

分散管理された端末移動計画に基づく DTN ルーティング手法

千明 陽^{†1} 岩井 正敏^{†2} 桧垣 博章^{†1}

移動無線ノードの低密度分布環境において、無線マルチホップ配送とノード移動の組み合わせによってデータメッセージの高い到達性を実現する耐遅延ネットワーク (Delay-Tolerant Network) におけるルーティング手法を提案する。データメッセージの複製を行わないルーティング手法では、次ホップノードの選択基準が配送性能に大きな影響を与える。本論文では、各ノードが自身の保持する複数ノードの移動計画を隣接ノードに伝達し、各ノードが保持する複数ノードの移動計画に基づいて複数ホップのデータメッセージ転送を予測計算し、より適切な次ホップノードを選択してデータメッセージを転送することで、より到達性の高いメッセージ配送を実現する。

DTN Routing Protocol based on Locally Advertised Mobility Plans

YO CHIGIRA,^{†1} MASATOSHI IWAI^{†2} and HIROAKI HIGAKI^{†1}

In an environment with sparse distribution of mobile wireless nodes, conventional wireless multihop ad-hoc routing protocols are inefficient due to less available neighbor nodes for detection of next-hop nodes. Thus, DTN (Delay-Tolerant Network) routing is required, which supports combination of wireless multihop transmissions and a store-carry-forward method. This paper proposes a localized advertisement method of mobility plans where each node advertises all the achieved mobility plans to its neighbor node and a routing method for data message transmissions where each node determines its next-hop node based on the achieved mobility plans. The methods are expected to realize higher reachability of data messages with lower communication and computation overheads.

1. はじめに

データメッセージの無線マルチホップ配送によって互いに無線信号到達範囲に含まれない無線ノードによるネットワークアプリケーションの実行を可能とする無線アドホックネットワーク、無線メッシュネットワーク、センサネットワークの実現技術が研究開発されている。ここでは、無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードが Store and Forward 方式でデータメッセージを次ホップ中継無線ノードへと順次転送することが可能である程度に高い密度で無線ノードが分布していることが前提となっている。しかし、移動無線ノードが比較的低密度に分布する環境においては、このような安定的な無線マルチホップ配送経路を高い確率で検出し、データメッセージ群を配送するのに必要な時間だけ接続を維持し続けることは、必ずしも容易ではない。そこで、Store-Carry-Forward 方式を採用した DTN (Delay-Tolerant Network) 技術の検討が開始されている。ここでは、比較的低密度に分布する移動無線ノードを中継ノードとした無線マルチホップ配送を、隣接無線ノードへのデータメッセージの転送とデータメッセージを保持した移動とを組み合わせることによって実現する。このとき、より通信オーバーヘッドが低く、データメッセージの到達性がより高い配送手法が求められる。これを実現するひとつの方法が、移動無線ノードの移動計画を活用するものである。全域的な移動無線ノードの移動計画が事前に決定しており、これをすべての移動無線ノードに拡散、周知しておくことが可能な宇宙船を利用した惑星間通信等において、有効な手法であると考えられている。しかし、各無線ノードが自律的かつ実時間的に移動計画を策定する環境においては、移動計画を広域に分布する多数の移動無線ノードが共有することは困難である。本論文では、移動無線ノードの移動計画を局所的に無線マルチホップ転送で拡散、周知することで、より高い到達性をより低いオーバーヘッドで実現する手法を考案する。本論文では、各移動無線ノードがランダムウェイポイントモデルに従って移動することを想定する。

2. 関連研究

移動無線ノード集合 $\mathcal{M} = \{M_i\}$ から構成される無線マルチホップネットワーク $\mathcal{N} =$

^{†1} 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

^{†2} 東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

$\langle \mathcal{M}, \mathcal{L} \rangle$ を考える。ここで、 \mathcal{L} は隣接移動無線ノード M_i, M_j 間の無線通信リンク $\langle M_i M_j \rangle$ の集合 $\{\langle M_i M_j \rangle\}$ である。 M_i と M_j の間の通信は、これらの間の距離 $|M_i M_j|$ が無線信号到達距離 R 以下である場合のみ可能であることから、 \mathcal{L} は時間経過とともに変化する。無線アドホックネットワークやセンサネットワークでは、送信元移動無線ノード $M^s (= M_0)$ と送信先移動無線ノード $M^d (= M_n)$ との間の無線通信リンク $\langle M^s M^d \rangle$ が存在しない場合には、中継移動無線ノード列 $M_1 \dots M_{n-1}$ を介した無線マルチホップ配送が用いられる。ここでは、 M^s から M^d への無線マルチホップ経路 $\mathcal{R} := \|\langle M^s M_1 \dots M_{n-1} M^d \rangle\|$ を高い確率で検出し、データメッセージ群を M^s から M^d へ無線マルチホップ配送する時間は、 \mathcal{R} の接続が維持されるか、あるいは配送経路に含まれる無線通信リンク $\langle M_i M_{i+1} \rangle$ のいずれかが切断された場合でも、迂回経路探索や再経路探索によって直ちに別の無線マルチホップ配送経路を検出できる程度に移動無線ノード密度が高いことを前提としている。この前提に基づいて、移動無線ノードの移動頻度、移動速度等のネットワーク特性に応じた様々なルーティングプロトコルが提案されている⁷⁾。

