道路地図と交通量情報に基づく車載移動コンピュータネットワークにおけるDTNルーティング

塙 祐樹[1,†1,a)]　桧垣 博章[1,†1,b)]

概要：車載移動コンピュータによって構成されるDTN無線マルチホップネットワークでは, 配送遅延と通信オーバヘッドの適切なトレードオフの実現が困難である. 本論文では, 車載移動コンピュータの分布とは独立に, データメッセージの配送経路を道路地図と交通量情報のみから選択し, 原則としてこの配送経路上にある車載移動コンピュータのみがデータメッセージを中継する配送手法を提案する. 部分道路の直線区間では, 車輌の進行方向とは無関係に中継車載移動コンピュータを選択し, 交差点区間では所望の部分道路上の車載移動コンピュータへの転送を繰返し試みる配送手法を適用する. このようなDTNマルチホップ配送に適切な経路を選択するためには, 直線区間, 交差点区間における配送遅延を評価することでダイクストラ法の適用が可能となる. そこで, 車輌通過がポアソン過程であることを前提とした配送遅延評価法を考案する.

1. はじめに

無線通信デバイスを備えた移動コンピュータ群から構成されるモバイルネットワークでは, 各移動コンピュータによる無線信号送信電力を無制限に大きくすることはしない. これは, 移動コンピュータの通信に要する消費電力を抑制するとともに, 複数の移動コンピュータから送信される無線信号の衝突や衝突回避機構が機能することによってデータメッセージ送信要求を持つ移動コンピュータを待機させる競合の発生を削減し, 配送遅延の延長やスループットの低下を縮小する必要があるためである. そこで, 各移動コンピュータが限られた無線送信電力を用いることを前提とし, 直接通信不可能な距離だけ離れている移動コンピュータ間は中継移動コンピュータによるデータメッセージ群の順次転送を用いる無線マルチホップ配送技術が提案され, アドホックネットワーク, メッシュネットワーク, センサネットワークにおける活用が検討されている.

コンピュータ群の移動によって, それらの隣接関係が経時的に変化するこれらの無線マルチホップネットワークでは, データメッセージ群の配送経路を決定するルーティングとその経路を用いるデータメッセージ配送のために, 固定有線ネットワークとは異なるプロトコルを設計する必要があり, 適用環境条件に応じた多様なプロトコルが提案されている [8]. これらのプロトコルは, 送信元移動コンピュータと送信先移動コンピュータがデータメッセージ群の配送開始から配送終了までの間, 無線マルチホップ接続が維持されており, マルチホップ配送経路が切断した場合でも経路修復や再経路探索によって接続するマルチホップ配送経路が検出可能である環境を想定して設計されている. しかし, 無線マルチホップネットワークの適用環境のコンピュータ分布が一様に疎である, あるいは疎である領域と密である領域とを含む場合には, 送信元移動コンピュータと送信先移動コンピュータとがマルチホップ接続可能な時間がデータメッセージ群の配送に対して十分に長くはない, あるいは最悪の場合にはほとんどマルチホップ接続しないことが考えられる. ただし, このような場合においても, 移動コンピュータの移動頻度が十分に高い場合には, 移動コンピュータがデータメッセージ群を保持して移動することによって, データメッセージを送信先移動コンピュータに到達させることが可能であり, このようなデータメッセージ配送技術を適用したネットワークはDTN (Delay Tolerant Network) と呼ばれる [3]. DTNでは, データメッセージ配送遅延, データメッセージ到達率, 制御メッセージ交換と通信バッファ消費による配送オーバーヘッドのトレードオフが問題となる.

本論文では, 車載移動コンピュータ群からなる無線マルチホップネットワークを対象として, 隣接移動コンピュー

1 東京電機大学
Senju-Asahi 5, Adachi, Tokyo 120–8551 Japan
†1 東京電機大学院ロボット・メカトロニクス学専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University
a) hanawa@higlab.net
b) hig@higlab.net

© 2013 Information Processing Society of Japan

タ間の無線通信によるデータメッセージ転送とデータメッセージを保持したコンピュータの移動との組合せによる到達性の高い無線マルチホップ通信手法を提案する．ここでは, データメッセージの配送を担う車載移動コンピュータが道路上のみに存在することに注目する．そこで，車載移動コンピュータおよび交差点の位置を道路 ID と基準点からの道のりの組として表現し，配送経路を車載移動コンピュータの現在の分布とは独立に送信元車載移動コンピュータから送信先コンピュータまでの部分道路列として与える手法を導入する．データメッセージはこの部分道路列上の車載コンピュータの移動と転送とによって配送されるものとする．このとき, 車載移動コンピュータの分布が疎である領域を含む環境にも適用可能とするために, より配送遅延が短縮されることが見込まれる部分道路列を検出する経路探索手法とこの経路と位置の表現方法に基づいて隣接車載移動コンピュータへデータメッセージ転送するルールを定めることにより, 対向車載移動コンピュータをも活用する直線区間配送と再配送可能な交差点区間配送とを実現するデータメッセージ配送プロトコルを設計する．

2. 従来手法

無線通信デバイスを備えた移動コンピュータ群によって構成される無線マルチホップネットワークを対象としたルーティングプロトコルには, 送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまでのマルチホップ配送経路をデータメッセージ配送に先立って検出, 構築するものとこれを行なわないものとがある．AODV [9], DSR [4], TORA [7] 等の多数のアドホックルーティングプロトコルでは, 経路探索要求メッセージ *Rreq* と経路探索応答メッセージ *Rrep* の交換によってマルチホップ配送経路を探索し, 検出した経路に含まれる中継移動コンピュータの転送機能によってデータメッセージのマルチホップ配送を実現する．これらのプロトコルでは, データメッセージの配送開始から配送終了までの間, 検出したマルチホップ配送経路の接続が維持されるか, 維持できない場合でも経路修復や再経路探索を行なうことによってデータメッセージ配送時間中はマルチホップ接続が維持される程度にコンピュータの移動頻度, 移動速度が低い環境への適用を前提としている．

