台まで 100 台刻みで変化させた．

4.3　情報生成モデル

情報の取扱いを容易にするため，シミュレーション領域内にある各道路セグメントに ID を付与した．各車両は，シミュレーション開始時刻 $t = 0$ から時刻 $t = \tau_g$ までのランダムに決定したタイミングで最初の情報生成イベントを生成し，その後 τ_g 間隔で同イベントを生成する．情報生成イベントが発生すると，車両はそのときに自身が存在する道路セグメントに関する情報を生成する．ただし，複製配布に対するシミュレーション領域の端における車両の流入出の影響を減少させるため，車両が情報を生成する道路セグメント（情報生成道路）をシミュレーション領域の中心にある 4 つの道路セグメント（図 5）のみに制限した．情報生成時刻を迎えた車両のうち，情報生成道路上に存在する車両のみが，実際に情報を生成する．生成される情報は，発生時刻とその情報が生成された道路セグメントの ID を含み，UDP，IP ヘッダを含めて 1,000 [bytes] のパケットで UDP ブロードキャストで配布されるものとした．情報の寿命は 300 [s] とした．なお，今回の評価では複製配布の効果を検証するため，車両の流入車両台数にかかわらずシミュレーションを通して発生する情報の数が 40 程度になるように，**表 1** のように τ_g の値を与えた．

表 1　シミュレーションで使用した τ_g の値
Table 1　Value of τ_g used in simulations.

流入車両台数（台/時間）	100	200	300	400	500
τ_g（秒）	1,550	3,400	5,300	8,850	8,600

4.4　要求生成モデル

各車両は，200 [s] 周期で要求生成イベントを生成する．ただし，要求の配送に対するシミュレーション領域の端における車両の流入出の影響を減少させるため，各車両が要求を生成する領域（要求生成領域）をシミュレーション領域の中心 2,500 [m] 四方（図 5）に制限した．要求生成時刻を迎えた車両のうち，要求生成領域内に存在する車両のみが要求を生成する．情報要求先の道路セグメントは，シミュレーション領域内の全道路セグメントの中から等しい確率で選択される．生成される要求は，情報要求先道路セグメントの ID を含み，UDP，IP ヘッダを含めて 128 [bytes] とした．要求の寿命は 120 [s] とした．

4.5　要求メッセージの配送方法

要求メッセージの宛先位置への配送には，ユニキャストベースの Geocast [12] を用いるものとした．しかし，車両の粗密差が大きい状況では，既存のルーティング手法ををそのまま適用することは難しい．そこで今回のシミュレーションでは，Greedy Forwarding と Carry and Forward を組み合わせた方法により要求メッセージのルーティングを行う．

要求メッセージを生成した車両は，自身の隣接車両リストに登録されている車両の中から，次にその転送を行う車両（次ホップ）を選択する．そして，その車両の ID を付加した要求メッセージをブロードキャストする．要求された情報を保持している車両が要求メッセージを受信した場合には，それ以上要求メッセージの転送は行われない．一方，要求された情報を保持していない車両が要求メッセージを受信した場合には，自身が次ホップとして指定されていれば隣接車両リストを基に次ホップを選択し，要求メッセージをブロードキャストす

© 2009 Information Processing Society of Japan

る．なお，通信可能範囲境界付近の車両との通信失敗を防ぐため，通信可能範囲（100 [m]）よりも若干小さい範囲内（90 [m]）にいる車両の中から次ホップ選択するようにした．

4.5.1　Carry and Forward の利用

Greedy Forwarding による転送中に，周辺に通信可能な車両が存在しない状況において要求メッセージが破棄されてしまうことを防ぐため，以下のような Carry and Forward を利用したパケット転送を行う．

(1)　通信可能範囲内に要求メッセージを転送可能な車両が存在しない場合には，転送可能な車両が Hello メッセージによって検出されるまでパケットを保持（Carry）する．

(2)　Carry 中に要求メッセージまたは Hello メッセージを受信したら，保持している隣接車両リストに登録されている全車両の中から再び次ホップの選択を行う．