しかし、移動無線ノードの分布密度が低く、各移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれる隣接移動無線ノードが少数あるいは多くの時間に存在しない場合には、無線マルチホップ配送経路を検出することは困難であり、検出できた場合でもデータメッセージ群を配送するのに必要な時間、この経路の接続を維持し続けることが必ずしも可能ではない^{*1}。そこで、無線マルチホップ配送途中のデータメッセージを保持する移動無線ノードがこのデータメッセージを転送するべき隣接移動無線ノードを検出できない場合には、これを検出してデータメッセージを転送することが可能になるまでデータメッセージを保持して移動し続ける Store-Carry-Forward 方式を採用した DTN ルーティング技術が提案されている⁶⁾。すなわち、無線マルチホップ配送とデータメッセージを保持した無線ノードの移動とを組み合わせることによって、安定した無線マルチホップ配送経路を検出、維持することが困難な環境においても、データメッセージを送信元無線ノードから送信先無線ノードまで配送することを可能とするものである。ただし、データメッセージの配送遅延は拡大し、より高い通信オーバーヘッドを必要とすることが一般的に言えることから、その技術を適用するためには、これらの問題を解消あるいは縮小する手法が必要とされている。

DTN ルーティングは、無線ノードの移動が制御可能であることを前提とする手法、無線

ノードの移動は制御できないものの、事前あるいは実時間的に以降の移動(移動計画)の一部あるいはすべての移動無線ノードが取得可能であることを前提とする手法、一部の無線ノードの移動はすべての移動無線ノードに周知されていることを前提とする手法、すべての移動無線ノードが自律的に移動計画を策定することを前提とする手法とに分類することができる。

無線ノードの移動が制御可能であることを前提とする手法には、Message Ferrying¹⁰⁾ と呼ばれるものがある。これは、専らデータメッセージを保持して移動し、適切な隣接ノードに対してこれらのメッセージを転送することを役割とする移動無線ノードがネットワークに存在することを前提とする手法である。データメッセージの配送要求の発生に対して、データメッセージの保持、配送を担う移動無線ノードの移動をどのように計画するかが重要な問題となる。論文²⁾等では、DTNに含まれるすべての無線ノードの今後の移動(移動計画)が事前にあるいは実時間的にすべての移動無線ノードが取得可能であることを前提としたルーティング手法が提案されている。ここでは、送信元無線ノードが送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路をすべての無線ノードの移動計画に基づいて決定する、すなわち、どの中継移動無線ノードがいつまでデータメッセージを保持し、どの隣接移動無線ノードにどのタイミングでデータメッセージを転送するかをすべて決定することが可能である。この手法は、宇宙船間の通信を用いた惑星間通信や航空機を移動無線ノードとする DTN ネットワークなど、移動無線ノードの移動があらかじめ計画されている場合に有効な手法である。しかし、各移動無線ノードが自律的に移動計画を策定する環境においては、このようにして策定された移動計画をすべての移動無線ノードへと拡散するために要する通信コストが高いために現実的な手法とは成り得ない。また、論文¹⁾等では、自律的に移動する多くの移動無線ノードに加えて、定期的に移動する移動無線ノードによってネットワークが構成され、その移動計画がすべての移動無線ノードに周知されていることを前提とする DTN ルーティング手法が提案されている。この定期的に移動する無線ノードを中継ノードとして活用することによって、より到達性の高いデータメッセージ配送を実現することができる。

すべての無線ノードが自律的に移動する環境を想定した DTN ルーティング手法には、データメッセージを複製する手法と複製を行わない手法とがある。一般に、前者はデータメッセージの高い到達性を実現するものの、その通信オーバーヘッドが高くなる傾向にあり、後者は通信オーバーヘッドを削減することができるものの、比較的低いデータメッセージ到達性になってしまう。Epidemic Routing⁹⁾では、データメッセージの複製を保持した移動無線ノードが他の移動無線ノードを自身の無線信号到達範囲に含むごとに、このデータ

*1 論文⁸⁾では、無線マルチホップ配送経路を十分高い確率で検出するためには、各無線ノードの隣接無線ノードが平均 8 ノード程度の分布密度を要することが示されている。

メッセージを保持しているかを確認し、保持していない場合には一定の確率(感染率)でこれを転送することで、データメッセージの複製をネットワーク内の移動無線ノード群へと拡散し、送信先無線ノードへと到達させる手法である。複製されたデータメッセージを保持するいずれかの移動無線ノードの無線信号到達範囲に送信先無線ノードが含まれることによって、データメッセージを送信先無線ノードへと到達させることができる。そのため、高い到達性と短い配送遅延が得られることが期待される。しかし、頻りにデータメッセージが隣接移動無線ノード間で交換され、多数の移動無線ノードに複製されたデータメッセージが保持されることから、通信オーバーヘッドと記憶オーバーヘッドが大きいという問題がある。この問題への対処として感染率が導入されているものの、到達率および配送遅延との適切なトレードオフを実現することは難しい。また、複製データメッセージのひとつが送信先無線ノードへと到達したことを他の移動無線ノードへ通知することができないため、各移動無線ノードが保持する複製データメッセージの破棄を実現することも困難である。

