

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

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、移動無線ノードが比較的高速に移動する場合、あるいは、移動頻度が比較的高い場合には、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たまま移動することをも配送の手段として用いる DTN ルーティング手法が検討されている。ここでは、配送遅延の延長に対してはある程度許容されているものの、無線ノードの通信バッファが限られていることから遅延のより短い配送が求められる。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。ただし、送信先移動無線ノードの位置情報を取得していない送信元移動無線ノード、中継移動無線ノードは保持するデータメッセージの配送計画を策定できず、次ホップを決定できない問題がある。本論文では、このような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定めたルーティング手法を提案するとともに、その有効性をシミュレーション実験により示す。

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, デフォルトルート

Default Routing for Support of Mobile Destination Nodes in DTN Routing based on Mobility Plan

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

Abstract: In wireless multihop networks with sparse distribution, high-speed mobility and frequent mobility of 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, researches on DTN routing have become active and shorter-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 diffused through an infrastructure network connecting wireless base stations. In addition, to support mobile destination wireless nodes, a source or an intermediate wireless node determines its next-hop node based on a wireless multihop transmission route to reach the nearest base station as its default route. Simulation experiments show that the proposed default route achieves shorter transmission delay than the other conventional methods.

Keywords: Delay-Tolerant Networks, Routing, Mobility Plans, Infrastructure Networks, Default Routes.

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り, 中継無線ノードの故障や移動によって配送経路が切断された場合でも代替経路が高確率で検出可能である程度に高密度に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, 移動無線ノードの分布密度が低く, 移動速度や移動頻度が高い環境においては, 安定的な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, 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, 配送遅延がより短い次ホップ中継無線ノード選択手法が求められる。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。移動計画とは, 移動無線ノードの各時刻における位置を定めるものである。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 [3]。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各無線ノードの移動計画を無線マルチホップ転送で無線マルチホップネットワーク内に拡散することで他の移動無線ノードに通知し, 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。また, 送信先移動無線ノードの移動計画は配送計画の策定に不可欠であるが, 前提とする環境のもとでは送信元移動無線ノード, 中継無線ノードがこれを保持している

とは限らない。そこで, この場合には最も早くデータメッセージが到達可能な固定基地局を暫定の送信先無線ノードとする手法を提案する。

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 $\mathcal{N} = \langle \mathcal{M}, \mathcal{L} \rangle$ 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。 $M_i M_j$ 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 $R := \langle M_0 M_1 \dots M_{n-1} M_n \rangle$ を高確率で検出し, 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 R の接続が維持される, 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代替の無線マルチホップ配送経路が検出可能である程度に高密度な移動無線ノード分布を前提としている。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, 移動無線ノードが低密度に分布し, 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, 検出できなかっ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。この問題を解決するために, 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先となる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の転送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, 安定的な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送信元無線ノードから送信先無線ノードまでのデータメッセージ配送を可能とす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すべての無線ノードが取得可能であることを前提とする手法, 一部の特別な無線ノードの移動計画がすべての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