(3)　隣接車両リストに要求メッセージを転送可能な車両が存在した場合には Carry を終了し，その車両の ID を付加した要求メッセージをブロードキャストする．転送可能な車両が存在しない場合には，引き続き Carry を行う．

4.5.2　次ホップの選択方法

要求を生成および受信した車両は，隣接車両リストに登録されている車両の中から自身よりも宛先位置に近く，かつ宛先位置に最も近い車両を次ホップとして選択する．ただし，その際に自身が交差点以外におり，隣接車両の中に交差点にいる車両が存在する場合には，その車両よりも宛先位置に近い車両が存在しても，交差点にいる車両を次ホップとする．これは，GPCR[4] でも用いられている手法である．なお，本手法では GPCR とは異なり交差点間の Perimeter Routing を行わない．また，GPCR は Carry and Forward を行うことを規定していないが，本手法では Carry and Forward を行うという違いがある．

基本的な次ホップ選択基準は，以上に示した交差点にいる車両への配送を優先した Greedy Forwarding である．しかし，宛先位置から遠ざかる方向に進んでいる車両がその選択基準で次ホップを選択できなかった場合には，宛先位置から遠ざかる方向に Carry を行うことになり（**図 8** (a)），それにより，要求メッセージの配送性能が低下してしまう可能性がある．そこで，自身が宛先位置から遠ざかっている場合には（図 8 (b)–車両 B），宛先位置に最も近い車両に加え，自身よりも宛先位置から遠くても，宛先位置に近づいている車両（図 8 (b)–車両 A）も次ホップとして選択可能であるものとした．

なお，パケット配送中のループを回避するため，基本的には次ホップ選択処理の後，前ホップの車両が次ホップとして選択されていた場合にはパケットの転送を行わず，Carry に移行する．ただし，宛先位置から遠ざかっている車両が，宛先位置に近づいている車両を次ホップとして選択したとき（図 8：車両 B から A への転送）にのみ，前ホップへのパケット転送を許容するものとした．

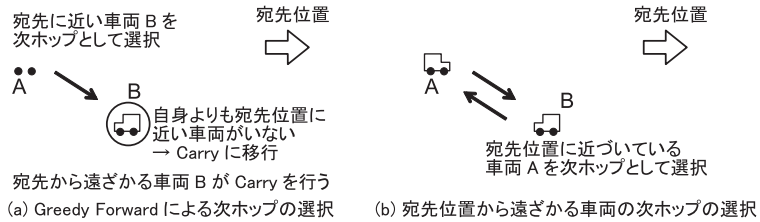


図 8　次ホップの選択
Fig. 8　Selecting the next hop vehicle.

4.6　評価指標

VANET では車両の移動速度が大きいため，要求が生成されて応答が返送されるまでに要求者は要求時の位置から移動している可能性が高い．このとき，要求者の移動先の位置を推定することは難しく，VANET において移動する宛先に対するパケットの配送方法が大きな研究課題とされている．このため，今回のシミュレーションでも要求者に対する応答は行わず，要求された情報を保持している車両に対する要求の到達率を用いて評価を行うこととした．

- 要求到達率

$$A_s = \frac{R_a}{R_g} \tag{1}$$

R_g（Request Generate count）は，要求生成時に要求先の道路セグメントで情報が発生していた場合の要求生成回数，R_a（Request Arrival count）は，対応する情報を保持している車両が要求メッセージを受信した回数である．

このほかに以下の評価指標を用いた．

- 複製配布トラフィック
  生成された情報 1 つあたりの複製ブロードキャスト回数
- 要求到達ホップ数
  対応する情報を保持している車両が要求メッセージを受信したときの，要求生成車両からのホップ数

© 2009 Information Processing Society of Japan

- 要求到達遅延
  要求メッセージが生成されてから，対応する情報を保持している車両がその要求メッセージを受信するまでに要した時間

4.7 評価項目

RD 方式に対する比較手法として次の 3 つを用いた．(i) **No Replica**：複製配布を行わず，情報生成車両のみがその情報を保持する手法．(ii) **1Hop**：情報を生成した車両が，情報生成直後に 1 度だけ 1 ホップのブロードキャストにより複製を配布する手法．(iii) **New Neighbor（NN）方式**：新しい車両が現れた時点で 1 ホップのブロードキャストにより複製を配布する手法．

