

道路地図と交通量情報に基づく車載移動端末による DTNルーティング手法

埜 祐樹^{1,a)} 桧垣 博章^{1,b)}

概要：車載無線移動端末の DTN 通信によるデータメッセージ配送経路を道路地図情報に基づいて検出し、データメッセージを検出経路に沿って DTN 配送する手法を提案した。このように、配送経路を静的な広域情報のみで検出し、各中継車載無線移動端末のデータメッセージ転送先の決定においては、局所的な動的情報である位置情報を隣接車載無線端末とのみ交換することで実現できる。データメッセージ配送経路の探索においては、複数の経路が候補として検出されることが考えられるが、このときデータメッセージ配送遅延のより短い経路を選択することが好ましい。一般に、車載端末密度が高い、すなわち、車輛のトラフィックが高いほど無線マルチホップ配送によりデータメッセージを転送できる可能性が高く、車輛速度が高いほど車載端末移動によるデータメッセージ配送遅延を短縮する。本論文では、平均交通量と平均車輛速度という部分道路の統計情報により、候補配送経路の配送遅延を評価する手法を提案する。

DTN Routing for Vehicle-Mounted Wireless Terminals based on Road Map and Statistical Traffic Information

Abstract: The authors have proposed a novel DTN routing for vehicle-mounted wireless terminals where data message transmission routes are detected based on the location of the source and the destination terminals and a static road map. Here, a data message transmission route is given as a sequence of street segments. An appropriate next-hop terminal is determined based on only location information of neighbor terminals which is dynamic but local information. For selection of a data message transmission route from multiple candidate ones, it is required for the routes to be evaluated their expected transmission delay. This paper proposes a method for evaluation of transmission delay of data messages along each street segment and at each intersection. Since the proposed evaluation is based on statistical information, no additional communication overhead is required for selection of transmission routes.

1. はじめに

著者らはこれまでに、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た、隣接移動コンピュー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した。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した。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、データメッセージ配送経路の探索においては、複数の経路が候補として検出されることが考えられるが、このときデータメッセージ配送遅延のより短い経路を選択することが好ましい。一般に、車載端末密度が高い、すなわち、車輛のトラフィックが高いほど無線マルチホップ配送によりデータメッセージを転送できる可能性が高く、車輛速度が高いほど車載端末移動によるデータメッセージ配送遅延を短縮する。本論文では、平均交通量と平均車輛速度という部分道路の統計情報により、候補配送経路の配送遅延を評価する手法を提案する。

¹ 東京電機大学大学院ロボット・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

2. DTN ルーティング手法

2.1 道路地図に基づくデータメッセージ配送

論文 [7] 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した。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。

そこで論文 [7] 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した。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

*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。

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。

2.2 道路 ID による位置と経路の表現

本手法では、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。

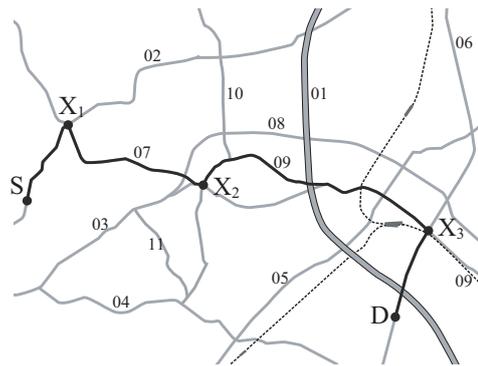


図 1 道路 ID とデータメッセージ配送経路

本手法では、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 $((R_0, d_0^s), (R_0, d_0^d)) \dots ((R_n, d_n^s), (R_n, d_n^d))$ 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。

2.3 データメッセージ配送プロトコル

本手法では、2.2 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示す。本手法では、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。

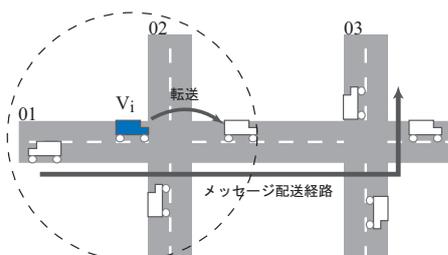


図2 車車間通信による配送

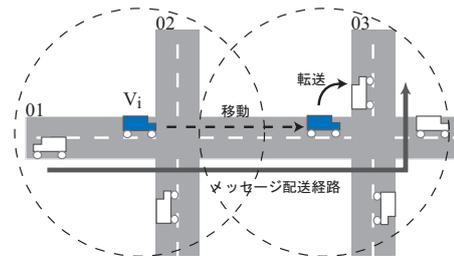


図3 移動による配送

2.3.1 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 $((R_0, d_0^s), (R_0, d_0^d)) \dots ((R_n, d_n^s), (R_n, d_n^d))$ 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。