一方, GEDIR [10], FACE [1], GPSR [5] 等のアドホックルーティングプロトコルでは, 送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまでのマルチホップ配送経路を事前に探索, 検出せず, 各データメッセージごとに中継移動コンピュータが次ホップ中継移動コンピュータを決定してデータメッセージを転送する手法を用いている．これらのプロトコルでは, 各データメッセージごとに配送時点でのネットワークトポロジに応じた経路を検出することから, コンピュータの移動頻度, 移動速度が高い環境においても高いデータメッセージ到達率を実現することが可能である．ただし, 移動頻度, 移動速度が高い環境においても各中継移動コンピュータが次ホップ中継移動コンピュータにデータメッセージを転送できる程度にコンピュータ密度が高い環境への適用が前提となる．

これらのアドホックルーティングプロトコルは, 移動コンピュータの分布密度が比較的高く, 一定時間接続が維持される無線マルチホップ配送経路が構築可能である環境が適用対象となる．一方, 移動コンピュータの分布が比較的疎である場合や位置によって分布密度が大きく異なる場合には, 送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまでを接続する無線マルチホップ配送経路の検出確率が低く, 検出できた場合でもその経路が短時間しか維持されない．

この低接続性を解決する手法として, データメッセージを保持したコンピュータの移動をデータメッセージ配送に用いる手法が提案されており, DTN (Delay-Tolerant Network) 手法と呼ばれている [3]．ここでは, 転送されたデータメッセージを保持する移動コンピュータがこのデータメッセージを転送する次ホップ移動コンピュータを決定することができない場合には, 次ホップ移動コンピュータを決定して転送を行なうまでデータメッセージを保持し続ける．すなわち, データメッセージを保持するコンピュータの移動をデータメッセージ配送の一部に含む手法である．隣接移動コンピュータへのデータメッセージ転送手法は, データメッセージの複製を用いる手法と用いない手法とに分類され, いずれの手法においても転送先隣接移動コンピュータの選択基準がアプリケーションの要求に応じて定められている．

Epdemic Routing 手法 [11] では, データメッセージを保持した移動コンピュータは, 隣接移動コンピュータと保持メッセージリストを交換し, リストを参照して互いに保持していないデータメッセージの複製を転送する手法である．この手法をひとつのデータメッセージの転送に注目すると, 移動を含めて送信元コンピュータからマルチホップ到達可能となったすべての移動コンピュータへとデータメッセージを転送する拡張されたフラッディング手法と解釈することができる．したがって, 高い到達性を持つ一方, 通信オーバヘッドが最も大きな手法となる．

一方、Probabilistic Routing 手法 [6] では, 各移動コンピュータは他の移動コンピュータとの隣接頻度を Aging 手法を用いた指標によって評価し, 保持しているデータメッセージを送信先コンピュータとの隣接頻度が最も高い隣接移動コンピュータへ転送する．データメッセージの複製を用いないためデータメッセージ転送のための通信オーバヘッドが削減されるが, 高い到達性を実現するためには, 各移動コンピュータが他の移動コンピュータとある一定頻度以上で隣接することが必要である．したがって, 比較的小

© 2013 Information Processing Society of Japan

規模で移動頻度の高い環境に適用が限定されると考えられる．なお, これらの手法はコンピュータの移動モデルを特に規定しておらず, 汎用性のある手法として提案されている．

これらの手法では, 各移動コンピュータの現在位置や速度, 今後の移動に関する情報の保持, 交換を行なわない．このため, 配送遅延の延長や通信バッファの消費増などの性能低下を招く問題がある．論文 [2] では, 各コンピュータがオンデマンドに定める移動計画に基づいて移動することを前提として, 隣接移動コンピュータ間で取得済み移動計画を交換し, これに基づいて構成した配送計画に従って次ホップ移動コンピュータを決定する．ただし, 事前に配送計画の策定に必要な移動計画を取得できる程度に移動コンピュータが隣接することが必要である．論文 [12] では, 無線基地局の混在する DTN を対象として, 送信先移動コンピュータの移動計画が未取得であっても配送計画を策定可能とする拡張を提案している．

本論文では, 比較的疎に分布する車載移動コンピュータを用いたマルチホップ配送実現手法を提案する．車載移動コンピュータは, 交差点における信号機による進行制御等の影響によって, その分布密度差が領域によって大きく異なり, 疎に分布する領域では無線マルチホップ接続が困難である．また, 各車載移動コンピュータの移動は, その移動要求によって定まることから, データメッセージ転送を考慮した移動を行なうことはできない．ただし, 各車載移動コンピュータは道路に沿ってのみ移動が可能であることから, ランダムに移動するコンピュータを想定する論文 [6,11] とは異なり, 移動に対する道路による制約をデータメッセージ転送先決定等に用いることが可能である．

3. 提案手法

3.1 道路地図に基づくデータメッセージ配送

本論文では, 車載移動コンピュータを中継移動コンピュータとする DTN 手法による無線マルチホップ配送の実現手法を提案する．ここでは, 送信先は固定コンピュータもしくは指定位置, 指定領域に含まれる車載移動コンピュータに限定する．すなわち, 送信先は位置で指定するものとする．車載移動コンピュータから送信された無線信号は, その到達範囲内に含まれるすべての隣接車載移動コンピュータによって受信される．データメッセージの無線マルチホップ配送では, データメッセージの転送先としてこれらの隣接車載移動コンピュータのうちの 1 台が選択される．一般のアドホックルーティングプロトコルに基づくデータメッセージ配送を適用する場合には, この選択がそれぞれの隣接車載移動コンピュータが存在する道路とは独立になされる．車載移動コンピュータの分布が密である場合には, データメッセージを受信した車載移動コンピュータが存在する道路とは無関係に次ホップ移動コンピュータを決定できる可能性が高い．しかし, 車載移動コンピュータの分布が疎である場合には, データメッセージを受信した車載移動コンピュータが次ホップ移動コンピュータを決定できない場合, それを保持したまま移動する．このコンピュータの移動先をあらかじめ知ることができないため, データメッセージ配送のエンドエンド配送遅延の拡大やメッセージ到達率の低下を招くことになる．