NN 方式でも RD 方式と同様に，各車両は定期的に Hello メッセージを送信し，他の車両から受信した Hello メッセージにより隣接車両リストの作成および保持を行う．NN 方式では，道路構造を考慮せず，複製配布範囲内において Hello メッセージにより隣接車両リストに含まれていない新しい通信可能車両を検出した時点でその車両を次配布車両とし，その車両の ID を複製に含めて 1 ホップのブロードキャストにより複製を配布する．複製を受信したすべての車両は，情報の有効有効期限が切れるまでその複製を保持する．複製を受信した車両のうち，次配布車両として指定されている車両は，新しい通信可能車両を検出した時点でその車両に対して複製の配布を行う．なお複製配布時には，RD 方式における時間法，周辺保持数法に基づき，配布をキャンセルすることが可能である．

NN 方式は，道路構造を考慮しない位置依存情報の複製配布手法の代表例としての位置づけである．データの属性によるデータの破棄や配送の有無の判定を行わなければ，NN 方式は遭遇した隣接ノード間でデータ配送を行う文献 3)，9) の方法，Abiding Geocast [7] で用いられている隣接法に相当する．Abiding Geocast の選出法と Nomadic Agent [8] のアプローチは，特定領域内の 1 台ないしは複数台の端末を動的に選出してデータ配信を行わせるものである．これらのアプローチを使用する場合，今回のシミュレーション条件下では，個々にデータを発生した車両および要求元がデータ配信を担当する車両を発見する処理，またはフラッディングなどによってデータおよび情報を担当車両に到達させる処理を必要とする．これらの処理においても道路構造を考慮した最適化が考えられることから，今回の比較対象からは外した．Abiding Geocast の選出法と Nomadic Agent のアプローチを使ったもう 1 つの方法としては，データ発生元の車両そのものがデータ配信担当となり，定期的に領域内にデータをフラッディングする方法が考えられる．この場合，フラッディングの間隔の設定が必要となる．ただし，データ配信のフラッディングの処理の効率化のために Carry and Forward の概念を導入すれば，実質的に NN 法に近くなる．

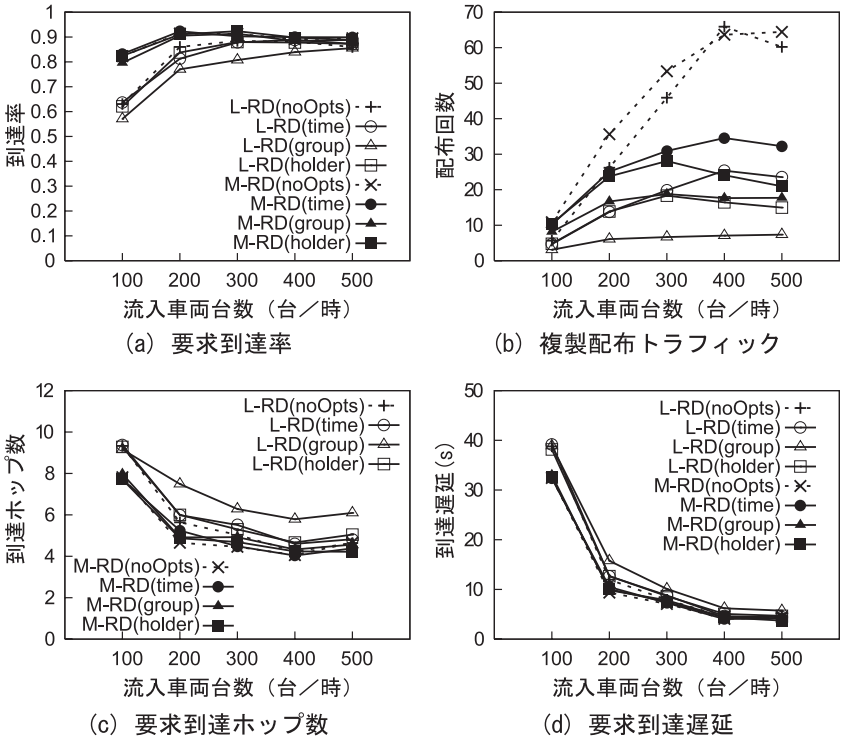


図 9　RD 方式における複製配布トラフィック削減手法の効果の比較
Fig. 9　Comparison of the effect of replica distribuiton traffic reducing methods on RD method.

