

基地局を含む無線マルチホップネットワークにおける 移動計画拡散に基づくDTN通信

岩井 正敏^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要: 移動無線ノードが低密度に分布する場合, 送信元移動無線ノードから送信先移動無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路を検出し, データメッセージ群の配送継続時間だけ接続を維持することは困難である. そこで, 中継移動無線ノードがデータメッセージを保持して移動することを可とするDTNルーティング手法が検討されており, 低遅延, 低オーバーヘッドの手法が求められている. 本論文では, 各移動無線ノードが自律的, 実時間的に定める移動計画を隣接移動無線ノード間で相互に交換することでネットワーク内に拡散し, 中継移動無線ノードが取得した移動計画に対してダイクストラ法を適用することで配送時間を最短とする経路を計算し, 転送先ノードを決定する手法を提案する. ここで, 各移動無線ノードがより多くの移動計画を取得するために, 無線基地局を相互接続するインフラネットワークを介して移動計画を拡散する. また, 送信先移動無線ノードの移動計画を保持しない場合には, 最短時間で到達可能な無線基地局を暫定送信先としてDTNルーティングを行なう. シミュレーション実験により, インフラネットワークの活用によってデータメッセージ配送遅延が43.7%短縮する結果が得られ, 提案手法の有効性が示された.

キーワード: 耐遅延ネットワーク, ルーティング, 移動計画, インフラネットワーク

DTN Routing based on Deffusion of Mobility Plans through Infrastructured Network Connecting Wireless Base Stations

MASATOSHI IWAI^{1,a)} HIROAKI HIGAKI^{1,b)}

Abstract: In wireless multihop networks with sparsely distributed mobile wireless nodes, it is generally difficult to detect a wireless multihop transmission route and to keep its connection during transmissions of a sequence of data messages due to low density and high mobility. Thus, reserches on DTN routing have become active and shoter-delay and lower-overhead DTN routing methods have been investigated. This paper proposes a novel DTN routing based on mobility plans of mobile wireless nodes. Here, mobility plans determined autonomously and timely are advertised by exchanges between neighboring nodes. An intermediate node for transmission of a data message determines its next-hop node based on its achieved mobility plans. For achieving more mobility plans for better next-hop selection, mobility plans are deffused through an infrastructured network connecting wireless base stations. In addition, an intermediate node without the mobility plan of the destination node determines its next-hop node to reach the nearest wireless base station. Simulation experiments show the proposed DTN rouging achieves **. **% shorter transmission delay by using the infrastructured network.

Keywords: Delay-Tolerant Networks, Routing, Mobility Plans, Infrastructured Networks.

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移動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

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) iwai@higlab.net

b) hig@higlab.net

ドホックネットワーク、無線メッシュネットワーク、無線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で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) ルーティング手法が検討されている [2]。ここでは、比較的低密度に分布する移動無線ノードの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、通信オーバーヘッドがより低く、配送遅延がより短く、データメッセージの到達性がより高い手法が求められる。これを実現するひとつの方法が、無線ノードの移動計画を活用するものである。これは、全域的な無線ノードの移動計画が事前に決定しており、これをすべての無線ノードに通知し、共有することが可能な無線マルチホップネットワーク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、広域に分布する多数の移動無線ノードによって各無線ノードの移動計画を共有することは困難である。

本論文では、隣接無線ノード間で互いが保持する自身および他の無線ノードの移動計画を交換することによって、配送途中のデータメッセージの有無とは無関係に移動無線ノードの移動計画を無線マルチホップ転送で拡散することで通知し、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は自身の保持する無線ノード移動計画に基づいて最適な配送計画を策定し、それによって定められる次ホップ移動無線ノードとの隣接時にデータメッセージを転送する手法を提案する。なお、本提案手法が有効に機能するためには、無線ノードの移動計画が短時間により広域に分布する多数の移動無線ノードに拡散することが望ましい。そこで、ネットワークに分布する固定基地局を相互接続するインフラネットワークが存在する場合には、データメッセージ配送と無線ノードの移動計画の拡散に用いることとする。インフラネットワークに接続された固定基地局間では無線ノードの移動計画が常時交換可能であることから、無線ノードの移動計画の拡散に大きく寄与し、データメッセージの到達率向上と配送遅延短縮とが実現されることが期待される。

