

推薦論文

固定基地局を含む無線マルチホップネットワークにおける無線ノード移動計画を用いたDTN配送手法

岩井 正敏^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

受付日 2013年12月13日, 採録日 2014年5月17日

概要: 無線マルチホップネットワークにおいて, 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. 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無線マルチホップネットワークを構成する無線ノードへと広告し, 中継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遅延を最短とする経路である配送計画を策定し, 保持するデータメッセージの転送先無線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移動計画も同様の方法で広告することから, これを取得していない送信元無線ノードと中継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てデータメッセージを転送するルーティング手法を提案する.

キーワード: 耐遅延ネットワーク, 移動計画, ルーティング, 固定基地局, 暫定送信先

DTN Transmissions in Wireless Multihop Networks with Stationary Base Stations by Using Mobility Plans of Wireless Nodes

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

Received: December 13, 2013, Accepted: May 17, 2014

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 their 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 method based on mobility plans of mobile wireless nodes. Here, mobility plans determined autonomously are advertised by exchanges between neighboring nodes. An intermediate wireless 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 infrastructured network connecting stationary base stations. In addition, to support mobile destination wireless nodes, a source and 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.

Keywords: delay-tolerant networks, mobility plans, routing, stationary base stations, default routes

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, Adachi, Tokyo 120-8551, Japan

a) iwai@higlab.net

b) hig@higlab.net

本論文の内容は 2013 年 3 月のマルチメディア通信と分散処理研究発表会にて報告され, 同研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

1. はじめに

互いに無線信号到達範囲に含まれない移動無線ノード間におけるデータメッセージの無線マルチホップ通信によって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、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ため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ノードの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 1 つの方法として無線ノードの移動計画を活用するものが考えられる。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、全般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て共有することが可能な無線マルチホップネットワークや一部の無線ノードの移動計画が他のすべての無線ノードにあらかじめ広告されている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 [3]。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、広域に分布するより多数の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より多数の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、これらを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低遅延で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、データメッセージ配送遅延の短縮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必要な不可欠であるが、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送信元無線ノードと中継無線ノードがこれを保持しているとは限らない。ここで、インフラネットワークに接続された固定基地局は常時相互接続されていることから、各固定基地局が地理的に分散する移動無線ノードの移動計画をより多く取得していることが考えられる。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してデータメッセージの転送先を決定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{M} は移動無線ノードの集合であり、各無線ノードは GPS 受信機等の自身の現在位置を取得するためのデバイスを備えているものとする。また、 \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。また、 M_i が M_j と隣接していることは M_j からの無線信号を受信することによって検知するが、ここでは M_j からの無線信号は M_j を中心として無線信号到達距離を半径とする円板の領域にのみ到達するディスクモデルに基づいて議論し、各無線ノードは定期的にビーコンメッセージをブロードキャスト送信しているものとする。このとき、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。これまでに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 [6]。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

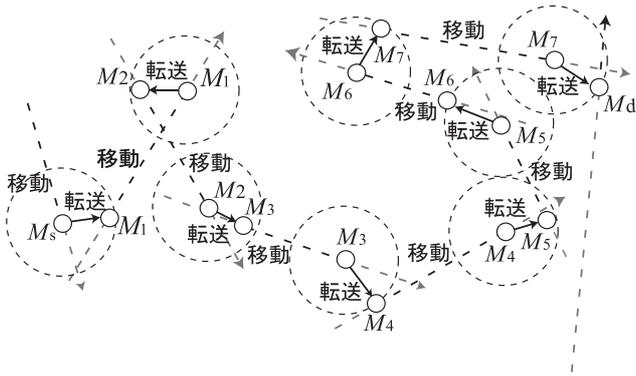


図 1 無線マルチホップネットワークにおける DTN ルーティング
 Fig. 1 DTN routing in wireless multihop network.