4.8 結　　果

シミュレーションはシミュレーション上の時間で 3,600 [s] 行った．シミュレーション開始直後と終了間近の各 300 [s] は車両の移動や情報・要求生成の影響を排除するための猶予期間とし，データの計測は行っていない．また，各値はシミュレーション 3 回の平均である．

本節ではまず，3.5 節で述べた複製配布トラフィック削減手法の効果の検証を行う．その後，4.7 節であげた他手法との比較を行う．

4.8.1 複製配布トラフィック削減手法の効果の検証

図 9 に，複製配布トラフィック削減手法の比較を示す．グラフの凡例とトラフィック削減手

© 2009 Information Processing Society of Japan

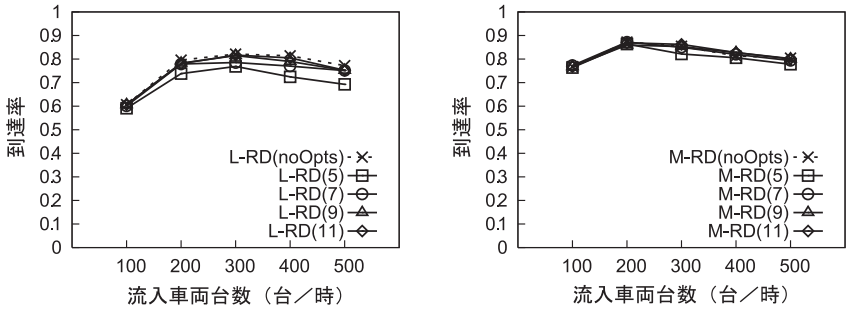


図 10　周辺保持数法による配布キャンセル：要求到達率
Fig. 10　Reachability of request messages of the holder method.

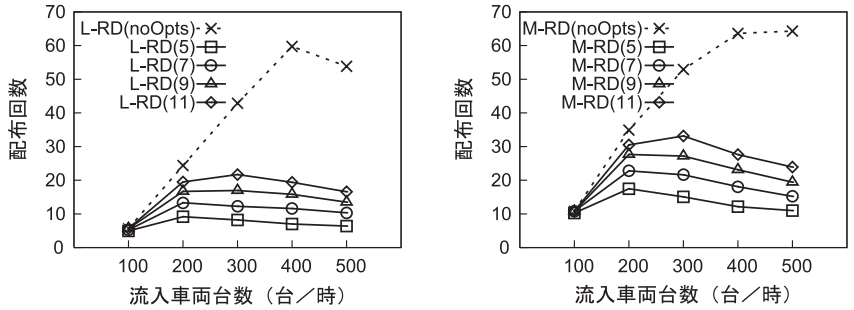


図 11　周辺保持数法による配布キャンセル：複製配布トラフィック
Fig. 11　Replica distribution traffic of the holder method.

法の対応は次のとおりである．noOpts：オリジナルの RD 方式，time：時間法（3.5.1 項，T_t =20 s），group：グループ法（3.5.2 項），holder：周辺保持車数法（3.5.3 項）．なお，Hello に含める保持している複製の情報数は 3 とした．周辺保持数法で使用する T_h の値（3.5.3 項）に関しては，以下のように選択した．一般に，T_h が小さいほど，トラフィックの削減効果は大きくなる．しかしながら，車両流入量が大きい場合，T_h が小さいと相対的に複製保持車両数が少ない場合においても配布キャンセルの条件を満たしやすくなる．つまり，交差点からの各方向の道路セグメントにそれぞれ複製がない場合でも複製の配布がキャンセルされる機会が増える．この結果，キャンセルを行わない場合に比べて要求到達率が悪化する．そこで，周辺保持数法での T_h を変化させて，各車両流入量での要求到達率と配布トラヒックの量を調べ，要求到達率を低下させることなく配布トラフィックを削減可能な T_h の値を得た．**図 10**，**図 11** に，周辺保持数法での要求到達率，複製配布トラヒックを示す．凡例中の（）内の数字は，T_h の値を表す．また**表 2** に図 9 の結果を得るために使用した T_h の値を示す．