そこで本論文では, データメッセージ配送経路を部分道路列として与え, (原則として)[*1] この部分道路列に含まれる車載移動コンピュータがデータメッセージを順次マルチホップ転送する方法を提案する．データメッセージ配送に用いる部分道路列は, 送信元車載移動コンピュータの位置と送信先の位置とから, 道路地図を交通量情報を用いて探索, 検出する．この経路検出には現在の車載コンピュータ分布情報を用いないことから, (後述するように) 隣接車載コンピュータ間での現在位置情報の交換のみを要する．また, 道路地図と交通量情報がすべての車載移動コンピュータで共有されていることを前提とすることで, 経路を各中継車載コンピュータで再計算しても同一の結果を導くことで経路情報の配送が不要となる．転送されたデータメッセージを受信した車載移動コンピュータは, 自身の無線信号到達範囲に含まれる隣接車載移動コンピュータのうち, 送信先までの部分道路列に含まれる自身よりも送信先に近い隣接車載移動コンピュータへデータメッセージを転送する．このような隣接車載移動コンピュータが存在しない場合には, それを検出可能となるまでデータメッセージを保持したまま移動する．

本手法は, 中継移動コンピュータの識別子列で経路を指定する従来のアドホックルーティングに比べて, 中継領域や中継点, 経由道路といった移動コンピュータの分布とは独立に定められる指標によって経路を定めるため, 移動速度, 移動頻度の高いコンピュータ群からなる無線マルチホップネットワークへの適用に優れている．また, 経路探索を道路地図と交通量情報を用いて行なうことで道路に沿った配送経路を用い, データメッセージ配送遅延の短縮, 到達率の向上を実現するものである．

3.2 道路 ID による位置と経路の表現

本論文では, 道路は分岐のない両端点を持つ曲線とし, 図 1 に示すように各道路には識別子 (道路 ID) が付与されているものとする．また, いずれかの端点を原点 (零点) とし, 道路上の各点を道路 ID と原点からの道のりで表すものとする．これによって, 車載移動コンピュータ V_i の位置 $L(V_i)$ は, 道路 ID R_i と原点からの道のり d_i の 2 項組として $L(V_i) = (R_i, d_i)$ と表される．また, 交差点は, それを含む複数の道路の識別子を用いて複数の 2 項組で表される．

*1 交差点において中継車載コンピュータが転送先隣接車載コンピュータを検出できない場合に配送経路外の部分道路をデータメッセージが配送されることがある．

© 2013 Information Processing Society of Japan

図 1　道路 ID とデータメッセージ配送経路

提案手法では, 送信元車載移動コンピュータから送信先コンピュータまでのデータメッセージ配送経路を道路地図と交通量情報によって探索, 検出し, 部分道路列として表す. ここで部分道路とは, 両端点を含むすべての点が単一道路に含まれる曲線であり, 両端点を表す 2 項組 (R, d^s), (R, d^d) の組 $((R, d^s), (R, d^d))$ として表される. また, データメッセージ配送経路は, 送信元車載移動コンピュータ, 交差点, 送信先コンピュータを端点とする部分道路列である. したがって, 経路は $(((R_0, d_0^s), (R_0, d_0^d)) \ldots ((R_n, d_n^s), (R_n, d_n^d)))$ となる. ただし, (R_0, d_0^s) は送信元車載移動コンピュータの現在位置, (R_n, d_n^d) は送信先コンピュータの位置, (R_{i-1}, d_{i-1}^d) と (R_i, d_i^s) はともに i 番目の交差点 X_i の位置である.

3.3　データメッセージ配送プロトコル

提案手法では, 3.2 節で述べたように, 道路 ID と原点からの道のりで車載移動コンピュータ位置や交差点位置を表現する. 本章では, この表現方法を用いて, 道路に沿ってデータメッセージを無線マルチホップ配送する手法を提案する. 提案手法では, 送信元車載移動コンピュータから送信先コンピュータまで各データメッセージを独立にルーティングすることで, データメッセージ群の無線マルチホップ配送を実現する. このとき, フラッディングのようなデータメッセージのコピーを行なうことはせず, データメッセージはすべてユニキャスト転送される. 送信元車載移動コンピュータもしくは前ホップ中継車載移動コンピュータからユニキャスト転送されたデータメッセージを受信した中継車載移動コンピュータは, 以下の方法で隣接コンピュータの位置情報を取得する.

[隣接コンピュータ位置取得]

1) 隣接車載移動コンピュータから転送されたデータメッセージを受信した中継車載移動コンピュータ V_i は, 隣接コンピュータに位置情報要求メッセージ *Nreq* をブロードキャスト送信する.
2) *Nreq* を受信したコンピュータ V_n は, 自身の位置 $L(V_n)$ を含む位置情報応答メッセージ *Nrep* を V_i へユニキャスト送信する. □

次に, 取得した位置情報を用いて, 以下のルールにしたがって次ホップ隣接コンピュータを選択し, データメッセージをユニキャスト転送する.

[次ホップ隣接コンピュータ選択手法]

以下の選択ルールを順に適用し, 最初に条件を満足する隣接コンピュータを次ホップとしてデータメッセージを転送する (図 2). ただし, 自身が選択された場合は, データメッセージを保持する (図 3).

1) 送信先コンピュータ
2) 道路 ID が配送経路の部分道路列で送信先に最も近く, その部分道路内で最も次の交差点に近い車載移動コンピュータ
3) 道路 ID が同一で, その道路内で最も次の交差点に近い車載移動コンピュータ □

本手法を直線道路区間, 交差点道路区間に適用した場合のデータメッセージ配送について順に説明する.