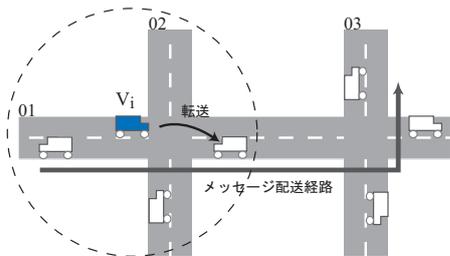


図 4 移動方向の異なる車載移動コンピュータへの転送

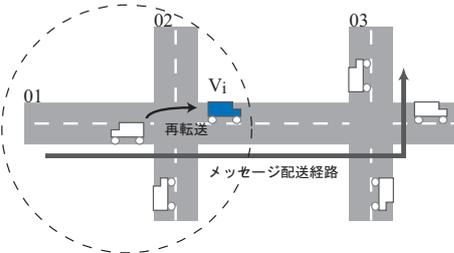


図 5 移動方向の異なる車載移動コンピュータからの再転送

2.3.2 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 $((R_0, d_0^s), (R_0, d_0^d)) \dots ((R_n, d_n^s), (R_n, d_n^d))$ 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。2.3.1 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 を通過後に道路 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 を通過後も道路 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。

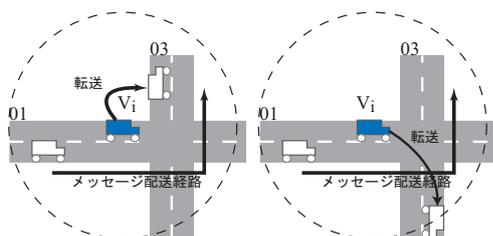


図 6 交差点区間における転送

2.4 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、道路地図という静的な情報のみで経路候補を検出し、中継車載移動コンピュータを局所的な情報のみで選択する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, 13] における移動計画を配送経路探索に用いるべきではない。そこで、統計情報である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。

2.4.1 部分道路に沿った配送遅延の評価

[14] 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両数と平均車両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、可能な限りデータメッセージを無線マルチホップ配送を用い、車輪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、平均通過車両数が多く平均車両速度が低い場合には車輪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、平均車両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わ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 $X(R, d^s), X'(R, d^d)$ を端点とする部分道路 (X, X') の単位時間あたりの平均通過車両数が TR 、平均車両速度が v であるとき、平均車両到着間隔は $1/TR$ である。ここで、車両の到着がポアソン過程に従うと過程すると、車両到着間隔が t である確率密度 $f(t)$ は次式で与えられる。

$$f(t) = \frac{1}{TR} e^{-\frac{t}{TR}} \quad (1)$$

すべての車両が v で移動していると仮定すると、距離 $L := |d^s - d^d|$ の直線区間の配送は以下のようなされる。(1) 車両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) 車両間隔が 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。車両間隔が R 以下となるのは車両到着間隔が 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。車両到着間隔 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1ホップの転送時間 τ を用いて次式で与えられる。

$$\int_0^{\frac{R}{v}} \cdots \int_0^{\frac{R}{v}} \left(\prod_{i=1}^{n-1} f(t_i) \right) \tau n dt_1 \cdots dt_n$$

$$0 < L/v - \sum_{i=1}^{n-1} t_i \leq t_n$$

$$+ \int_{\frac{R}{v}}^{\infty} \int_0^{\frac{R}{v}} \cdots \int_0^{\frac{R}{v}} \left(\prod_{i=1}^{n-1} f(t_i) \right) f(t_n)$$

$$L/v - \sum_{i=0}^{n-1} t_i > 0$$

$$\left(\tau(n-1) + \frac{L}{v} - \sum_{i=1}^{n-1} t_i \right) dt_1 \cdots dt_n \quad (2)$$