図 9 から，M-RD 方式はどのトラフィック削減手法においても要求到達率，要求到達ホップ数，要求到達遅延の値を同程度に保ったまま複製配布トラフィックを削減できていることが分かる．一方，L-RD 方式ではグループ法での各評価指標の値が悪化している．たとえば**図 12** のように 1 台の車両 C が配布予定の複製をすでに保持している状況を考える．M-RD 方式では車両 B と車両 D が次配布車両として指定されて複製が配布される（図 12 (b)）．それに対し，L-RD 方式では車両 A と車両 B，車両 C と車両 D がそれぞれ同じグループになるため，車両 A が次配布車両として指定すべき車両は存在せず，車両 A は複製の配布自体

表 2　シミュレーションで使用した T_h の値
Table 2　Value of T_h used in simulations.

流入車両台数（台/時間）	100	200	300	400	500
T_h（台）	5	7	9	9	9

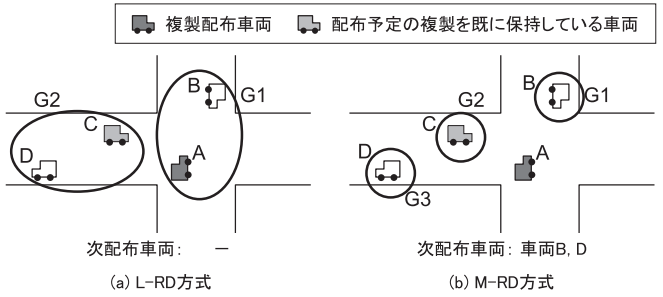


図 12　グループ法でのキャンセルの影響の比較
Fig. 12　Comparison of the effect of cancellation of broadcast by the group method.

をキャンセルしてしまう（図 12 (a)）．

各トラフィック削減手法について比較する．トラフィック削減効果は，グループ法が最も大きく，次に周辺保持数法，時間法の順であった．ただし，図 10，図 11 から分かるように，周辺保持数法を用いる場合でも，グループ法と同程度のアクセス成功率を達成するのであれば，T_h を短くすることができる．このときのトラフィックはグループ法と同程度である．