自律移動する無線ノードから構成されるネットワークにおいて、データメッセージの複製を用いないDTNルーティングとして論文¹²⁾の手法がある。ここでは、VANETを対象とした位置依存情報配布のためのRD方式実現のために、位置ベースアドホックルーティングプロトコルのGEDIR³⁾をDTNへ適用している。データメッセージを保持する移動無線ノードは、検出した自身よりも送信先無線ノードに近い隣接移動無線ノードにのみ、データメッセージを転送する。このとき、このような隣接移動無線ノードが複数存在する場合には、最も送信先無線ノードに近いものを次ホップ移動無線ノードとして選択する。ただし、前ホップ移動無線ノードは次ホップ移動無線ノードの選択対象から除外する。本手法は、隣接移動無線ノードの位置のみを次ホップ移動無線ノードの選択基準としている。このため、データメッセージを転送した次ホップ移動無線ノードがデータメッセージを保持したまま送信先無線ノードから通さかる方向へと移動することも考えられる。論文¹²⁾では、前ホップ移動無線ノードが送信先無線ノードへ近づく方向へ移動している場合にのみデータメッセージを転送し戻すことを許すことで、到達率と配送遅延を改善している。現在位置という限られた情報のみでルーティングすることから、ルーティングに必要な情報交換に要するオーバーヘッドが小さいものの、データメッセージの到達率と配送遅延には改善の余地がある。

論文⁵⁾では、データメッセージを保持する移動無線ノードが自身および隣接移動無線ノードの移動速度(移動方向)に基づいて、データメッセージの保持と転送を選択する手法であるMOVEを提案している。各移動無線ノードの移動方向と位置および送信先無線ノードの位置から、送信先無線ノードへ近づいている移動無線ノードがデータメッセージを保持

するよう、必要に応じて転送する。いずれの移動無線ノードも送信先無線ノードへと近づいている場合には、漸近点がより送信先無線ノードに近い移動無線ノードがデータメッセージを保持する。移動無線ノードの現在の移動速度は、現在以降の移動に対する一定の傾向を示しており、限定的ではあるものの一種の移動計画と見做すことができる。これを次ホップ移動無線ノードの選択に考慮することは、より精度の高い次ホップ移動無線ノード選択を実現すると考えられ、データメッセージの到達率の改善と配送遅延の短縮が期待される。

3. 提案手法

3.1 移動計画の局所的拡散

前章で述べたように、各無線ノードの移動計画があらかじめ定められている場合には、これを全域的に広告しておくことにより、到達率が高く、遅延の短いデータメッセージ配送が実現される。しかし、各移動無線ノードが自律的に移動計画を定める場合には、隣接移動無線ノード間でのデータメッセージ転送を行なうか否かは、隣接移動無線ノードの位置や移動計画の一部である移動速度(移動方向)のみに基づいて判断しなければならない。つまり、自身および現在の隣接移動無線ノードが今後隣接する他の移動無線ノードとの隣接時刻やその移動計画を判断基準として用いることができない。逆に、データメッセージの到達率の向上や配送遅延の短縮は、これらを考慮してデータメッセージの保持と転送を選択することで実現可能となることが期待できる。

例えば、図1においては、データメッセージを保持する移動無線ノード M_i は、時刻 t_{ij} において隣接する移動無線ノード M_j へとデータメッセージを転送している。これは、 M_i がこのデータメッセージを保持し続けるよりも M_j に転送した方がデータメッセージをより送信先無線ノード M^d へと近づけることができることを M_i が M_j の移動計画を入手することによって判断できるからである。しかし、時刻 $t_{ik} > t_{ij}$ において M_i と隣接する移動無線ノード M_k の移動計画を M_i が取得しており、 M_j よりも M_k の方がデータメッセージをより M^d に近づけることができると判断可能であれば、 M_i は t_{ij} には M_j へのデータメッセージの転送を行わず、 t_{ik} に M_k と隣接するまでデータメッセージを保持し続けるという判断を行なうこともできる。さらに、時刻 $t_{jl} > t_{ij}$ において M_j と隣接する移動無線ノード M_l の移動計画を M_i が取得し、 M_k よりも M_l の方がデータメッセージをより M^d に近づけることができると判断可能であれば、 M_i は t_{ij} に M_j へデータメッセー