(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。

2.4.2 交差点における配送遅延の評価

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輛数を TR_{x+} 、平均車輛速度を v_{x+} 、上方への平均通過車輛数を TR_{y-} 、平均車輛速度を v_{y-} 、右方からの平均通過車輛数を TR_{x-} 、平均車輛速度を 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。

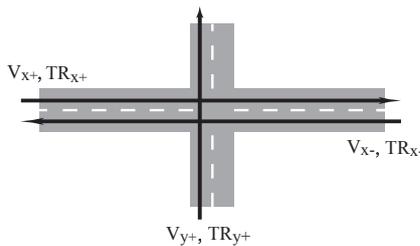


図7 交差点配送遅延評価のパラメータ

(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。

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

これを $0 \leq t \leq 2R/v_{x+}$ という条件のもとで t' について解

くと次式となる。

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

ここで、 $g(t) = t - \frac{\sqrt{v_{x+}t(2R - v_{x+}t)}}{v_{y+}}$ とすると、 $g'(t) = 1 - v_{x+}(R - v_{x+}t)/v_{y+}\sqrt{v_{x+}t(2R - v_{x+}t)}$ となる。 $g'(t) = 0$ を解くと $t = R(1 - v_{y+}/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2})/v_{x+}$ となり、このとき $g(t)$ は極小値 $R(1 - \sqrt{(v_{x+}/v_{y+})^2 + 1})/v_{x+}$ をとる。一方、 $h(t) = t + \frac{\sqrt{v_{x+}t(2R - v_{x+}t)}}{v_{y+}}$ とすると、 $h'(t) = 1 + v_{x+}(R - v_{x+}t)/v_{y+}\sqrt{v_{x+}t(2R - v_{x+}t)}$ となる。 $h'(t) = 0$ を解くと $t = R(1 + v_{y+}/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2})/v_{x+}$ となり、このとき $h(t)$ は極大値 $R(1 + \sqrt{(v_{x+}/v_{y+})^2 + 1})/v_{x+}$ をとる。

以上により、これらの車載移動コンピュータ間でデータメッセージを交換できる t' の範囲は、

$$R \left(1 - \sqrt{(v_{x+}/v_{y+})^2 + 1} \right) / v_{x+} \leq t'$$

$$\leq R \left(1 + \sqrt{(v_{x+}/v_{y+})^2 + 1} \right) / v_{x+} \quad (5)$$

となる。

この条件を満たす t' が得られる確率 P_{xy+} は、 $R(1 + \sqrt{(v_{x+}/v_{y+})^2 + 1})/v_{x+} - R(1 - \sqrt{(v_{x+}/v_{y+})^2 + 1})/v_{x+} = 2R\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}/v_{x+}v_{y+}$ と指数分布のマルコフ性から次式で与えることができる。

$$P_{xy+} = \int_0^{2R\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}/v_{x+}v_{y+}} f(t) dt \quad (6)$$

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。

$$P_{xy-} = \int_0^{2R\sqrt{v_{x-}^2 + v_{y+}^2}/v_{x-}v_{y+}} f(t) dt \quad (7)$$

(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 $R' \leq R$ 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。

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

これを $0 \leq t \leq (R + R')/v_{x+}$ という条件のもとで t' について解くと次式となる。

$$t - \frac{\sqrt{R^2 - (R' - v_{x+}t)^2}}{v_{y+}} \leq t' \leq t + \frac{\sqrt{R^2 - (R' - v_{x+}t)^2}}{v_{y+}} \quad (9)$$

ここで、 $g(t) = t - \sqrt{R^2 - (R' - v_{x+t})^2}/v_{y+}$ とすると、 $g'(t) = 1 - (R'v_{x+} - v_{x+t}^2)/v_{y+} \sqrt{R^2 - (R' - v_{x+t})^2}$ となる。 $g'(t) = 0$ を解くと $t = R'/v_{x+} - v_{y+}R/v_{x+} \sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}$ となり、 $0 < R' < v_{y+}R/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}$ ならば $g(t)$ は $t = 0$ で極小値 $-\sqrt{R^2 - R'^2}/v_{y+}$ をとる。 $v_{y+}R/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2} \leq R' < R$ のとき $g(t)$ は $t = R'/v_{x+} - v_{y+}R/v_{x+} \sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}$ で極小値 $R'/v_{x+} - R\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}/v_{x+}v_{y+}$ をとる。一方、 $h(t) = t + \sqrt{R^2 - (R' - v_{x+t})^2}/v_{y+}$ とすると、 $h'(t) = 1 + (R'v_{x+} - v_{x+t}^2)/v_{y+} \sqrt{R^2 - (R' - v_{x+t})^2}$ となる。 $h'(t) = 0$ を解くと $t = R'/v_{x+} + v_{y+}R/v_{x+} \sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}$ となり、このとき $h(t)$ は極大値 $R'/v_{x+} + R\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}/v_{x+}v_{y+}$ をとる。