© 2009 Information Processing Society of Japan

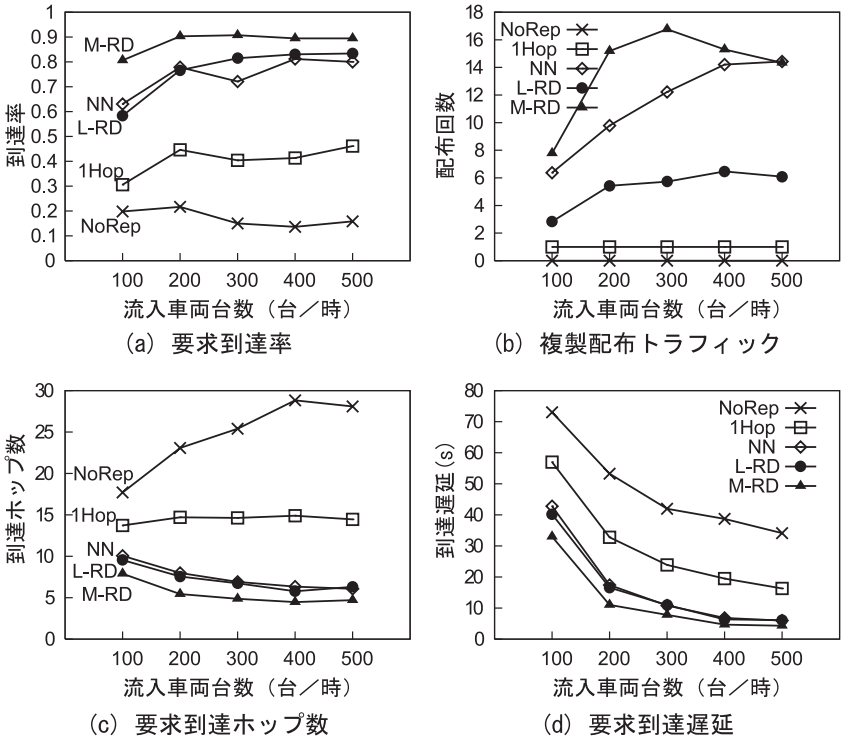


図 13　RD 方式と他手法との比較
Fig. 13　Comparison of RD method and other methods.

時間法では，複製保持車両が周辺に多く存在していたとしても前回の配布から一定時間経過していた場合には複製配布を行ってしまう．そのため，他の 2 つの手法と比較してトラフィック削減効果が少なかったと考えられる．

4.8.2　RD 方式の効果の検証

図 13 に，RD 方式と他の手法（NoRep，1Hop，NN 方式）でのシミュレーション結果を示す．なお，RD 方式では，時間法，グループ法，周辺保持数法のトラフィック削減方式を併用している．NN 方式では時間法，周辺保持数法を併用している．これらのパラメータは，図 9 で示したものと同一であり，T_t を 20 s，T_h を表 2 で示した値としている．

図 13 を見ると，NoRep および 1Hop と比較して RD 方式および NN 方式では要求到達率の向上，要求到達ホップ数・要求到達遅延の低減が達成されており，複製配布の効果が現れていることが分かる．L-RD 方式と NN 方式を比較した場合には，L-RD 方式は少ない複製配布回数で NN 方式と同程度の要求到達率を示している．以上の結果と，各手法における複製配布時の隣接車両台数を比較した**図 14** から，RD 方式では NN 方式と比較して複製配布時の隣接車両数が多く，1 回の配布で効率的に複製の転送が行われていることが分かる．

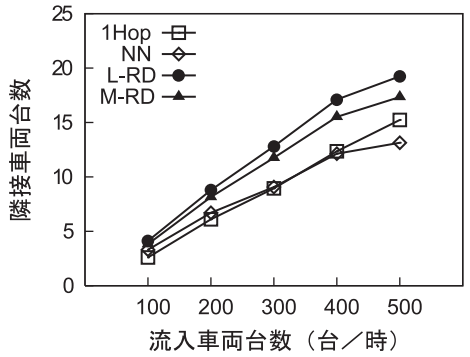


図 14　複製配布時の隣接車両台数
Fig. 14　Number of neighbors on broadcast of replicas.

また，RD 方式では流入量が増加しても一定の複製配布回数を示しているのに対し，NN 方式では流入車両数にとともに複製配布回数が増加している．これは，流入車両台数の増加にともない新たな車両と出会う頻度が高くなることに加え，NN 方式では RD 方式と比較して複製配布時の隣接車両数が少ないため，複製の配布キャンセルの条件を満たしにくかったことが原因であると考えられる．

M-RD 方式は，特に流入車両台数が少ない状況において L-RD 方式，NN 方式と比較して数回の複製配布回数の差で，最大で 20%程度高い要求到達率を示している．この結果から，周辺車両の進行方向を基に異なる交差点に向かう車両を次配布車両として指定する M-RD 方式の効果を確認することができる．さらに M-RD 方式では，要求到達ホップ数，到達遅延が他と比較して低い値を示している．今回の評価では応答の成功率は扱っていないが，応答を返送することを考えた場合には，到達遅延を低く抑えることは重要である．要求メッセージを配送する時間が長くなるほど，要求者は要求時の位置から移動しており，移動先の位置の推定が困難になる．そのため，要求された情報を保持している車両まで要求メッセージが到達しても，応答として返送した情報を要求者が受信することが困難になる．この観点