ジを転送するという判断を行なうことができる*1。

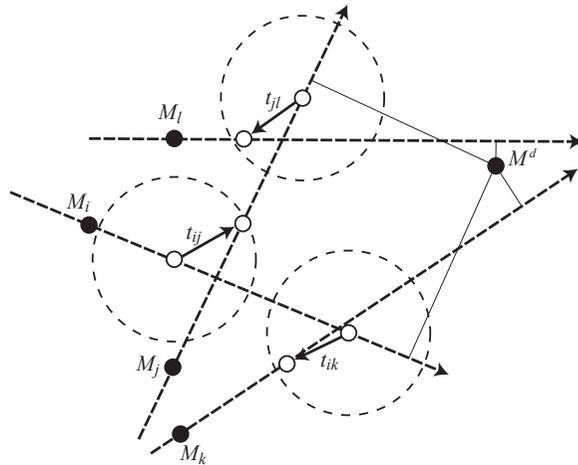


図1 局所拡散させた移動計画に基づくDTNルーティング

このようなDTNルーティングを実現するためには、各移動無線ノードが自律的に定めた移動計画を他の移動無線ノードへ通知することが必要である。そこで、本論文では、各移動無線ノードが自身および他の移動無線ノードの移動計画を保持し、保持するデータメッセージの有無に関わらず、隣接移動無線ノードと互いに保持する移動計画を交換する手法を提案する。移動無線ノード M_j の移動計画 MP^j は、移動無線ノード ID M_j 、移動開始時刻 t_b^j 、移動終了時刻 t_e^j 、時刻 t ($t_b^j \leq t \leq t_e^j$) における M_j の位置 $l^j(t)$ の4項組 $\langle M_j, t_b^j, t_e^j, l^j(t) \rangle$ で表すことができる。そして、移動無線ノード M_i は、自身および隣接移動無線ノードとの交換によって取得した移動計画の集合 $\{MP^j\}$ ($M_j \in MS^i$) を保持している。ここで、 MS^i は M_i が移動計画を取得している無線移動ノードの集合であり、 $M_i \in MS^i$ である。 M_i が他の移動無線ノード M_k と隣接したならば、 M_i は自身が保持する移動計画 $\{MP^j\}$

*1 後述する移動計画の拡散手法によって、 M_j は M_i から M_l の移動計画を取得可能である(あるいは他の移動無線ノードから取得済みである)ことから t_{jl} 以降 M_l が保持し続けた場合にまでデータメッセージを M^d に近づけることは可能である。さらに、 M_i が取得しておらず、 M_l が取得している他の移動無線ノードの移動計画を考慮することによって、データメッセージをより M^d に近づけることができる可能性もある。

($M_j \in MS^i$) の一部または全部を M_k へと転送するとともに、 M_k の保持する移動計画の一部または全部を取得する(図2)。このとき、 M_i が既に移動無線ノード M_l についての移動計画 $\langle M_l, t_b^l, t_e^l, l^l(t) \rangle$ を保持しており、 M_k から同一の無線ノード M_l についての異なる移動計画 $\langle M_l, t_b^{l'}, t_e^{l'}, l^{l'}(t) \rangle$ を取得したならば、より新しい移動計画を保持し、古い移動計画を破棄する。具体的には、 $t_b^l < t_b^{l'}$ ならば M_k から取得した移動計画 $\langle M_l, t_b^{l'}, t_e^{l'}, l^{l'}(t) \rangle$ を保持し、 $t_b^l \geq t_b^{l'}$ ならば M_k から取得した移動計画 $\langle M_l, t_b^{l'}, t_e^{l'}, l^{l'}(t) \rangle$ を破棄する。このようにして、各移動無線ノードは、自身および自身と隣接した移動無線ノードの移動計画に加え、自身とこれまでに隣接したことのない移動無線ノードの移動計画をも取得することができる。

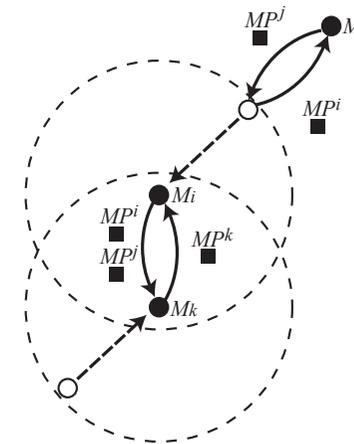


図2 隣接移動無線ノード間の交換による移動計画の局所拡散

なお、現在時刻 t に対して $t > t_e^l$ である M_l の移動計画 $\langle M_l, t_b^l, t_e^l, l^l(t) \rangle$ も M_i は破棄する。

3.2 DTNルーティング手法

配送途中のデータメッセージを保持する移動無線ノード M_i は、保持している自身および他の移動無線ノードの移動計画の集合 $SMP^i := \{MP^j\}$ に基づいて、データメッセージを保持したまま移動し続けるか、現在時刻以降に隣接する移動無線ノード $M_j \in MS^i$ にデータメッセージを転送するかを決定する。これによって、送信先無線ノード M^d へとデータ

メッセージを Store-Carry-Forward 方式で無線マルチホップ配送する DTN ルーティング手法について述べる．提案するルーティング手法は，以下の 4 つの手順によって，データメッセージ配送の次ホップ移動無線ノードを決定する．