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 $\mathcal{N} = \langle \mathcal{M}, \mathcal{L} \rangle$ 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、送信元無線ノード $M^s (= M_0)$ と送信先無線ノード $M^d (= M_n)$ 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配送経路 $\mathcal{R} := \langle M_0 M_1 \dots M_{n-1} M_n \rangle$ 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 ルーティング手法が提案されている [2]。ここでは、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可能となることが期待される (図 1)。

DTN ルーティング手法は、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無線ノードの移動計画の一部あるいは全部を取得可能であることを前提とする手法、一部の特別な無線ノードの移動計画がすべての移動無線ノードに通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 Message Ferrying [10] がある。ここでは、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メッセージを転送する移動無線ノードの存在を前提と

*1 論文 [8] では、無線マルチホップ配送経路を十分に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。

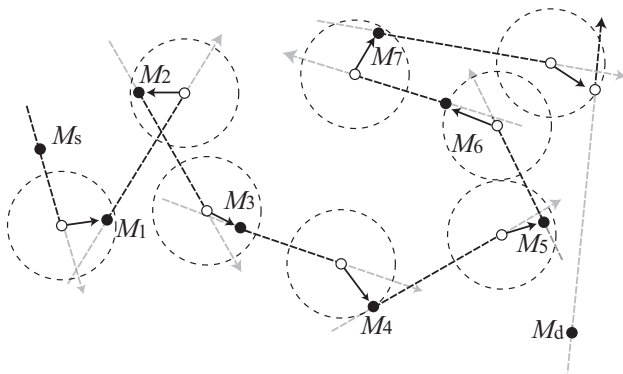


図 1 無線マルチホップネットワークにおける DTN ルーティング

する。データメッセージ配送要求の発生に対して、データメッセージの保持、転送を担う無線ノードの移動計画策定が重要な問題となる。論文 [3] 等では、ネットワークに含まれるすべての無線ノードの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送信元無線ノードがすべて決定する。この手法は、航空機や宇宙船などのようにその移動があらかじめ計画されている無線ノードから構成されるネットワークに対して有効である。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く、現実的な手法とは成り得ない。一方、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通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。

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り、後者は通信オーバーヘッドを削減する一方、比較的低いデータメッセージ到達性となる。Epidemic Routing [9] 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たびに、このデータ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、頻繁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配送済みの複製データメッセージを破棄することが困難であるという問題がある。

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 ルーティング手法として論文 [13] 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 GEDIR [4] 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ざかる方向へと移動することも考えられる。論文 [13] 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 [6] 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、送信先移動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なすことができる。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。

無線マルチホップネットワークに基地局を含む場合、データメッセージ配送には、隣接移動無線ノード間の転送、移動無線ノードと隣接する固定基地局間の転送、インフラネットワークに接続された固定基地局間の転送を用いることができる。論文 [12] 等では、これらを適応的に用いて配送遅延のより短い経路を選択、構築する手法を提案している。移動無線ノードが低密度分布する無線マルチホップネットワークにおいても、固定基地局を相互接続するインフラネットワークをデータメッセージ配送に用いることが考えられる (図 2)。特に、DTN ルーティングの適用において、固定基地局へのデータメッセージ配送遅延が大きい場合には、インフラネットワークを介したデータメッセージ配送が必ずしも配送遅延の短縮に有効であるとは限らない。移動無線ノード間の無線マルチホップ配送と無線ノードの移動による配送の方が配送遅延を短縮することもあるため、あくまでデータメッセージ配送の一手段としてインフラネットワークを使用することとなる。