*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。

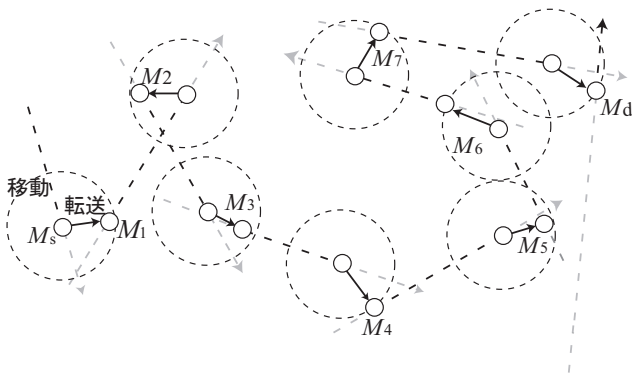


図 1 無線マルチホップネットワークにおける DTN ルーティング

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を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、各中継無線ノードの次ホップ無線ノードを定める配送計画を送信元無線ノードが策定し、これに従ってデータメッセージを配送する。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かつ実時間的に移動計画を策定する環境においては、策定された移動計画をすべての移動無線ノードへと通知することは困難である。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と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を構成し、後者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することによって、配送遅延を短縮した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しない手法とがある。一般に、前者はデータメッセージの配送遅延が短縮されるものの、多数の移動無線ノードが複数データメッセージを保持し、隣接移動無線ノードへと転送することによるオーバーヘッドが問題となる。また、データメッセージの送信先無線ノードへの到達を他の無線ノードが検知できないために保持する複製データメッセージの破棄が困難である。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と隣接する機会ごとにこのデータメッセージの複製を保持しているかを確認する。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が送信先無線ノードと隣接することによって、データメッセージが送信先無線ノードへと到達する。このような複製データメッセージの導入によって配送遅延の短縮を実現している。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が、配送遅延とオーバーヘッド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。ここで提案されている VANET を対象とした位置依存情報配布のための RD 方式において、位置ベースアドホックルーティングプロトコル GEDIR [4] のデータメッセージ転送手法を 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、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対してのみデータメッセージを転送する。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、配送遅延の延長を改善している。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、データメッセージ配送遅延の短縮に対して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と隣接移動無線ノードの移動方向を比較することによって、データメッセージの保持と転送を選択する MOVE 手法が提案されている。ここでは、現在データメッセージを保持している移動無線ノードとその隣接移動無線ノードの現在位置と移動方向とから、送信先無線ノードへ近づく方向に移動する無線ノードがこの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。複数の無線ノードが送信先無線ノードへ近づく方向に移動している場合には、送信先無線ノードへの最短距離がより短い無線ノードにデータメッセージを保持させる。移動無線ノードの現在の移動速度は、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移動計画の一種であると考えられる。これを次ホップ移動無線ノードの選択に考慮することによって、現在位置のみによる手法と比較して、より適切な次ホップ移動無線ノードを選択し、データメッセージ配送遅延が短縮されることが期待できる。

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)。ここで、DTN ルーティングの適用においては、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。

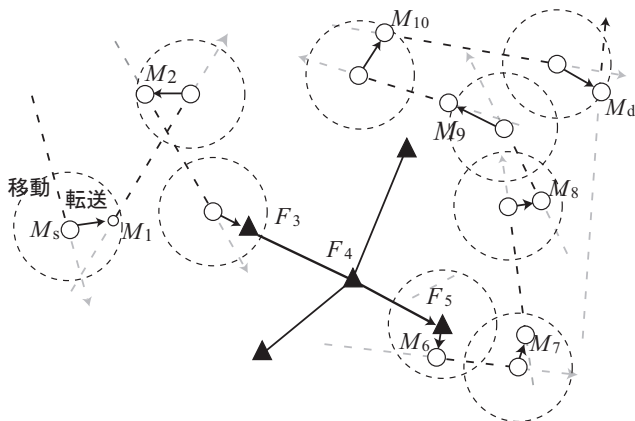


図 2 インフラネットワークを用いる DTN ルーティング

3. 提案手法

3.1 移動計画の組み合わせによる次ホップ選択手法

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、データメッセージ配送遅延の短縮が実現される。しかし、自律的かつ実時間的に移動計画を定める無線ノードからなる環境において、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方向のみに基づいて決定している。このため、各移動無線ノードは、自身と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と隣接位置、その移動計画を保持と転送の選択基準に用いることができない。逆に、データメッセージ配送遅延の短縮は、複数の無線ノードの移動計画の組み合わせによる DTN マルチホップ配送を考慮したデー

タメッセージの保持と転送の選択によって実現できる。

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と M_i が M_j の移動計画を入手することによって判断するからである。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 に近づけると判断するならば、 M_i は t_{ij} には M_j へのデータメッセージ転送を行わず、 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。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 に近づけると判断するならば、 M_i は t_{ij} に M_j へデータメッセージを転送する。