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。

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の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)。たとえば図 1 では、送信元移動無線ノード M_s から送信先移動無線ノード M_d への無線マルチホップ配送経路は構成できず、 M_s がデータメッセージ配送を要求した時点、および中継移動無線ノード M_i が前ホップ移動無線ノードからデータメッセージを転送された時点では次ホップ移動無線ノードと隣接していない。しかし、DTN ルーティングの適用により、 M_s および M_i が次ホップ移動無線ノードと隣接した時点でデータメッセージを転送することによって、 M_d までの配送が実現される。

DTN ルーティング手法として、無線ノードの移動が制御可能であることを前提とする Message Ferrying 手法 [8]、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

*1 論文 [7] 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。

の無線ノードが取得可能であることを前提とする手法 [3]、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 [1]、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 [4] が提案されている。いずれの手法においても移動計画に基づいた DTN ルーティングの適用により、配送遅延の短縮を実現している。ただし、本論文では、特定の移動無線ノードが移動計画について特別な性質を持つことを前提とはしないより一般的な状況を前提とする。すなわち、すべての移動無線ノードは、自律的、実時間的に移動計画を策定し、実行されるネットワークアプリケーションの要求に従ってデータメッセージの配送を開始するものとする。

論文 [4] 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、中継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、送信先無線ノードにより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、必要に応じてデータメッセージを転送する。複数の隣接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固定基地局を含む場合、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 [10] 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 では、移動無線ノード M_i 間を転送されてきたデータメッセージが M_2 から固定基地局 F_3 へと転送されている。このデータメッセージは、インフラネットワークを経由して任意の固定基地局へと低遅延で配送されるが、ここではルーティング手法に従って固定基地局 F_5 へと配送されたデータメッセージが隣接移動無線ノード M_6 へと転送されている。

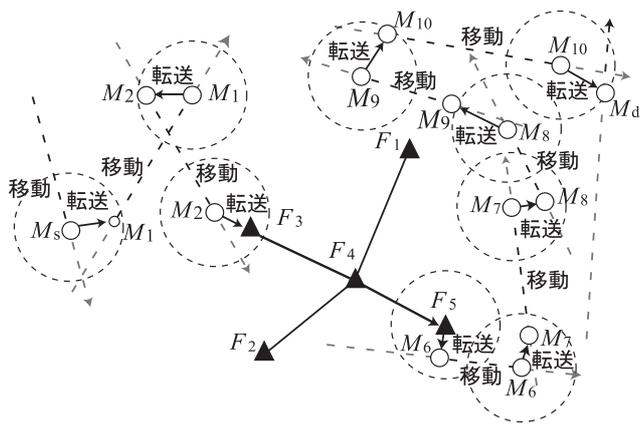


図 2 インフラネットワークを用いる DTN ルーティング
Fig. 2 DTN routing through infrastructure network.

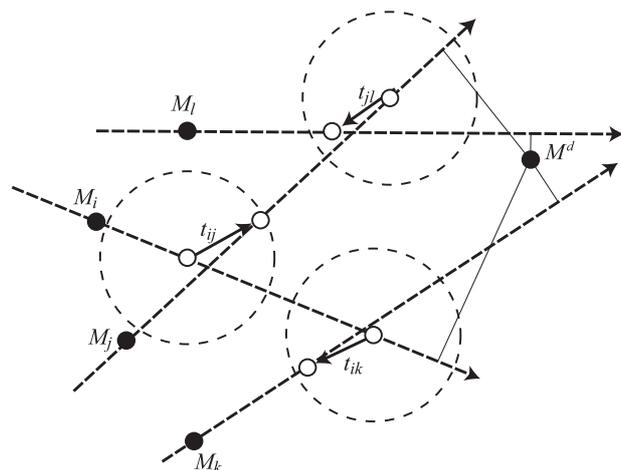


図 3 移動計画に基づく DTN ルーティング
Fig. 3 DTN routing based on mobility plans.