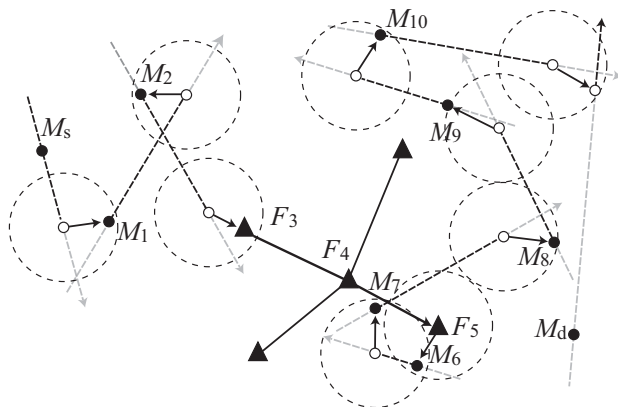


図 2 インフラネットワークを用いる DTN ルーティング

メッセージを転送する。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 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。

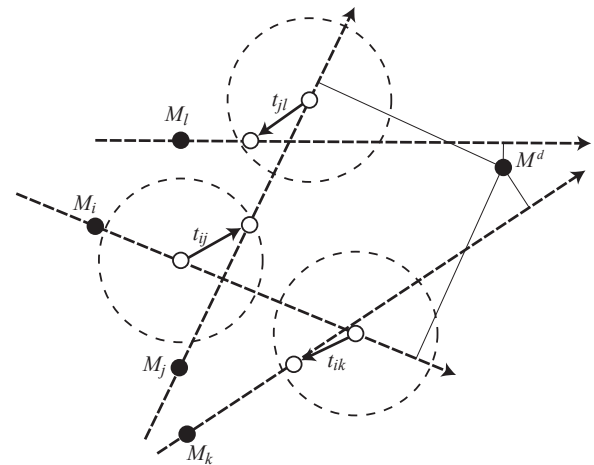


図 3 移動計画に基づく DTN ルーティング

3. 提案手法

3.1 移動計画の拡散手法

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かつ実時間的に移動計画を定める従来手法では、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を、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されることが期待できる。

例えば、図 3 において、 M^d を送信先無線ノードとする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

一方、固定基地局を含む無線マルチホップネットワークでは、固定基地局を相互接続するインフラネットワークをデータメッセージ配送に使用することができる。いずれかの固定基地局で受信されたデータメッセージは、いずれかの固定基地局に隣接する移動無線ノードへと転送される。図 4 においては、時刻 t_{ij} に M_i から転送されたデータメッセージを保持して移動する M_j が M_l と隣接せず、時刻 $t_{jm} > t_{ij}$ において M_j が隣接する固定基地局 F_m へとデータメッセージを転送する。ここで、インフラネットワークによって相互接続された固定基地局 F_m, F_n, F_p のいずれに隣接する移動無線ノードへもデータメッセージを転送することが可能である。データメッセージは固定基地局においても保持することが可能であり、固定基地局が受信したデータメッセージをいずれかの隣接移動無線ノードに直ちに転送する必要はない。図 4 では、 M_l が F_n と隣接した時点でデータメッセージが転送され、これを保持して移動する M_l から M^d へと転送される。

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

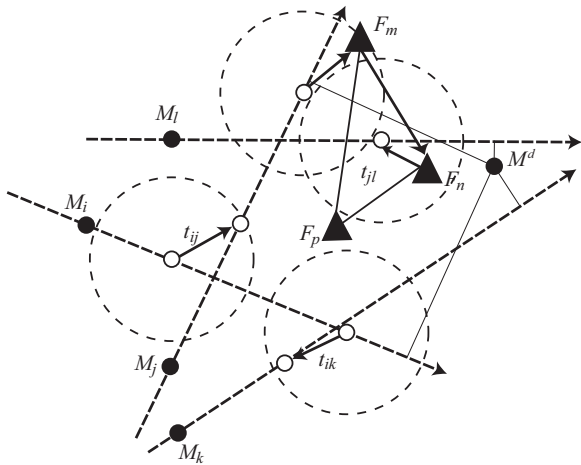


図 4 移動計画に基づくインフラネットワークを用いる DTN ルーティング

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 が現在有効な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 $\{MP^j\}$ ($M_j \in MS^i$) 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 5)。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無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。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。