[Step 1] 移動無線ノード対の隣接時間の計算

MS^i に含まれるすべての移動無線ノード対 $\{M_j, M_k\}$ について，これらが隣接する時間，すなわち移動無線ノードの無線信号到達距離 R に対して $|M_j M_k| \leq R$ を満足する時刻 t の範囲を計算する．ただし， M_i が保持する M_j と M_k の移動計画は， $\langle M_j, t_b^j, t_e^j, l^j(t) \rangle$ ， $\langle M_k, t_b^k, t_e^k, l^k(t) \rangle$ で与えられていることから，以下の条件を満足する場合には，これらの移動無線ノードの移動計画が有効である時間が重複していないため， M_j と M_k との間でデータメッセージを交換可能と判断することはできない．

- $t_e^j < t_b^k$ のとき
- $t_e^k < t_b^j$ のとき

また，不等式 $|l^j(t) - l^k(t)| \leq R$ を t について解いたとき，その解が M_j と M_k が互いに無線信号到達範囲に含まれてデータメッセージを交換可能な時刻の集合であることから，この不等式に解が存在しない場合にも M_j と M_k との間でデータメッセージを交換可能とは判断することができない．その解は閉区間の集合 $TI_u^{jk} := [t_b^{jk}, t_e^{jk}]$ ($u = 1, 2, \dots$) となる．ただし，閉区間 TI_u^{jk} で M_j と M_k がデータメッセージを交換可能と判断するためには，この閉区間が M_j と M_k の移動計画が有効である時間 $[t_b^j, t_e^j]$ および $[t_b^k, t_e^k]$ と共通部分を持たなければならない．すなわち，以下の条件を満足する閉区間 TI_u^{jk} では， M_j と M_k との間でデータメッセージを交換可能と判断することはできない．

- $\max(t_b^j, t_b^k) > t_e^{jk}$ のとき
- $\min(t_e^j, t_e^k) < t_b^{jk}$ のとき

この条件を満足しない閉区間 TI_u^{jk} では，以下の時刻 t において M_j と M_k との間でのデータメッセージ交換が可能である．

$$t \in [\min(t_e^{jk}, t_e^j, t_e^k), \max(t_b^{jk}, t_b^j, t_b^k)]$$

[Step 2] 各移動無線ノードへの最短時間到達経路の計算

Step 1 の結果を用いて，移動無線ノード M_i から $M_j \in MS^i$ への最短時間到達経路をダイクストラの SPF アルゴリズム¹¹⁾ を用いて計算する．

ここで，図 3 に示すように， M_i から DTN ルーティングによってデータメッセージが無線マルチホップ配送され， M_j から M_k へ転送された時刻を T^{jk} とする．また，Step 1 に

よって， M_k から M_l へデータメッセージを転送することが可能な時刻からなる閉区間を $TI_u^{kl} := [t_b^{kl}, t_e^{kl}]$ ($u = 1, 2, \dots$) とする．このとき， $T^{jk} < t_e^{kl}$ なる u が存在するならば， M_k は T^{jk} に M_j から転送されたデータメッセージを M_l へと転送することができる． $T^{jk} < t_e^{kl}$ を満たす u のうち t_e^{kl} が最小となるものを u' とすると， M_l が M_k からデータメッセージを受信できる最も早い時刻 T^{kl} は，次式で与えられる．

$$T^{kl} := \max(T^{jk}, t_b^{kl_{u'}})$$

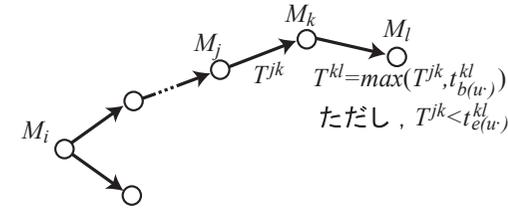


図 3 最早転送可能時刻

これを用いて，ダイクストラの SPF アルゴリズムの適用によって， M_i から各 $M_j \in MS^i$ へデータメッセージを DTN ルーティングによって無線マルチホップ配送した場合の最も早い到達時刻とこの時刻に到達するデータメッセージの無線マルチホップ経路を計算する．ただし， M_j と M_k との間でデータメッセージの交換が可能であると判断できない場合には $T^{jk} := \infty$ とする．

ここでは， M_i を根とする根付き木 S を構成する． M_i から各移動無線ノード M_j への S 上のパスが求める無線マルチホップ配送経路である． $D[M_j]$ は，(アルゴリズム実行途中時点での) M_i からのデータメッセージが M_j に到達する最も早い時刻であり，初期値は $D[M_j] := \infty$ とする．また， $P[M_j]$ は，このときのデータメッセージ配送経路における M_j の前ホップ移動無線ノードであり，初期値は $P[M_j] := \emptyset$ とする．アルゴリズムが停止したときには， $D[M_j]$ は最終的に求められた M_j へのデータメッセージの最も早い到達時刻となり， $P[M_j]$ はそのときの無線マルチホップ配送経路における M_j の前ホップ移動無線ノードである．