3. 提案手法

3.1 移動計画の組合せによる次ホップ選択手法

前章で述べたように、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無線マルチホップネットワークにおいて、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うか否かを隣接移動無線ノードの現在位置や現在の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、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、およびその無線ノードの移動計画を自身の保持するデータメッセージの転送先無線ノードの選択に用いることができない。しかし、複数の無線ノードの移動計画の組合せによる 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を DTN ルーティングに導入することによって、データメッセージ配送遅延の短縮が実現できることが考えられる。

たとえば、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 t_{ij} 以前に取得しており、 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場合には、 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 t_{ij} 以前に 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場合には、 M_i は t_{ij} に M_j へデータメッセージを転送する。

このように配送中のデータメッセージを保持する中継無

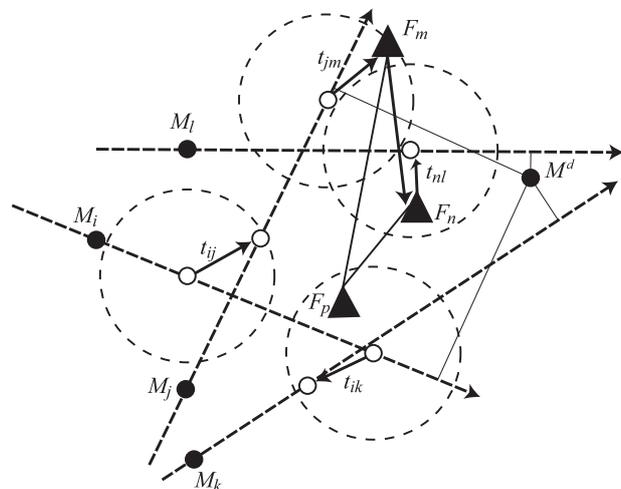


図 4 移動計画に基づくインフラネットワークを用いる DTN ルーティング
Fig. 4 Mobility plan based DTN routing through infrastructure network.

線ノードは、次ホップ無線ノードの決定を行う時点までに取得し保持している他の移動無線ノードの移動計画と固定基地局の位置に基づいてデータメッセージをより送信先無線ノードへと近づける配送計画を策定する。そして、これによって決定された自身の次ホップ無線ノードへとデータメッセージを転送する。

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

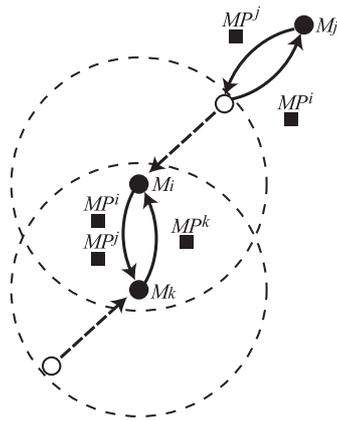


図 5 隣接移動無線ノード間の移動計画交換

Fig. 5 Mobility plan exchange among neighbor nodes.

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ただちに転送する必要はない。図 4 では、 M_l が F_n と隣接する時刻 t_{nl} に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。

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かかわらず、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 $t \in [t_b^j, t_e^j]$ のみで有効である。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、移動無線ノード集合 MS^i を 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とし、 $M_i \in MS^i$ である。また、 M_i にはすべての固定基地局の位置が広告されているものとする。 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 がすでに移動無線ノード 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、より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

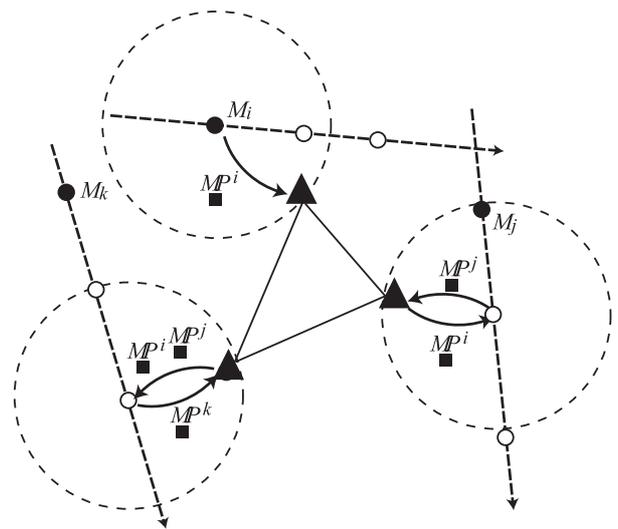


図 6 固定基地局群を介した移動計画の広域拡散

Fig. 6 Diffusion of mobility plans through infrastructure network.