無線ノードの移動計画は、策定後、より短時間により広範囲に分布するより多数の移動無線ノードおよび固定基地局へと拡散することが望まれる。この移動無線ノードを送信先とする移動無線ノードからデータメッセージ配送を開始するためには、この送信元移動無線ノードが送信先移動無線ノードの移動計画を保持していることが必要である*2。無線ノードの移動計画は、上述したように、隣接

*2 保持していない場合のルーティングは後述する。

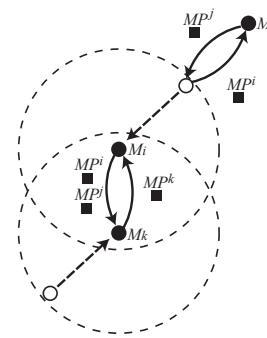


図 5 隣接移動無線ノード間の移動計画交換

移動無線ノード間で順次複製されて転送されることで拡散するが、この転送と移動計画を保持する無線ノードの移動のみでは広範囲へのより短時間での拡散を行なうことは困難である。そこで、移動計画の拡散にも固定基地局を相互接続するインフラネットワークを使用する手法を提案する。ある固定基地局へ隣接移動無線ノードから転送された移動計画は、直ちにすべての固定基地局へと複製配送される(図 6)。以降、固定基地局と隣接するすべての移動無線ノードへと移動計画が転送されることで、広域への拡散が実現される。

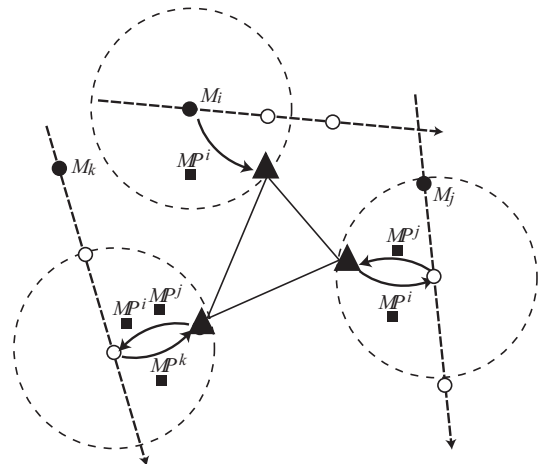


図 6 固定基地局群を介した移動計画の広域拡散

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 および固定基地局 F_i は*3、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。

*3 以降、特に明記しない限り M_i は F_i と読み替え可能である。

[Step 1] 移動無線ノード対の隣接時間の計算^{*4}

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 $\langle M_j, t_b^j, t_e^j, l^j(t) \rangle$ と $\langle M_k, t_b^k, t_e^k, l^k(t) \rangle$ で与えられていることから、以下のいずれか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ることでデータメッセージが交換可能である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 $TI_u^{jk} := [t_{b(u)}^{jk}, t_{e(u)}^{jk}]$ ($u = 1, 2, \dots$) 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、以下のいずれか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。

- $\max(t_b^j, t_b^k) > t_{e(u)}^{jk}$ のとき
- $\min(t_e^j, t_e^k) < t_{b(u)}^{jk}$ 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が交換可能である。

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

[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。一般の最短経路探索においては始点ノードからの道のりを評価指標とするのに対して、本論文ではデータメッセージの到達時刻を評価指標に用いる。

ここで、図 7 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 $TI_u^{kl} := [t_{b(u)}^{kl}, t_{e(u)}^{kl}]$ ($u = 1, 2, \dots$) とする。このとき、 $T^{jk} < t_{e(u)}^{kl}$ 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。 $T^{jk} < t_{e(u)}^{kl}$ を満たす u のうち $t_{e(u)}^{kl}$ 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。