以上により、これらの車載移動コンピュータ間でデータメッセージを交換できる t' の範囲は、 $0 < R' < v_{y+}R/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}$ のとき、

$$\begin{aligned} & -\sqrt{R^2 - R'^2}/v_{y+} \leq t' \\ & \leq R'/v_{x+} + R\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}/v_{x+}v_{y+} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。また、 $v_{y+}R/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2} \leq R' < R$ のとき、

$$\begin{aligned} & R'/v_{x+} - R\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}/v_{x+}v_{y+} \leq t' \\ & \leq R'/v_{x+} + R\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}/v_{x+}v_{y+} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。

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。

$0 < R' < v_{y+}R/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}$ のとき、

$$P'_{xy+} = \int_0^{R'/v_{x+} + R\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}/v_{x+}v_{y+} + \sqrt{R^2 - R'^2}/v_{y+}} f(t) dt \quad (12)$$

$v_{y+}R/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2} \leq R' < R$ のとき、

$$P'_{xy+} = \int_0^{2R'/\sqrt{v_{x+}^2 + v_{y+}^2}} f(t) dt \quad (13)$$

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。

$$P_1 = \int_0^{\frac{R}{v}} \cdots \int_0^{\frac{R}{v}} \left(\prod_{0 < (L-R)/v - \sum_{i=1}^{n-1} t_i \leq t_n} f(t_i) \right) dt_1 \cdots dt_n \quad (14)$$

$$P_2 = \int_{\frac{R}{v}}^{\infty} \int_0^{\frac{R}{v}} \cdots \int_0^{\frac{R}{v}} \left(\prod_{(L-R)/v - \sum_{i=0}^{n-1} t_i > 0} f(t_i) \right) f(t_n) dt_1 \cdots dt_n \quad (15)$$

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 以上となつてから再度 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。

$$\begin{aligned} & \tau + P_+(1 - P_-)T + P_+P_-(1 - P_+) \cdot 2T \\ & + P_+^2P_-(1 - P_-) \cdot 3T + P_+^2P_-^2(1 - P_+) \cdot 4T + \cdots \\ & = \tau + P_+(1 - P_-)T \sum_{i=1}^{\infty} (2i - 1)(P_+P_-)^{i-1} \\ & + P_+P_-(1 - P_+)T \sum_{i=1}^{\infty} 2i(P_+P_-)^{i-1} \\ & = \tau + \frac{P_+T}{(1 - P_+P_-)^2} ((1 - P_-)(1 - P_+P_-) \\ & + 2P_+P_-(2 - (P_+ + P_-))) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \text{ただし、} P_+ = 1 - (P_1P_{xy+} + P_2P'_{xy+}) \\ & P_- = 1 - (P_1P_{xy-} + P_2P'_{xy-}) \end{aligned}$$

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。

3. まとめ

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 ルーティング手法において配送遅延の短い経路を選択するために、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手法を提案した。ここでは、単位時間あたりの平均通過車輦数と平均車輦速度という統計情報を用いて経路を選択するため通信オーバーヘッドを要さない。今後は、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.

- 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 Computer Science, No. 3126, pp. 239–254 (2004).
- [7] Oka, H. and Higaki, H., “Wireless Multihop Communication in Sparse Vehicular Ad-Hoc Networks,” International Journal of Internet Protocol Technology, vol. 4, no. 2, pp. 115–125 (2009).
- [8] Park, V. and Corson, S., “Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification,” Internet Draft, draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt (2001).
- [9] Perkins, C.E., “Ad Hoc Networking,” Addison-Wesley (2000).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Vahdat, A. and Becker, D., “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” Technical Report CS- 200006, Duke University (2000).
- [13] 岩井, 稔垣, “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).
- [14] 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).