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。特に、送信元無線ノードあるいは中継無線ノードが保持するデータメッセージを送信先無線ノードへ到達させる配送計画を策定するためには、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用いることとする。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、ただ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、移動計画の広域への拡散が実現される。

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

*2 保持していない場合のルーティングは 3.3 節で述べる。

*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。すなわち、固定基地局は時刻 t に依存せずつねに同じ位置に存在し続ける移動計画をすべての無線ノードに広告済みの移動無線ノードとして扱う。

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、保持するデータメッセージの転送先となる次ホップ隣接移動無線ノードを決定する。

なお、以下の手順は各無線ノードがデータメッセージ配送を要求する場合、隣接無線ノードから転送されたデータメッセージを受信する場合に加え、隣接無線ノードから新しい移動計画を受信する場合にも適用される。そのため、より配送遅延を短縮できる配送計画が得られることで次ホップ無線ノードを変更することが可能である。

[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。一般に、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。

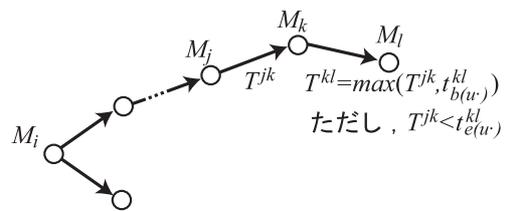


図 7 最早転送可能時刻

Fig. 7 Earliest receipt time evaluation.

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

[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である配送計画をダイクストラの SPF アルゴリズム [9] を応用した以下の手順に従って策定する。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。

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

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

^{*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へ t' にデータメッセージが到達可能であるとする。

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、以下を繰り返す。
 - (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 $T[M_j]$ に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

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 $[T[M_j], t_j^d]$ 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 $t \in [T[M_j], t_j^d]$ 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、 $Dist(M_j)$ ($M_j \in TR$) 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ときには、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。たとえば図 2 において、送信元移動無線ノード M_s が送信先移動無線ノード M_d の移動計画を保持していない場合、 M_s は固定基地局 F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 のいずれかに最も短時間で到達する DTN 手法を用いた配送計画を策定し、それに基づいて次ホップ無線ノードを決定する。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 の移動計画を取得し、保持するデータメッセージの配送計画の策定と次ホップ隣接移動無線ノードの決定を行うことが期待できる。
- 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。

これによって、図 8 に示すように配送中のデータメッセージを保持する中継移動無線ノード M_i が送信先移動無線ノード M_d の移動計画を取得している場合には、 M_j, F_m, F_n, M_l の順に転送されて M_d へと配送されるのに対

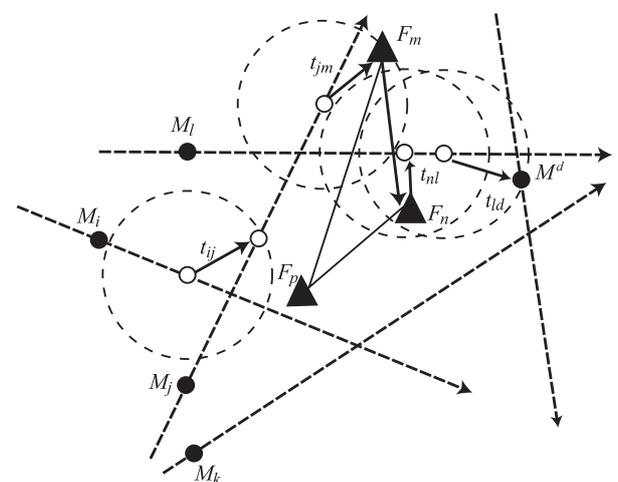


図 8 送信先移動無線ノードの移動計画取得時のルーティング
Fig. 8 DTN routing with mobility plan of destination node.