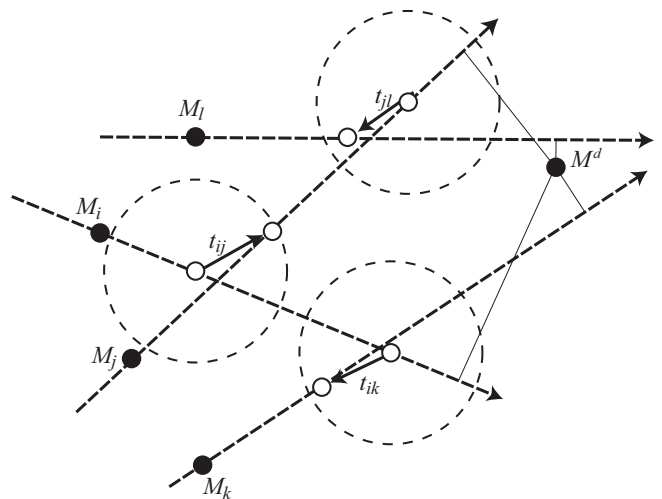


図 3 移動計画に基づく DTN ルーティング

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_i 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 のいずれか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_i 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。

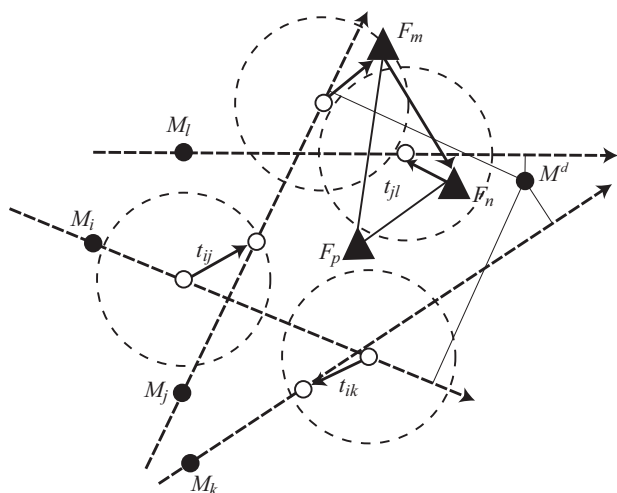


図 4 移動計画に基づくインフラネットワークを用いる DTN ルーティング

3.2 移動計画の拡散手法

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、移動無線ノード識別子 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 $\langle M_j, t_b^j, t_e^j, l^j(t) \rangle$ である。この移動計画は $t \leq t_e^j$ のみで有効であり、 $t > t_e^j$ では無効である。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 $\{MP^j\}$ 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 $\{MP^j\}$ 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。このとき、 M_i が既に移動無線ノード M_j についての移動計画 $\langle M_j, t_b^j, t_e^j, j^j(t) \rangle$ を保持しており、 M_k から同一の無線ノード M_j についての異なる移動計画 $\langle M_j, t_b^{j'}, t_e^{j'}, j^{j'}(t) \rangle$ 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、 $t_b^j < t_b^{j'}$ ならば M_k から取得した移動計画 $\langle M_j, t_b^{j'}, t_e^{j'}, j^{j'}(t) \rangle$ を保持し、 $t_b^j \geq t_b^{j'}$ ならば M_k から取得した移動計画 $\langle M_j, t_b^j, t_e^j, j^j(t) \rangle$ 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 $t > t_e^j$ である M_j の無効な移動計画 $\langle M_j, t_b^j, t_e^j, l^j(t) \rangle$ を 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通知されることが望まれる。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

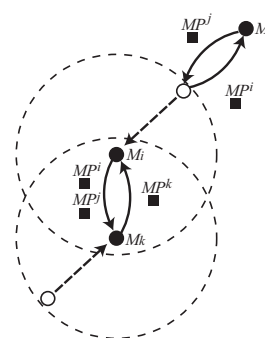


図 5 隣接移動無線ノード間の移動計画交換

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されるが、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。

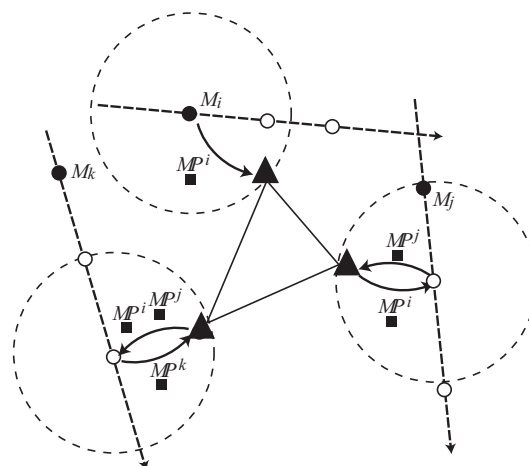


図 6 固定基地局群を介した移動計画の広域拡散

3.3 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 $SMP^i := \{MP^j\} (M_j \in MS^i)$ 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、隣接移動無線ノード M_j 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 ルーティング手法を提案する。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。