© 2009 Information Processing Society of Japan

より，M-RD 方式は本論文で想定している Geocast によって要求される位置依存情報の配布に有効であるといえる．

5. ま と め

隣接車両情報を用いた VANET 上の位置依存情報複製配布手法 RD 方式を提案した．シミュレーションによって，RD 方式では交差点で複製を配布することにより，道路構造を考慮せず，新たな車両が現れたときに複製を配布する従来手法と比較して，効率的に複製の配布が行われることを確認した．また，周辺車両の進行方向を基に複製の再配布を行う車両を指定することで，特に車両密度が低い状況下で，周辺車両の現在位置を基に指定した場合と比べ，同程度の複製配布回数で高い要求到達率を示すことをが確かめられた．さらに，周辺車両の複製保持状況により再配布を行う車両の選択をキャンセルすることで，要求到達率を低下させることなく大幅にトラフィックを削減可能であることが分かった．

本論文では，評価指標を Geocast による要求の複製保持車両への到着率としたが，実環境においては，要求に対する応答送信までを含めた要求成功率が重要である．要求成功率は要求の到達率と応答の送信成功率の積となるため，本提案の有効性は要求の高い到着率によって説明可能である．応答成功率は，移動中の要求者に対する経路制御手法に依存するので，本論文の対象外とするが，今後，経路制御手法の開発を行い，組み合わせたうえで評価したい．

謝辞　本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 A（18680008）および（財）中島記念国際交流財団日本人若手研究者研究助成金の研究助成によるものである．ここに記して謝意を示す．

参 考 文 献

1) VICS HOME PAGE. http://www.vics.or.jp/ (参照 2008-03-28)
2) internavi Premium Club. http://www.premium-club.jp/ (参照 2008-03-28)
3) 財団法人機械システム振興協会：センタレスプローブ情報システムの開発に関するフィージビリティスタディ，平成 18 年度システム開発報告書 (2008).
4) Lochert, C., Mauve, M., Fussler, H. and Hartenstein, H.: Geographic Routing in City Scenarios, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*, Vol.9, Issue 1, pp.69–72 (2005).
5) Zhao, J. and Cao, G.: VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE INFOCOM 2006* (2006).
6) Korkmaz, G. and Ekici, E.: Urban Multi-Hop Broadcast Protocol for Inter-Vehicle Communication Systems, *Proc. 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks* (*VANET'04*), pp.76–85 (2004).
7) Maihöfer, C., Leinmuller, T. and Schoch, E.: Abiding geocast: Time-stable geocast for ad hoc networks, *Proc. 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks* (*VANET'05*), pp.20–29 (2005).
8) 屋代智之，LaPorta, T.F.：Nomadic Agent System：インフラに依存しない位置情報サービス提供システム，情報処理学会論文誌，Vol.46, No.12, pp.2952–2962 (2005).
9) Xu, B., Ouksel, A. and Wolfson, O.: Opportunistic Resource Exchange in Inter-Vehicle Ad-Hoc Networks, *Proc. 2004 IEEE International Conference on Mobile Data Management* (*MDM2004*), pp.4–12 (2004).
10) JiST–Java in Simulation Time / SWANS–Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator. http://jist.ece.cornell.edu/index.html (参照 2008-03-28)
11) 交通流シミュレータ NETSIM. http://www.phoenix-r.co.jp/products/netsim/netsim.htm (参照 2008-03-28)
12) Maihöfer, C.: A survey on geocast routing protocols, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2nd quarter issue, Vol.6, No.2 (2004).

(平成 20 年 3 月 28 日受付)
(平成 20 年 10 月 7 日採録)



山中麻理子

平成 18 年静岡大学工学部システム工学科卒業．平成 20 年同大学大学院工学研究科修士課程修了．同年（株）デンソー入社．高度交通システムに興味を持つ．



石原　　進（正会員）

平成 6 年名古屋大学工学部電気工学科卒業．平成 11 年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了．平成 10 年日本学術振興会特別研究員．平成 11 年静岡大学情報学部助手．平成 13 年同大学工学部助教授．現在，静岡大学創造科学技術大学院准教授．博士（工学）．平成 9 年電気通信財団テレコムシステム技術学生賞．モバイルコンピューティング，無線環境用 TCP/IP，モバイルアドホックネットワークに関する研究に従事．電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員．

© 2009 Information Processing Society of Japan