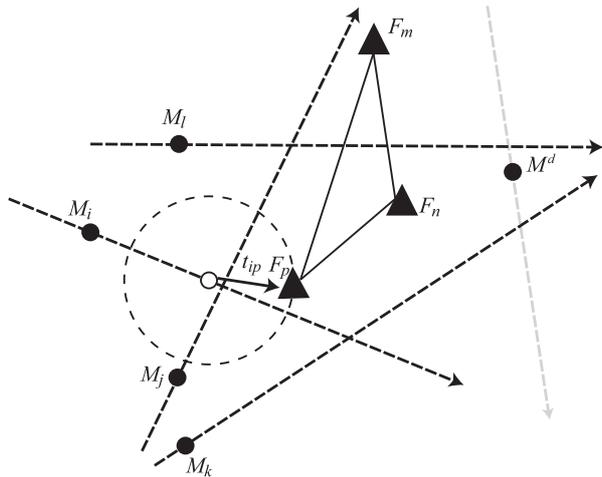


図 9 送信先移動無線ノードの移動計画未取得時のルーティング
Fig. 9 DTN routing without mobility plan of destination node.

して、 M_i が M_d の移動計画を保持していない場合には、このような M_d へデータメッセージを到達させる配送計画を策定することができない。そこで、データメッセージを最短時間で配送可能な固定基地局 F_p へと配送する (図 9)。以降、いずれかの固定基地局が M_d の移動計画を取得することによって、データメッセージは適切な固定基地局から保持と転送の組み合わせた無線マルチホップ配送によって M_d へと配送される。

4. 性能評価

本論文で提案した移動無線ノードの移動計画の広告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隣接移動無線ノード選択による DTN ルーティング手法の性能を MOVE 手法とシミュレーション実験によって比較評価する。また、固定基地局間を相互に接続するインフラネットワークを用いた移動計画の広告と送信先移動無線ノードの移動計画未取得時における固定基地局への暫定配送手法の導入による配送性能改善についても評価する。

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。また、本論文では移動無線ノードが低密度に分布する状況を想定していることから、互いに隣接する移動無線ノード対が発生する頻度がネットワーク全体で 1 秒あたり 0.1 回から 5 回となる 30–150 台の移動無線ノードと固定基地局 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 5m/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。そして、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

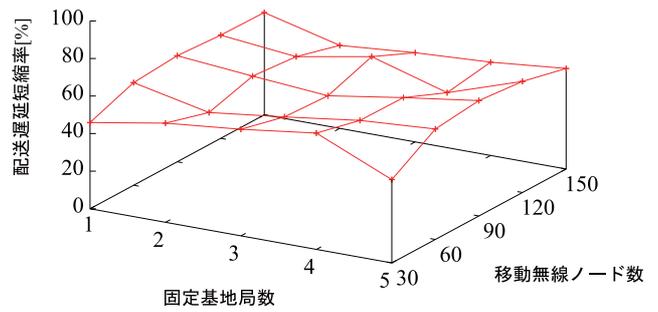


図 10 提案手法と MOVE 手法との配送遅延比較実験結果
Fig. 10 Transmission delay of data messages to stationary destination node.

ドへデータメッセージを配送する。ただし、MOVE 手法が送信先無線ノードの移動には対応していないことから、MOVE 手法との性能比較実験においては、選択された送信先無線ノードは移動しないものとし、その位置は送信元移動無線ノードがあらかじめ取得しているものとする。すべての実験結果は、500 の異なる初期配置による測定結果から最大と最小 5% のデータを除去したものの平均値である。

まず、MOVE 手法との性能比較実験の結果を示す。図 10 は、送信元移動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の配送遅延の測定結果である。いずれの固定基地局数、移動無線ノード数においても、提案手法が配送遅延を短縮していることが分かる。これは、MOVE 手法においては、中継移動無線ノードが現在の隣接移動無線ノードの移動速度という局所的な情報のみによって次ホップ移動無線ノードを選択しているのに対して、提案手法では、全域的ではないものの、提案する広告手法によって入手した複数の移動無線ノードの移動計画に基づいて配送計画を策定することによるものである。短縮率は 44.2% から 62.0% であり、固定基地局数、移動無線ノード数が多いほど大きくなるが、これは各移動無線ノードの移動計画がより短時間により広域に広告されることによるものである。全体の平均として 52.9% の配送遅延短縮が実現されている。