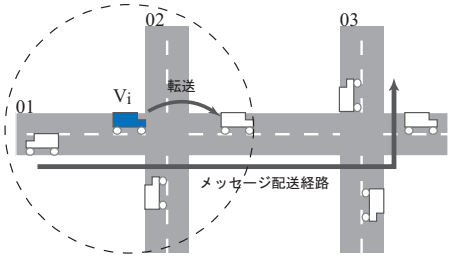

図 2　車車間通信による配送

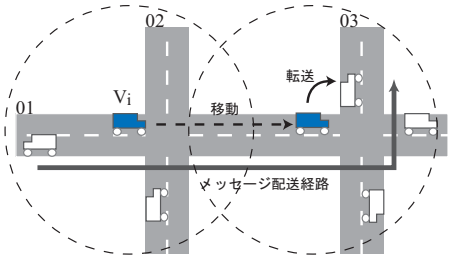

図 3　移動による配送

3.3.1　直線区間におけるデータメッセージ転送

隣接車載移動コンピュータから転送されたデータメッセージを受信した中継車載移動コンピュータ V_i は, 自身の無線信号到達範囲に含まれるコンピュータ V_j の位置情報 $L(V_j)$ を取得する. ここで, データメッセージの配送経路が $(((R_0, d_0^s), (R_0, d_0^d)) \ldots ((R_n, d_n^s), (R_n, d_n^d)))$ であり $L(V_i) = (R_i, d_i)$ である場合, V_i の無線信号到達範囲に交差点 $X_i(R_i, d_i^d)$ を含まないならば, データメッセージは道路 R_i 上の隣接車載移動コンピュータで最も X_i に近いものへ転送される. すなわち, $R_j = R_i$ かつ $|d_j - d_i^d|$ が最小となる V_j が V_i の次ホップ隣接車載移動コンピュータとなる. このとき, 他の道路 $R_k \neq R_i$ 上にある隣接車載移動コンピュータ V_k には $|V_k D| < |V_j D|$ (D は送信先コン

© 2013 Information Processing Society of Japan

ピュータ) である場合でもデータメッセージを転送しない. これは, 提案手法が道路地図を用いて検出された部分道路列で示される配送経路に沿ってデータメッセージを配送することでデータメッセージの到達性を高めるものである.

また, V_j の移動方向は, V_i の次ホップ車載移動コンピュータの選択においては考慮しない. V_j の次ホップコンピュータを決定するには, V_j およびその隣接コンピュータの位置だけが問題となるのであって, 次ホップ決定に要する時間の V_j の移動距離によるわずかな影響を除けば, 移動方向によるデータメッセージ配送性能の影響は小さいと考えられる. V_j が R_i 上で X_i の方向に移動している場合, 次ホップ移動コンピュータを決定できない V_j がデータメッセージを保持したまま交差点 X_i に近づく方向へと移動する, すなわち移動によってデータメッセージを配送することができる点は有効である. 一方, V_j が R_i 上で X_i と逆の方向に移動している場合 (図 4), V_j がより X_i に近い隣接車載移動コンピュータを検出することができなくても, V_i と V_j が R_i 上で交差して $|d_i d_i^d| < |d_j d_i^d|$ となったときに V_j がデータメッセージを V_i へと再転送する (図 5). これに, データメッセージの転送コストを要するものの, エンドエンド転送時間は延長していない. したがって, V_j がより X_i に近い隣接車載移動コンピュータへデータメッセージを転送することでエンドエンド転送時間を短縮する可能性があることを考慮し, 提案手法では V_j の移動方向とは無関係に転送することとする.

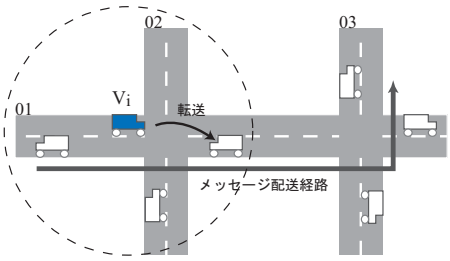

図 4　移動方向の異なる車載移動コンピュータへの転送

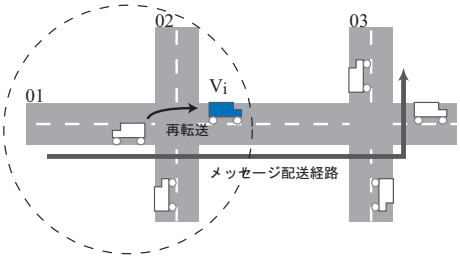

図 5　移動方向の異なる車載移動コンピュータからの再転送

3.3.2　交差点区間におけるデータメッセージ転送

隣接車載移動コンピュータから転送されたデータメッセージを受信した中継車載移動コンピュータ V_i は, 自身の無線信号到達範囲に含まれるコンピュータ V_j の位置情報 $L(V_j)$ を取得する. ここで, データメッセージの配送経路が $(((R_0, d_0^s), (R_0, d_0^d)) \ldots ((R_n, d_n^s), (R_n, d_n^d)))$ であり $L(V_i) = (R_i, d_i)$ である場合, V_i の無線信号到達範囲に交差点 $X_i(R_i, d_i^d)$ を含むならば, データメッセージは道路 R_{i+1} 上の隣接車載移動コンピュータで最も $X_{i+1}(R_{i+1}, d_{i+1}^d)$ に近いものへ転送される (図 6). すなわち, $R_j = R_{i+1}$ かつ $|d_j - d_{i+1}^d|$ が最小となる V_j が V_i の次ホップ隣接車載移動コンピュータとなる. 3.3.1 節で述べた直線区間における転送と同様に交差点区間においても, 送信先コンピュータとの距離や V_j の移動方向とは無関係に V_j を選択する.