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

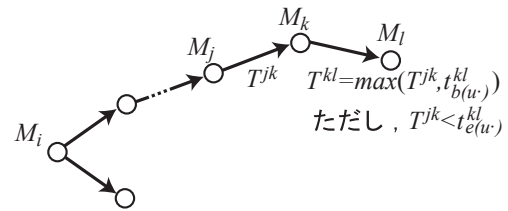


図 7 最早転送可能時刻

これに基づいてダイクストラの SPF アルゴリズムを適用することによって、 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^{*5}。

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、以下を繰り返す。
 - (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

^{*4} 固定基地局の位置はすべての移動無線ノードに対して既知であり、ここで述べる手法によって移動無線ノードと固定基地局との隣接時間が計算できる。

^{*5} 時刻 t にある固定基地局へデータメッセージが到達可能であることが計算されたならば、すべての固定基地局 t にデータメッセージが到達可能とする。

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 $t = t'_j$ であり，このときの M_j と M^d との間の距離は $Dist(M_j) := |l^j(t'_j), M^d|$ である．なお， M_i が M^d の移動計画を保持していないときには Step 3 の処理を行うことはできないためスキップする．

[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．

なお， M_i が M^d の移動計画を保持していない時には，最初に到達可能な固定基地局への配送計画を策定し，その配送経路の次ホップ移動無線ノードへデータメッセージを転送する．これは，以下の理由によるものである．

- M^d の移動計画を固定基地局が保持している，または，近い将来に取得することが期待されるため．各固定基地局は，隣接移動無線ノードが保持する移動計画を取得することに加え，インフラネットワークを介して接続する他の固定基地局と取得した移動計画を共有している．インフラネットワークによって固定基地局間は常時接続されているため，固定基地局からただちに，あるいは近い将来に M^d への配送経路を検出することができる．
- 固定基地局の近隣では， M^d の移動計画を保持する移動無線ノードが存在し，その移動無線ノードにデータメッセージが到達することによって M^d への配送経路が検出されることが期待されるため，上記の理由により，固定基地局が M^d の移動計画を取得することが期待されるが，この移動計画は各固定基地局から隣接移動無線ノードへと通知され，拡散する．したがって，データメッセージを固定基地局により近い移動無線ノードへと転送していくことによって， M^d の移動計画を保持する移動無線ノードへ到達する可能性が高

くになると考えられる．

4. 評価

動計画の拡散と取得した移動計画を用いた配送計画策定による次ホップ移動無線ノード決定による DTN ルーティング手法において，インフラネットワークによる移動計画の拡散と送信先移動無線ノードの移動計画未取得時の固定基地局への配送戦略を導入することによる配送性能の改善効果をシミュレーション実験によって評価する．シミュレーション領域は $1,500\text{m} \times 1,500\text{m}$ の正方形領域とし，移動無線ノード，固定基地局いずれも無線信号到達距離を 100m とする．移動無線ノード 30–150 台，固定基地局 1–5 台を一様分布乱数を用いてランダムに初期配置する．移動無線ノードは，ランダムウェイポイントモデルにしたがって移動するものとする．ここでは，移動速度を $10\text{m}/\text{秒}$ で固定とし，一様乱数によって決定された移動目標地点まで等速直線運動するものとする．目標地点到達時には待機時間 0 秒で新たな目標地点を設定して移動するものとする．また，固定基地局の位置は，すべての無線ノードにおいて既知であるものとする．ランダムに選択された送信元移動無線ノードから送信先移動無線ノードへのデータメッセージ配送を本論文で提案した DTN ルーティング手法にしたがって配送する．なお，従来手法において，送信先移動無線ノードの移動計画を保持しない中継移動無線ノードは，移動計画を取得するまでデータメッセージを保持し続けるものとする．