提案手法は、この結果のようにデータメッセージの配送遅延を短縮するが、隣接する無線ノード間での移動計画の交換がデータメッセージ配送要求の有無とは無関係に行われることが求められる。そのため、データメッセージの交換に加え、移動計画を保持する制御メッセージの交換が必要となる。この通信オーバーヘッドの増加について評価する。シミュレーション実験環境は前述のとおりであるが、各移動無線ノードのデータメッセージ送信要求間隔を 1, 10, 100 秒とする場合の提案手法の MOVE 手法に対するメッセージ数増加率を測定した結果を図 11 に示す。

いずれの送信要求間隔においても、移動無線ノード数の増加とともに提案手法の制御メッセージ数が MOVE 手法に対して相対的により大きくなっている。これは、転送データメッセージの有無とは無関係に移動無線ノードが互

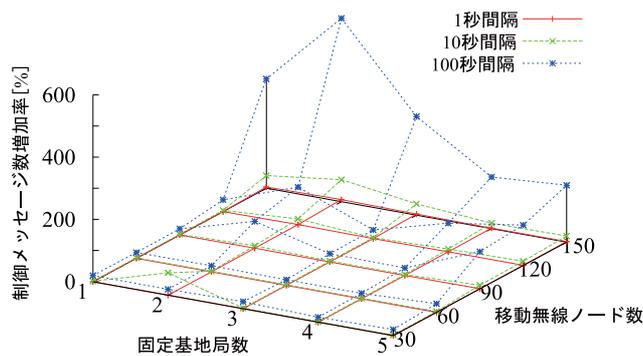


図 11 提案手法と MOVE 手法とのメッセージ数比較実験結果
 Fig. 11 Number of control messages.

いに隣接して移動計画を頻繁に交換することによるものである。このように、提案手法は MOVE 手法よりも高い通信オーバーヘッドを要するが、この差異はデータメッセージの送信間隔の縮小とともに小さくなる。すなわち、データメッセージが頻繁に交換されるネットワークでは、中継データメッセージを保持する移動無線ノードが増加し、MOVE 手法においても速度情報を頻繁に交換することによって同等の制御メッセージ交換が必要になる。したがって、提案手法を制御メッセージ交換のオーバーヘッドによって評価するならば、よりデータメッセージ送信頻度の高いネットワークで適用することが望ましいといえる。

次に、本論文で提案した移動計画を用いる次ホップ無線ノードの決定手法を適用するもとで、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 (従来手法 1)。
- 送信先無線ノードを含め、いずれかの無線ノードと隣接したならば、ただちにデータメッセージを転送する (従来手法 2)。

これらの手法と固定基地局の 1 つを暫定送信先とする提案手法による配送性能改善効果の評価する実験結果を図 12 および図 13 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計画が策定可能であることによるものである。図 12 と図 13 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 21.2% 短縮

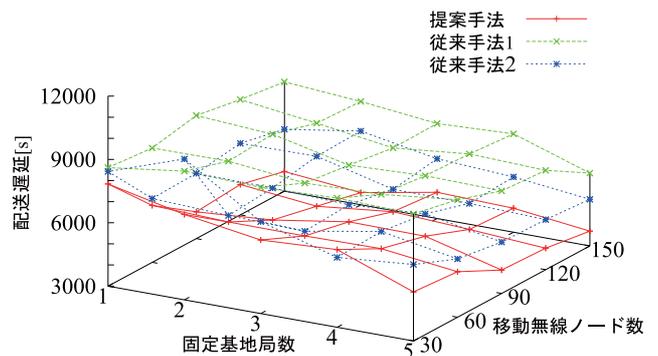


図 12 送信先移動無線ノードの移動計画未取得時の転送手法による性能比較実験結果 (移動計画広告にインフラネットワークを用いない場合)

Fig. 12 Transmission delay of data messages to mobile destination node without diffusion of mobility plans through infrastructure network.