- (1) S を M_i (根) のみからなる木とする．
- (2) $T := MS^i - \{M_i\}$ とする．

- (3) $D[M_i] := t$ とする. t は現在時刻である.
- (4) T に含まれるすべての移動無線ノード M_j について, $D[M_j] := T^{ij}$, $P[M_j] := M_i$ とする.
- (5) $\exists M_j \in T$ について $D[M_j] \neq \infty$ である限り, 以下を繰返す.
- (a) $D[M_j]$ が最小である $M_j \in T$ を選択し, $P[M_j]$ の子ノードとして M_j を S に加える.
- (b) $T := T - \{M_j\}$ とする.
- (c) $\forall M_k \in T$ について, M_k が M_j からデータメッセージを転送された場合の最も早い到達時刻 T^{jk} を計算し, $T^{jk} < D[M_k]$ であるならば, $D[M_k] := T^{jk}$, $P[M_k] := M_j$ とする.

このアルゴリズムが停止したとき, S に含まれる移動無線ノード M_j には時刻 $D[M_j]$ へデータメッセージを配送することが可能であり, T に含まれる移動無線ノードにはデータメッセージを配送できると判断することができない. なお, M_i が $M_j \in S$ へデータメッセージを配送するために, S における M_i から M_j への唯一のパスにおける M_i の次ホップ移動無線ノード M_k へ時刻 T^{ik} にデータメッセージを M_i が転送する.

[Step 3] 各無線ノードによる M^d へのデータメッセージ最接近距離の計算

Step 2 のアルゴリズムにおいて, M_i を根とする木 S に含まれる移動無線ノードには, 配送途中で M_i に保持されているデータメッセージを DTN ルーティングによって無線マルチホップ配送で到達させることができる. 各移動無線ノード $M_j \in S$ は, 時刻 $D[M_j]$ にデータメッセージを受信することができることから, M_j は閉区間 $[D[M_j], t_e^j]$ においてデータメッセージを保持しながら $l^j(t)$ に従って移動すると M_i は推測することができる. この間に M_j が送信先無線ノード M^d に最も近づく時刻 $t \in [D[M_j], t_e^j]$ は, $|l^j(t), M^d|$ を最小とする $t = t_j^d$ であり, このときの M_j と M^d との間の距離は $Dist(M_j) := |l^j(t_j^d), M^d|$ である.

[Step 4] 次ホップ移動無線ノードの決定

Step 3 の計算により, M_i から DTN ルーティングでデータメッセージを無線マルチホップ配送可能であり, データメッセージを M^d へ最も近づける移動無線ノードは, $Dist(M_j)$ ($M_j \in S$) が最小である M_j と定めることができる. したがって, 木 S における M_i から M_j へのパスが M_i の推定する最適なデータメッセージ配送経路であり, このパスにおける M_i の次ホップ移動無線ノードが M_k であるならば, M_i は時刻 $D[M_k]$ においてデータメッセージを M_k へ転送することとする.

4. 性能評価

提案手法によるデータメッセージ到達率の改善と配送遅延の短縮をシミュレーション実験により評価する.

提案手法では, 3.2 節で示したように, 各移動無線ノードは他の移動無線ノードとは独立に移動計画を策定し, これに従って移動するものとしている. 移動計画は, その有効期限 $[t_b, t_e]$ と有効期限内の時刻 t における位置 $l(t)$ からなる. 移動無線ノードは, 時刻 t_b まですでに策定した移動計画に基づいて移動し, 時刻 t_e に $l(t_e)$ へ到達したならば, 自律的に以降の移動計画を策定し, これに従って移動することを順次繰返す. 提案手法による局所的な広告が行なわれた移動計画がデータメッセージの DTN ルーティングに活用されるためには, 移動計画の有効期限内に中継移動無線ノードがこれを取得することが必要である. そこで, 移動計画の局所的な広告によって, どれだけの移動無線ノードが取得した移動計画をデータメッセージ転送に用いることができるかをシミュレーション実験によって評価する. ここでは, $4,000\text{m} \times 4,000\text{m}$ の領域の中心からひとつの辺と平行に $5\text{m}/\text{秒}$ で $2,000\text{m}$ 移動する無線ノードの移動計画を局所的に広告した場合の散布状況を評価する. 移動無線ノードの無線信号到達距離は 100m とする. また, 上記の移動無線ノード以外の $20\text{--}100$ 台の移動無線ノードは, 初期位置を一様分布乱数によってランダムに決定し, ランダムウェイポイントモデルにしたがって $5\text{m}/\text{秒}$ で移動するものとする. 400 秒の移動時間に移動計画を取得した移動無線ノード数, およびその保持時間の総和の測定結果を図 4, 図 5 に示す. この結果から, 移動無線ノードが疎に分布する場合には移動計画の保持時間が短く, 提案手法の効果が縮小することが考えられる. 移動無線ノードが取得した移動計画を DTN ルーティングへより有効に活用できるのは, 取得時刻から移動終了時刻までの時間が長い場合である. そこで, 以下のシミュレーション実験では, 移動計画の有効期限が異なる場合を想定する.