*2 保持していない場合のルーティングは後述する。

*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転送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転送することはできない。この不等式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 との間でデータメッセージを転送することができるのは、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転送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 からすべての移動無線ノード M_j 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 $t_{e(u)}^{kl}$ が最小となるときの u の値を u' とすると、 M_k から M_l へとデータメッセージを転送できる最も早い時刻 T^{kl} は、次式で与えられる。

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

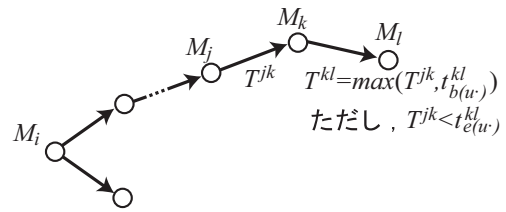


図 7 最早転送可能時刻

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を転送することができない場合には $T^{jk} := \infty$ とする*5。

ここでは、 M_i を根とする根付き木 TR を構成する。 M_i から各移動無線ノード M_j への TR 上のパスが求める無線マルチホップ配送経路である。 $T[M_j]$ 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 $T[M_j] := \infty$ 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 $P[M_j] := \perp$ とする。アルゴリズムが停止したときには、 $T[M_j]$ は 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) TR を M_i (根) のみからなる木とする。
- (2) $MN := MS^i - \{M_i\}$ とする。
- (3) $T[M_i] := t$ とする。 t は現在時刻である。
- (4) MN に含まれるすべての移動無線ノード M_j について、 $T[M_j] := T^{ij}$, $P[M_j] := M_i$ とする。
- (5) $\exists M_j \in MN$ について $T[M_j] \neq \infty$ である限り、以下を繰返す。
 - (a) $T[M_j]$ が最小である $M_j \in MN$ を選択し、 $P[M_j]$ の子ノードとして M_j を TR に加える。
 - (b) $MN := MN - \{M_j\}$ とする。
 - (c) $\forall M_k \in MN$ 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、 $T^{jk} < T[M_k]$ であるならば、 $T[M_k] := T^{jk}$, $P[M_k] := M_j$ とする。

このアルゴリズムが停止したとき、 TR に含まれる移動無線ノード M_j には時刻 $T[M_j]$ へデータメッセージを配送することが可能であり、 MN 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 $M_j \in TR$ へデータメッセージを配送するために、 TR 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] 各中継無線ノードの M^d への最接近距離の計算

*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。

Step 2 のアルゴリズムにおいて、 M_i を根とする木 TR 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 $M_j \in TR$ は、時刻 $T[M_j]$ 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 $[T[M_j], t_j^e]$ 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。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 $t \in [D[M_j], t_j^e]$ 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 $Dist(M_j) := |l^j(t_j^d), l^d(t_j^d)|$ 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、 $Dist(M_j)$ ($M_j \in TR$) が最小である M_j と定めることができる。したがって、木 TR 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 $T[M_k]$ においてデータメッセージを M_k へ転送する。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なると考えられる。

4. 評価

移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 $5,000\text{m} \times 5,000\text{m}$ 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。ここでは、各移動無線ノードの移動速度は $5\text{m}/\text{秒}$ 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。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。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、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における従来手法のデータメッセージの転送手法として以下の二手法を比較対象とする。

- 送信先無線ノードと隣接するか送信先無線ノードの有効な移動計画を取得するまでデータメッセージを保持する。
- 送信先無線ノードを含め、いずれかの無線ノードと隣接すれば、ただちにデータメッセージを転送する。