ここで, V_i が次ホップ車載移動コンピュータを決定できないまま X_i を通過し, これを自身の無線信号到達範囲に含まなくなることが考えられる. V_i が X_i 通過後に道路 R_{i+1} 上を移動する場合には, 次ホップ隣接コンピュータ選択手法 1) と 2) に従えばよい. V_i が X_i 通過後も道路 R_i 上を移動し続ける場合には, 保持しているデータメッセージを通過した X_i により近い R_i 上の隣接車載移動コンピュータへと転送する必要があるが, これも次ホップ選択手法 1) と 2) に従って実現することができる.

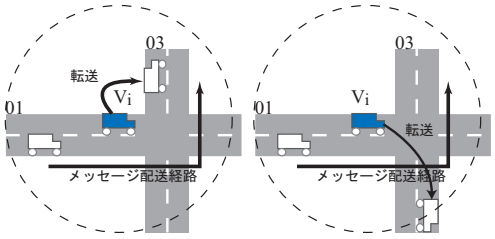

図 6　交差点区間における転送

3.4　交通量情報による経路探索

送信元車載移動コンピュータから送信先コンピュータまでの無線マルチホップ配送経路を部分道路列として探索, 検出する提案手法においては, 一般的に複数の配送経路候補が検出可能である. このとき, 配送遅延のより短い経路を用いることが望ましいが, 提案手法では車載移動コンピュータの現在位置や論文 [2,12] における移動計画を配送経路探索に用いない. そこで, 各部分道路における交通量情報を用いて, 部分道路におけるデータメッセージの通過時間と各交差点部分における通過時間を評価し, この評価に基づいて無線マルチホップ配送経路を決定する手法を提案する.

[13] には, 各部分道路における交通量情報として単位時間あたりの平均通過車輛数と平均車輛速度が記載されている. これを用いることで, 直線区間においては, 可能な限り

© 2013 Information Processing Society of Japan

データメッセージを無線マルチホップ配送を用い, 車輌間距離が無線信号到達範囲を越える場合にはデータメッセージを保持して移動する提案手法では, 平均通過車輌数が多く平均車輌速度が低い場合には車輌間距離が無線信号到達範囲内にある可能性が大きくなり, 配送遅延の短縮が期待できる一方, 平均車輌速度が高い場合にはデータメッセージを保持した移動を短時間で終えることが期待できる. また, 交差点区間においては, 交差点方向へと配送されるデータメッセージを保持した車載移動コンピュータが所望の部分道路上に位置する車載移動コンピュータと通信可能になる (互いに無線信号到達範囲に含まれる) 可能性が高いほど, データメッセージの交差点通過を短時間で実現することが可能である.

交差点 X_{i-1}, X_i を端点とする部分道路 $((R_i, d_i^s), (R_i, d_i^d))$ の単位時間あたりの平均通過車輌数が TR_i, 平均車輌速度が v_i であるとき, 平均車輌到着間隔は $1/TR_i$ である. ここで, 車輌の到着がポアソン過程に従うと過程すると, 車輌到着間隔が t である確率密度 $f(t)$ は次式で与えられる.

$$f(t) = \frac{1}{TR_i} e^{-\frac{t}{TR_i}} \tag{1}$$

すべての車輌が v_i で移動していると仮定すると, 距離 $L := |d_i^s - d_i^d|$ の直線区間の配送は以下のようになされる. (1) 車輌間隔が無線信号到達範囲 R 以下であるならば, データメッセージが転送される. (2) 車輌間隔が R を越えるならば, 以降はデータメッセージは保持される. 車輌間隔が R 以下となるのは車輌到着間隔が R/v 以下となる場合であり, その確率は $\int_0^{R/v} f(t)dt$, R/v を越える確率は $\int_{R/v}^{\infty} f(t)dt$ となる. 車輌間隔 t のときデータメッセージの転送距離は vt であることから, 距離 L の平均配送遅延は次式で与えられる.

$$\int_0^{\frac{R}{v}} \cdots \int_0^{\frac{R}{v}} \left(\prod_{v\sum_{i=1}^{n-1} t_i < L,\, v\sum_{i=1}^{n} t_i \geq L} f(t_i) \right) \tau n dt_1 \cdots dt_n$$
$$+ \int_{\frac{R}{v}}^{\infty} \int_0^{\frac{R}{v}} \cdots \int_0^{\frac{R}{v}} \left(\prod_{v\sum_{i=0}^{n-1} t_i < L} f(t_i) \right) f(t_n)$$
$$\left(\tau(n-1) + \frac{L - v\sum_{i=1}^{n-1} t_i}{v} \right) dt_1 \cdots dt_n \tag{2}$$

(2) 式の第 1 項と第 2 項は, 部分道路の端点から端点まで無線マルチホップ配送のみでデータメッセージが到達可能である場合と途中で隣接車載移動コンピュータ間の距離が R を越えるためにデータメッセージを保持して端点まで移動する場合とを表している.

次に, 図 7 のような直交道路の交差点区間におけるデータメッセージ配送遅延を評価する. 各パラメータは図に示すように, 左方からの平均通過車輌数を TR_{x+}, 平均車輌速度を v_{x+}, 上方への平均通過車輌数を TR_{y-}, 平均車輌速度を v_{y-}, 右方からの平均通過車輌数を TR_{x-}, 平均車輌速度を v_{x-} とする. 車載移動コンピュータの無線信号到達範囲を R とし, データメッセージを保持する左方からの車載移動コンピュータが交差点から R 以上離れた位置から保持し続けている場合 (ケース 1) と, 距離が R 以下の位置で左方の隣接車載移動コンピュータからデータメッセージを受信した場合 (ケース 2) とに分けて考える.