測定結果を表 1 および図 8 に示す．

従来手法と提案手法のいずれにおいても移動無線ノード数，固定基地局数が多いほど平均配送遅延が短い．これは，ノード数と基地局数が多いほど移動計画の交換機会が多く，短時間により多くのノードが移動計画を取得すること，および，データメッセージの転送機会も多いことによってより遅延の短い配送経路が検出可能であることによるものである．一方，提案手法は従来手法の配送遅延を短縮しており，その短縮率はノード数，基地局数が多いほど大きい．これは，送信先移動無線ノードの移動計画を未取得の中継移動無線ノードがデフォルト動作として固定基地局への配送経路に基づいて次ホップ中継移動無線ノードを選択してデータメッセージを転送する効果である．評価実験を行なったパラメータ設定の範囲での平均配送遅延短縮率は 43.7% となっている．

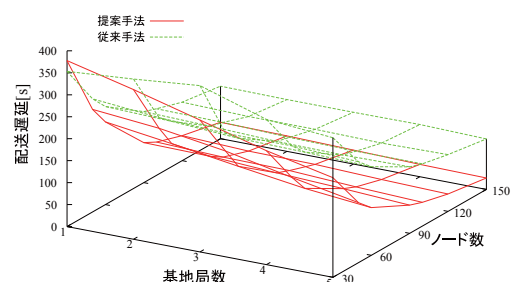


図 8 配送遅延測定結果

表 1 配送遅延測定結果 (単位:秒)

固定基地局数	1		2		3		4		5	
	従来手法	提案手法	従来手法	提案手法	従来手法	提案手法	従来手法	提案手法	従来手法	提案手法
30	353.3	377.8	364.7	340.9	378.5	303.3	330.7	259.4	317.7	226.8
50	257.4	333.4	343.6	219.4	336.9	196.5	237.1	165.1	229.7	136.7
60	223.4	188.4	218.2	167.7	208.8	145.0	206.2	123.7	201.9	108.8
90	161.6	91.1	157.4	89.0	151.7	80.0	149.5	73.1	151.5	64.4
100	151.5	75.8	149.3	70.3	144.1	68.7	141.6	60.4	141.6	54.2
120	133.2	57.1	129.4	50.7	129.1	49.4	126.7	43.7	129.3	39.8
150 台	119.5	37.5	118.1	35.3	118.0	31.9	118.9	28.3	115.0	26.1

5. まとめと今後の課題

本論文では、移動無線ノードと固定基地局から構成される無線マルチホップネットワークにおける DTN ルーティング手法として、無線ノードの移動計画に基づいて各中継無線ノードが策定した配送計画によって次ホップノードを選択する手法を提案した。無線ノードが移動計画を自律的、実時間的に定めることを前提として、これらの広告、拡散に隣接無線ノード間における交換と固定基地局を相互接続するインフラネットワークを介した配送を用いることで、短時間に広域分布する移動無線ノードへ移動計画を拡散することを可能とする。これによって、固定基地局に移動計画が集約される傾向があることから、送信先移動無線ノードの移動計画が未取得である場合には、送信元無線ノードおよび中継移動無線ノードでは、最初に到達可能な固定基地局へ向けてデータメッセージを配送する手法が有効であると考えられる。

今後の課題は、提案手法による移動計画の拡散効果と移動計画未取得の送信先移動無線ノードへの配送性能をシミュレーション実験によって評価することである。

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] Farrell, S. and Cahill, V., "Delay- and Disruption-Tolerant Networking," Artech House (2006).

[3] Jain, S., Fall, K. and Patra, R., "Routing in a Delay Tolerant Network," Proceedings of the ACM SIGCOMM 2004, pp. 145-158 (2004).

[4] Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).

[5] Lindgren, A., Doria, A and Schelen, O., "Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks," Lecture Notes in Computer Science, No. 3126, pp. 239-254 (2004).

[6] 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).

[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, 野下, "アルゴリズムの設計と解析 I," サイエンス社, pp. 187-190 (1977).

[12] 松下, 塩川, "MANET におけるトラヒック状況を考慮したモバイルゲートウェイ選択方式," 進信学技報, Vol. 110, No. 129, pp. 45-50 (2010).

[13] 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," 情処研報, Vol. 2008, No. 227, pp. 25-32 (2008).