各条件におけるデータメッセージ配送遅延の測定結果を表 1–6 に示す。ここで、表 1–3 は移動計画のインフラネットワークを介した拡散を行なう手法、表 4–6 は拡散を行わない手法の結果である。また、表 1, 4 は送信先無線ノードの移動計画を保持しない場合に基地局への配送経路をデフォルトルートとする提案手法、表 2, 5 はデータメッセージを保持し続ける手法、表 3, 6 は最初の隣接無線ノードへデータメッセージを転送する手法である。

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り遅延の短い配送計画が策定可能であることによるものである。表 1–3 と表 4–6 との比較により、移動無線ノードの移動計画を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拡散することにより、各無線ノードの移動計画がより広範囲に位置するより多くの移動無線ノードへと通知され、配送遅延を平均 29.1%短縮することとなっていることが分かる。また、表 1, 2, 3 の比較、および、表 4, 5, 6 の比較により、送信先移動無線ノードの移動計画を保持しない中継無線ノードはデータメッセージを無線基地局へと暫定的に配送する提案手法が従来手法に対して平均 33.1%の配送遅延短縮を実現している。

表 1 配送遅延測定結果 (提案手法 1) (単位:秒)

	1	2	3	4	5
30	5506.1	6085.1	8474.8	7251.3	7691.9
60	6528.4	6061.1	6648.4	4757.8	5090.2
90	6489.3	4834.5	5002.2	4490.5	7298.6
120	6068.5	7520.7	7531.9	6160.5	4884.6
150	5892.8	5388.0	6639.0	5937.6	4786.4

表 2 配送遅延測定結果 (提案手法 2) (単位:秒)

	1	2	3	4	5
30	13731.2	11843.8	13415.3	13277.3	11169.5
60	8040.4	8182.9	10859.1	11205.2	15342.3
90	6782.7	7327.3	9522.1	8050.0	9326.8
120	7977.4	5077.1	9813.4	9022.4	9586.0
150	4004.5	7505.1	7517.9	6861.1	6509.3

表 3 配送遅延測定結果 (提案手法 3) (単位:秒)

	1	2	3	4	5
30	15912.2	10788.5	8401.6	7222.5	7691.9
60	6750.1	7041.4	7440.4	6274.4	7784.7
90	7131.3	6686.8	6952.2	7603.9	6606.1
120	7524.1	6892.7	7531.9	6197.3	6515.7
150	6972.1	6759.2	6780.2	6516.3	5509.7

表 4 配送遅延測定結果 (提案手法 4) (単位:秒)

	1	2	3	4	5
30	12871.4	12977.2	8355.1	8293.3	7601.4
60	7660.5	9132.6	10492.7	5614.4	5795.3
90	6785.0	7156.9	6279.3	8312.1	4471.3
120	8009.9	6111.3	6749.4	5472.6	5411.9
150	4161.8	4989.7	4474.1	6028.2	5948.3

表 5 配送遅延測定結果 (従来手法 1) (単位:秒)

	1	2	3	4	5
30	14161.4	13832.2	14400.6	15176.4	12630.1
60	11975.1	12870.5	15399.6	11901.3	14185.6
90	14645.2	11748.3	11634.9	11955.2	10047.1
120	12246.4	12199.5	11041.2	11290.1	11948.3
150	13342.5	13277.1	12813.9	12032.4	12658.2

表 6 配送遅延測定結果 (従来手法 2) (単位:秒)

	1	2	3	4	5
30	13726.5	14511.4	14192.3	12784.6	10482.8
60	12660.7	15293.7	13052.5	11860.8	11831.0
90	13308.5	11285.8	13444.6	11888.9	11727.3
120	14232.3	12637.2	13041.4	12580.4	13494.9
150	12368.0	11172.7	10155.2	10659.2	11436.4

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交換とを用いることで、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。さらに、固定基地局に多数の無線ノードの移動計画が集約される傾向があることを活用し、送信元移動無線ノードと中継移動無線ノードが送信先移動無線ノードの移動計画を取得していない場合には、最も短時間で到達可能な固定基地局を暫定送信先としてデータメッセージを配送する手法を提案した。シミュレーション実験

の結果、提案するふたつの手法はいずれもデータメッセージ配送遅延の短縮に寄与し、平均 31.1%の短縮を実現した。

謝辞

本研究は、東京電機大学総合研究所研究 Q12J-04 として行ったものである。

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).