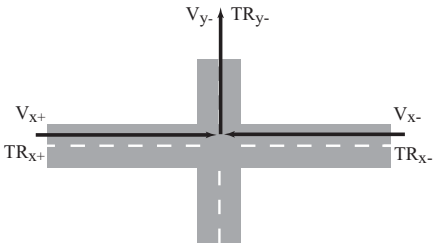

図 7 交差点配送遅延評価のパラメータ

(ケース 1)
左方からのデータメッセージを保持した車載移動コンピュータから交差点までの距離が R となった時刻を 0 とすると, 時刻 t においてこの車載移動コンピュータの無線信号到達範囲に含まれる上方へ向かう車載移動コンピュータの交差点出発時刻 t' は次式を満足することが必要である.

$$R^2 - (R - v_{x+}t)^2 \geq (v_{y-}(t - t'))^2 \tag{3}$$

これを $t' \geq t$ という条件のもとで t' について解くと次式となる.

$$t - \frac{\sqrt{v_{x+}t(2R - v_{x+}t)}}{v'_{y-}} \leq t' \leq t \tag{4}$$

$0 \leq t \leq R/v_{x+}$ であり, $v_{x+} \geq v_{y-}$ であるならば, この区間において (4) 式の左辺は単調減少であることから次式が得られる.

$$\left(\frac{1}{v_{x+}} - \frac{1}{v_{y-}} \right) R \leq t' \leq 0 \tag{5}$$

時間 $[0, 2R/v_{x+}]$ においては交差点が左方からの車載移動コンピュータの無線信号到達範囲に含まれることから, v_{x+} と v_{y-} との大小関係とは無関係にこの時間に出発した上方への車載移動コンピュータへデータメッセージを転送することが可能である. したがって, $v_{x+} \geq v_{y-}$ である場合の転送可能な出発時間は $(1/v_{x+} - 1/v_{y-})R \leq t' \leq 2R/v_{x+}$, $v_{x+} \leq v_{y-}$ である

© 2013 Information Processing Society of Japan

場合の転送可能な出発時間は $0 \le t' \le 2R/v_{x+}$ である．この条件を満たす t' が得られる確率 P_{xy+} は, 指数分布のマルコフ性から次式で与えることができる．

$$\begin{aligned} P_{xy+} &= \int_{\left(\frac{1}{v_{x+}}-\frac{1}{v_{y-}}\right)R}^{\frac{2R}{v_{x+}}} f(t)\,dt\,(v_{x+} \ge v_{y-}) \\ &= \int_0^{\frac{2R}{v_{x+}}} f(t)\,dt\,(v_{x+} \le v_{y-}) \end{aligned} \tag{6}$$

同様に, 右方からの車載移動コンピュータから上方への車載移動コンピュータへのデータメッセージ転送確率 P_{xy-} は次式で与えることができる．

$$\begin{aligned} P_{xy-} &= \int_{\left(\frac{1}{v_{x-}}-\frac{1}{v_{y-}}\right)R}^{\frac{2R}{v_{x-}}} f(t)\,dt\,(v_{x-} \ge v_{y-}) \\ &= \int_0^{\frac{2R}{v_{x-}}} f(t)\,dt\,(v_{x-} \le v_{y-}) \end{aligned} \tag{7}$$

(ケース 2)
左方からの車載コンピュータが交差点からの距離 $R' \le R$ でデータメッセージを左方の隣接車載コンピュータから受信した時刻を 0 とすると, 時刻 t においてこの車載移動コンピュータの無線信号到達範囲に含まれる上方へ向かう車載移動コンピュータの交差点出発時刻 t' は次式を満足することが必要である．

$$R^2 - (R' - v_{x+}t)^2 \ge (v_{y-}(t-t'))^2 \tag{8}$$

これを $t' \ge t$ という条件のもとで t' について解くと次式となる．

$$t - \frac{\sqrt{R^2 - (R' - v_{x+}t)^2}}{v'_y} \le t' \le t \tag{9}$$

$0 \le t \le R'/v_{x+}$ であり, $v_{x+}R \ge v_{y-}R'$ であるならば, この区間において (9) 式の左辺は単調減少であることから次式が得られる．

$$\frac{R'}{v_{x+}} - \frac{R}{v_y} \le t' \le 0 \tag{10}$$

時間 $[0, (R'+R)/v_{x+}]$ においては交差点が左方からの車載移動コンピュータの無線信号到達範囲に含まれることから, v_{x+} と v_{y-} との大小関係とは無関係にこの時間に出発した上方への車載移動コンピュータへデータメッセージを転送することが可能である．したがって, $v_{x+}R \ge v_{y-}R'$ である場合の転送可能な出発時間は $R'/v_{x+} - R/v_{y-} \le t' \le (R'+R)/v_{x+}$, $v_{x+}R \le v_{y-}R'$ である場合の転送可能な出発時間は $0 \le t' \le (R'+R)/v_{x+}$ である．この条件を満たす t' が得られる確率 P_{xy+} は, 指数分布のマルコフ性から次式で与えることができる．

$$\begin{aligned} P'_{xy+} &= \int_{\frac{R'}{v_{x+}}-\frac{R}{v_{y-}}}^{\frac{R'+R}{v_{x+}}} f(t)\,dt\,(v_{x+}R \ge v_{y-}R') \\ &= \int_0^{\frac{R'+R}{v_{x+}}} f(t)\,dt\,(v_{x+}R \le v_{y-}R') \end{aligned} \tag{11}$$

同様に, 右方からの車載移動コンピュータから上方への車載移動コンピュータへのデータメッセージ転送確率 P_{xy-} は次式で与えることができる．

$$\begin{aligned} P'_{xy-} &= \int_{\frac{R'}{v_{x-}}-\frac{R}{v_{y-}}}^{\frac{R'+R}{v_{x-}}} f(t)\,dt\,(v_{x-}R \ge v_{y-}R') \\ &= \int_0^{\frac{R'+R}{v_{x-}}} f(t)\,dt\,(v_{x-}R \le v_{y-}R') \end{aligned} \tag{12}$$