次に, 提案手法, MOVE 手法, RD 方式のルーティング手法について, データメッセージの到達率と配送遅延をシミュレーション実験評価する. ここでは, $5,000\text{m} \times 5,000\text{m}$ のシミュレーション領域のひとつの対角線上で各頂点から $1,000\sqrt{2}\text{m}$ 離れた位置に送信元無線ノードと送信先無線ノードを固定し, 無線信号到達距離 100m の移動無線ノード $10\text{--}100$ 台を一様分布乱数を用いてランダムに初期配置する. 各移動無線ノードは, ランダムウェイポイントモデルに従って移動する. 移動速度は, $0\text{--}10\text{m}/\text{秒}$ の範囲で一様分布乱数を用いてランダムに決定し, 目標地点到達時の停止時間は $0\text{--}50$ 秒の範囲で一様分布乱数を用いてランダムに決定する. 提案手法では, 次ホップ移動無線ノードの決定に移動無線ノードの移動

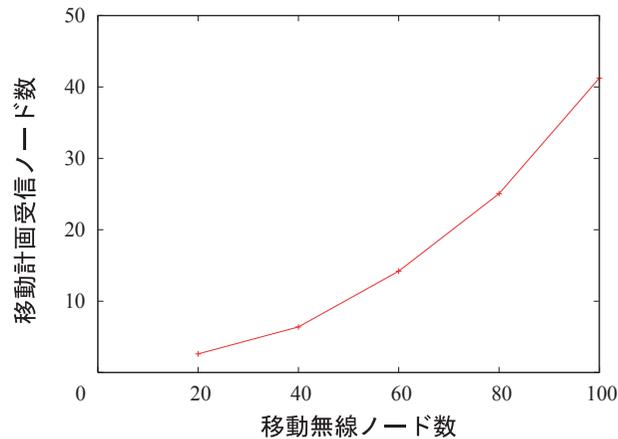


図4 移動計画受信ノード数

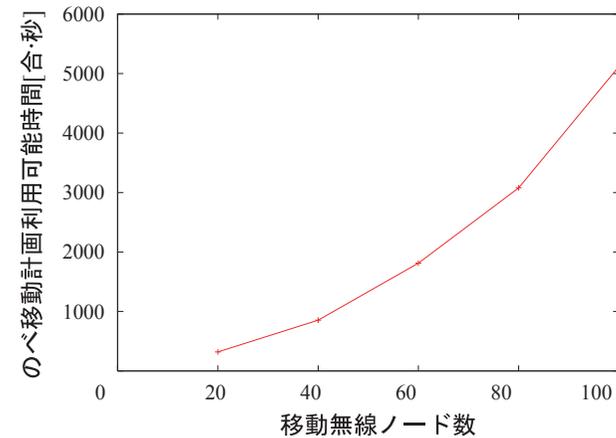


図5 のべ移動計画利用可能時間

計画を用いており、より有効期限の長い移動計画を用いることが有効であると見込まれる。そこで、常時 n 箇所の目標地点を保持する n -ランダムウェイポイントモデルを適用する。すなわち、各移動無線ノードは初期位置において n 箇所の目標地点を決定して移動を開始する。ここでは、 n 箇所目の目標地点に到達するまでの移動計画を広告する。最初の目標地点に到達したならば $n+1$ 箇所目の目標地点を設定し、以降は $n+1$ 箇所目の目標地点に到達するまでの移動計画を広告する。なお、シミュレーション実験開始後 100 秒の時点でデータメッセージを送信し、データメッセージが送信先無線ノードに送信後 4,000 秒以内に到達しない場合は不到達とした。

図6は、データメッセージ到達率の測定結果である。移動無線ノードが少数である場合には、データメッセージを保持する中継移動無線ノードが他の移動無線ノードと隣接する機会が少なく、送信先無線ノードの無線信号到達範囲へと移動する機会も少ないために低い到達率となるが、移動無線ノード数の増加とともに到達率も向上する。無線ノードの移動計画を次ホップ移動無線ノードの選択に適用する提案手法は、隣接移動無線ノードの位置および移動速度(移動方向)のみを適用する MOVE 手法、RD 方式よりも高い到達率となっている。また、移動無線ノードがより長い有効期間を持つ移動計画を入手することによって、データメッセージ到達率が大きく改善される。移動無線ノード数が 100 である場合、データメッセージ到達率は RD 方式で 20.6%、MOVE 手法で 33.6%、提案手法で 38.0% である。提案

手法では、移動計画に含まれる目標地点数を 2 箇所、3 箇所と増やすことによって、データメッセージ到達率はそれぞれ 48.8%、64.2%へと向上する。

図7は、各手法におけるデータメッセージの配送遅延の平均値の測定結果である。ここでは、送信先無線ノードに 4,000 秒以内に到達したデータメッセージのみを対象としており、適用手法と移動無線ノード数によらず配送遅延がほぼ一定となる結果が得られた。ただし、各手法でデータメッセージ到達率が異なっていることから、到達率が高い手法は到達率の低い手法では到達できなかったデータメッセージの配送に成功していることが考えられ、いずれの手法においても到達しているデータメッセージの配送については、到達率の高い手法がより短縮された配送遅延となっていることが考えられる。

以上により、提案手法は、従来手法に対してデータメッセージ到達率を改善し、配送遅延を短縮するものである。

5. ま と め

本論文では、移動無線ノードが疎に分布する無線マルチホップネットワーク環境において、配送途中のデータメッセージを保持した移動無線ノードが自身および取得した他の移動無線ノードの移動計画に基づいてデータメッセージを最も送信先無線ノードへと近づけることができる無線マルチホップ配送経路を推定し、その次ホップ移動無線ノードへデータ

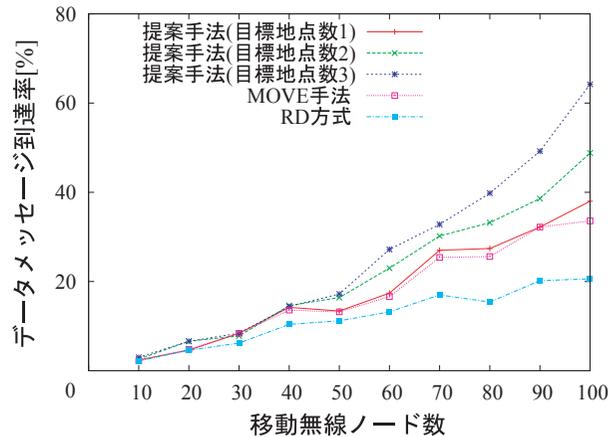


図 6 データメッセージ到達率

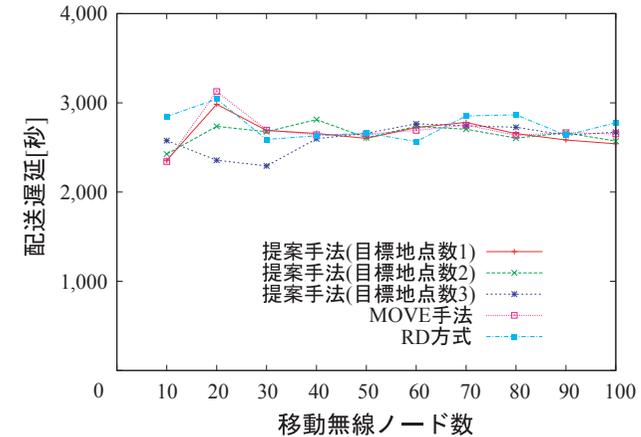


図 7 データメッセージ配送遅延

メッセージを転送するまで保持しながら移動する DTN ルーティング手法を提案した。ここでは、各移動無線ノードが自律的に策定した移動計画を隣接移動無線ノードへと転送することで局所的に広告する。また、無線マルチホップ配送経路の推定には、ダイクストラの最短経路アルゴリズムを応用している。シミュレーション実験の結果、隣接移動無線ノードの位置や移動速度のみによってデータメッセージ転送の可否を決定していた従来手法に対して、到達率と配送遅延を改善することが示された。また、より長期的な移動計画を広告することが、性能向上に有効であることが示された。

今後は、移動計画の散布状況を分析し、広告に要する通信オーバーヘッドと到達率、配送遅延との関係を明らかにすることで、より適切なトレードオフを実現する手法を検討する。

参 考 文 献

- 1) Chen, Z.D., Kung, H.T. and Vlah, D., "Ad Hoc Relay Wireless Networks over Moving Vehicles on Highway," Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, pp.247-250 (2001).
- 2) Jain, S., Fall, K. and Patra, R., "Routing in a Delay Tolerant Network," Proceedings of the ACM SIGCOMM 2004, pp.145-158 (2004).
- 3) Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).

- 4) Lindgren, A., Doria, A and Schelen, O., "Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks," Lecture Notes in Computer Science, No.3126, pp.239-254 (2004).
- 5) Lebrun, J., Chuah, C.N., Ghosal, D. and Zhang, M., "Knowledge-Based Opportunistic Forwarding in Vehicular Wireless Ad Hoc Networks," Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, Vol.4, pp.2289-2293 (2005).
- 6) Parrell, S. and Cahill, V., "Delay- and Disruption-Tolerant Networking," Artech House (2006).
- 7) Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley (2000).
- 8) Seyama, T. and Higaki, H., "G-AODV+PCMTAG: Routing in MANET with Low Overhead Flooding and Route-Shortening," Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks, pp.103-110 (2008).
- 9) Vahdat, A. and Becker, D., "Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks," Technical Report CS-200006, Duke University (2000).
- 10) Zhao, W., Ammar, M. and Zegura, E., "A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, pp.187-198 (2004).
- 11) 野崎, 野原, "アルゴリズムの設計と解析 I," サイエンス社, pp.187-190 (1977).
- 12) 山中, 石原, "VANET における push/pull 併用による位置依存情報アクセス手法," 情報処理学会論文誌, Vol.2008, No.227, pp.25-32 (2008).