ケース 1 とケース 2 のそれぞれの発生確率は, 式 (2) と同様の考察から以下のように求められる．

$$\begin{aligned} P_1 &= \int_0^{\frac{R}{v}} \cdots \int_0^{\frac{R}{v}} \left(\prod_{v\sum_{i=1}^{n-1} t_i < L-R,\, v\sum_{i=1}^{n} t_i \ge L-R} f(t_i) \right) dt_1 \cdots dt_n \\ P_2 &= \int_{\frac{R}{v}}^{\infty} \int_0^{\frac{R}{v}} \cdots \int_0^{\frac{R}{v}} \left(\prod_{v\sum_{i=0}^{n-1} t_i < L-R} f(t_i) \right) f(t_n)\,dt_1 \cdots dt_n \end{aligned} \tag{13}$$

したがって, データメッセージ転送時間を τ, データメッセージを保持する水平方向の部分道路上の車載移動コンピュータの交差点からの距離が R 以上となってから再度 R 以下となるまでの平均時間を T とするとき, データメッセージがこの交差点を通過する平均時間は次式で与えられる．

$$\frac{P_+\left((2-(1-P_+P_-))P_+\right)\left((1-P_-)+2P_-(1-P_+)\right)}{(1-P_+P_-)^2}T+\tau \tag{14}$$

ただし、$P_+ = 1 - \left(P_1P_{xy+} + P_2P'_{xy+}\right)$
$P_- = 1 - \left(P_1P_{xy-} + P_2P'_{xy-}\right)$

以上のように, 各部分道路と各交差点におけるデータメッセージ配送遅延を評価することができる．これを用いてダイクストラ法により求められた送信元車載移動コンピュータから送信先コンピュータまでの経路 (部分道路列) をデータメッセージ配送経路として, 各中継車載移動コンピュータが次ホップの隣接車載移動コンピュータを決定し, データメッセージを転送する．

4. 実験

本章では, 3.4 節で考案したデータメッセージ配送経路

© 2013 Information Processing Society of Japan

(部分道路列) 探索のための配送性能評価のうち, 直線区間を配送されるデータメッセージの配送遅延について簡単なシミュレーション実験を行ないその結果を述べる.

まず, 単一方向の車載移動コンピュータ列を配送されるデータメッセージの配送遅延を評価する. ここでは, 車載移動コンピュータは単位時間あたりの平均通過車輌数の逆数を平均到着間隔とするポアソン過程に従って部分道路の端点を出発し, すべて平均車輌速度で移動するものとして他の端点に到着するまでの時間を評価する. 図 8 は, 平均車輌速度 40km/h, 1 時間あたりの平均通過車輌数 500–2,500 台における 1,000m の部分道路におけるデータメッセージ配送遅延を測定した結果である. 通過車輌数 TR の増加とともに配送遅延が短縮しているのは, 無線マルチホップ接続区間が延長することによってデータメッセージを保持して走行する区間が短縮する効果によるものである. 一方, 図 9 は, 1 時間あたりの平均通過車輌数を 500 台に固定して, 平均車輌速度を 20–40km/h として 1,000m の部分道路におけるデータメッセージ配送遅延を測定した結果である. 車輌速度の増加とともに配送遅延がやや短縮しているのは, 車載移動コンピュータがデータメッセージを保持して移動する時間が短縮することによるものである. 次に, 対向車輌のある双方向の車載移動コンピュータ列を配送されるデータメッセージの配送遅延を評価する. 車載移動コンピュータの移動モデルは単一方向の場合と同一である. また, ここでは両方向の単位時間あたりの平均通過車輌数, 平均車輌速度が等しい場合についてのみ評価する.

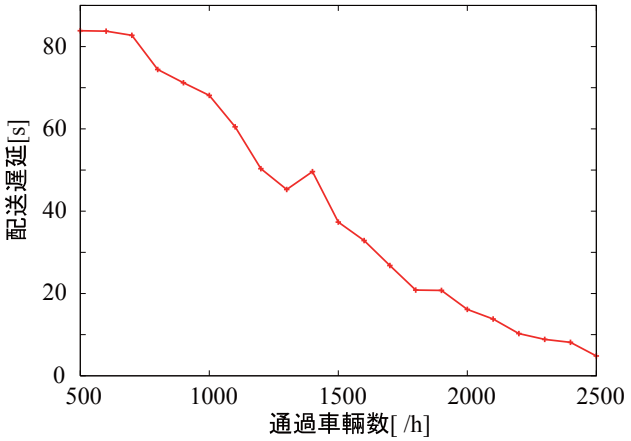

図 8　単方向路における平均通過車輌数に対する配送遅延

図 10 は, 平均車輌速度 40km/h, 1 時間あたりの平均通過車輌数 500–2,500 台における 1,000m の部分道路におけるデータメッセージ配送遅延を測定した結果である. 通過車輌数 TR の増加とともに指数関数的に配送遅延が短縮しているのは, 無線マルチホップ接続区間が延長することによってデータメッセージを保持して走行する区間が短縮する効果によるものである. また, 図 8 と比較すると単方向路に対して双方向路の場合は大幅に配送遅延が短縮していることが分かる. これは一度次ホップ車載移動コンピュータが検出できない状態になっても車両の移動によって無線マルチホップ配送を再開することが可能となるためである. 一方, 図 11 は, 1 時間あたりの平均通過車輌数を 500 台に固定して, 平均車輌速度を 20–40km/h として 1,000m の部分道路におけるデータメッセージ配送遅延を測定した結果である. 車輌速度の増加とともに車輌間隔が広がることで

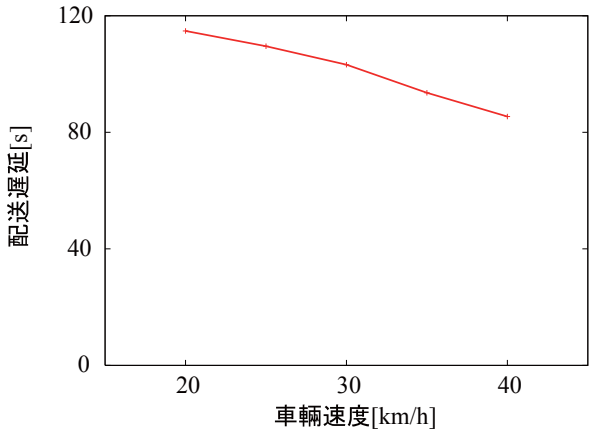

図 9　単方向路における平均車輌速度に対する配送遅延

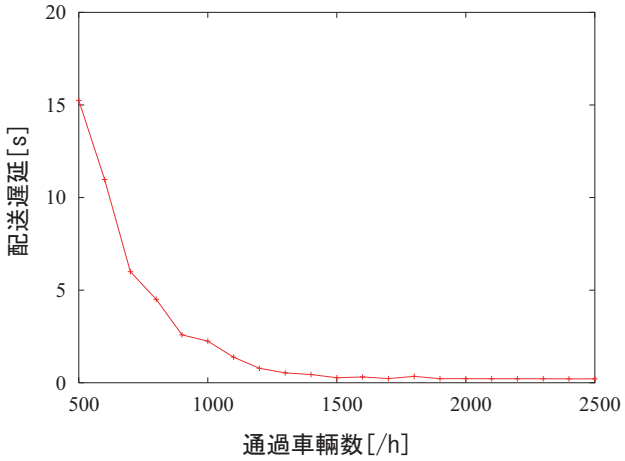

図 10　双方向路における平均通過車輌数に対する配送遅延

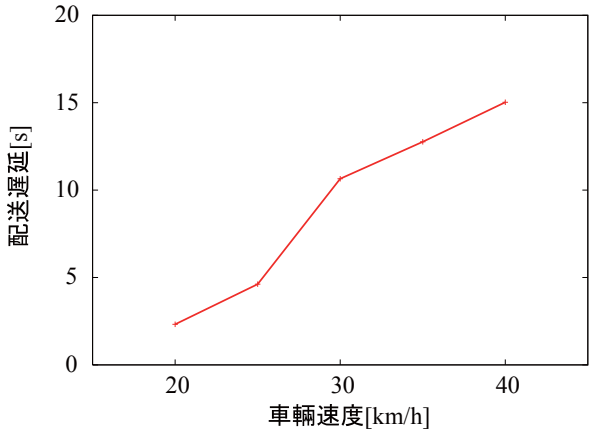

図 11　双方向路における平均車輌速度に対する配送遅延

© 2013 Information Processing Society of Japan

無線マルチホップ配送区間が短縮して配送遅延が延長する効果とデータメッセージを保持して移動する区間の移動時間が短縮することで配送遅延が短縮する効果とが考えられるが, ここでは前者による効果がより強く影響していることが分かる.

5. まとめと今後の課題

本論文では, 車載移動コンピュータの現在位置とは独立に道路地図に基づいて定めた部分道路列をデータメッセージの配送経路とする DTN ルーティング手法を提案した. 部分道路の直線区間では, データメッセージの配送方向前方に位置する隣接車載移動コンピュータへその進行方向とは無関係に転送する. また, 部分道路が接続する交差点区間では, データメッセージの配送方向に従って部分道路列に従った車載移動コンピュータ間のデータメッセージ転送を行なう. ただし, 所望の部分道路に隣接車載移動コンピュータが含まれない場合があり, この場合は交差点区間を通過したデータメッセージを再度交差点方向へと転送することで, 繰返し交差点区間の通過を試みる方法を適用する. このとき, 配送遅延の短い経路を選択するためには, 直線区間, 交差点区間の通過のための配送遅延を評価することが必要であり, 本論文では, 単位時間あたりの平均通過車輛数と平均車輛速度という交通量情報を用いる評価方法を提案した. また, 直線区間について, 配送遅延評価のための簡単なシミュレーション実験を行なった. 今後は, 直線区間についてのより詳細な評価実験を行なうとともに, 交差点区間における評価実験を行ない, 提案した経路評価法を取り入れた経路探索による配送遅延評価実験を行なう.

参考文献

[1] Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., “Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks,” Proceedings of the 3rd International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, pp. 48–55 (1999).

[2] Chigira, Y. and Higaki, H., “DTN Routing of Data Messages with Epidemic Distribution of Mobility Plans of Mobile Wireless Nodes,” Proceedings of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks, pp. 81–87 (2011).

[3] Forrell, S. and Cahill,V., “Delay- and Disruption-Tolerant Networking,” Artech House (2006).

[4] Johnson, D.B., Maltz, D.A., Hu, Y.C. and Jetcheva, J.G., “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks,” Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-04.txt (2000).

[5] Karp, B. and Kung, H.T., “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks,” Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 243–254 (2000).

[6] Lindgren, A., Doria, A and Schelen, O., ”Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks,” Lecture Notes in Conputer Science, No. 3126, pp. 239–254 (2004).

[7] Park, V. and Corson, S., “Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification,” Internet Draft, draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt (2001).

[8] Perkins, C.E., “Ad Hoc Networking,” Addison-Wesley (2000).

[9] Perkins, C.E. and Royer, E.M., “Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing,” Proceedings of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 90–100 (1999).

[10] Stojmenovic, I. and Lin, X., “GEDIR: Loop-Free Location Based Routing in Wireless Networks,” Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, pp. 1025–1028 (1999).

[11] Vahdat, A. and Becker, D., “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” Technical Report CS- 200006, Duke University (2000).

[12] 岩井, 桧垣, “移動計画に基づく DTN 通信における送信先移動計画未取得時のルーティング手法,” 情処研報, Vol. 2013-DPS-154, No. 38, pp. 1–8 (2013).

[13] 国土交通省, “全国道路・街路交通情勢調査（道路交通センサス）一般交通量調査,“ http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/ (2010).

© 2013 Information Processing Society of Japan