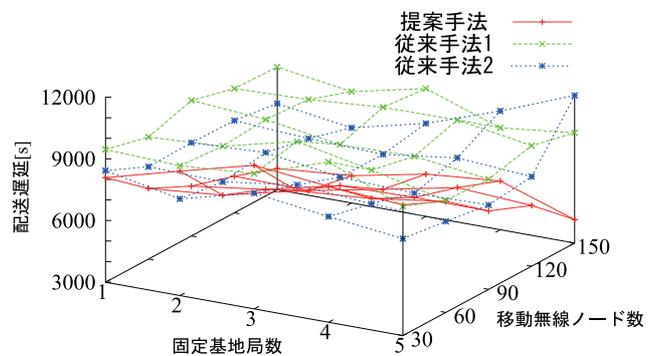


図 13 送信先移動無線ノードの移動計画未取得時の転送手法による性能比較実験結果 (移動計画広告にインフラネットワークを用いる場合)

Fig. 13 Transmission delay of data messages to mobile destination node with diffusion of mobility plans through infrastructure network.

することとなっていることが分かる。また、図 12 と図 13 の 3 つの配送手法を比較することにより、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 1 に対して平均 46.9%、従来手法 2 に対して平均 24.7% の配送遅延短縮を実現していることが分かる。したがって、固定基地局を暫定送信先とする手法は、データメッセージ配送遅延の短縮に対して有効であるといえる。

5. まとめ

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、中継移動無線ノードが保持するデータメッセージの転送先を隣接移動無線ノードの移動方向のみを基準として選択する MOVE 手法と比較して配送遅延を 52.9%短縮できることが明らかとなった。また、固定基地局を暫定送信先とすることで従来手法 1 に対して 46.9%、従来手法 2 に対して 24.7%の配送遅延短縮を実現することができた。

本論文では、移動無線ノードが移動計画に従って正確に移動することを前提としている。そのため、移動計画に完全に従った移動ができない場合には、計画どおり隣接移動無線ノードにデータメッセージを転送することができない場合が考えられる。そこで、隣接時間の長さを基準として、移動速度、移動方向の変動に対して頑強な経路を選択するような手法も考えられる。このような、移動速度変動を考慮した DTN 通信手法への拡張が今後の課題として考えられる。

参考文献

- [1] Chen, Z.D., Kung, H.T. and Vlah, D.: Ad Hoc Relay Wireless Networks over Moving Vehicles on Highway, *Proc. 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, *Proc. ACM SIGCOMM 2004*, pp.145–158 (2004).
- [4] Lebrun, J., Chuah, C.N., Ghosal, D. and Zhang, M.: Knowledge-Based Opportunistic Forwarding in Vehicular Wireless Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol.4, pp.2289–2293 (2005).
- [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] Perkins, C.E.: Ad Hoc Networking, Addison-Wesley (2000).
- [7] Seyama, T. and Higaki, H.: G-AODV+PCMTAG: Routing in MANET with Low Overhead Flooding and Route-Shortening, *Proc. International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks*, pp.103–110 (2008).
- [8] Zhao, W., Ammar, M. and Zegura, E.: A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp.187–198 (2004).
- [9] 野崎昭弘, 野下浩平: アルゴリズムの設計と解析 I, サイエンス社, pp.187–190 (1977).

- [10] 松下拓也, 塩川茂樹: MANET におけるトラフィック状況を考慮したモバイルゲートウェイ選択方式, *信学技報*, Vol.110, No.129, pp.45–50 (2010).

推薦文

本論文では、移動無線ノードが移動計画を相互に交換することでネットワーク内に拡散させ、それらの移動計画に基づいたルーティング手法を提案している。さらに、位置情報を取得していない無線ノードについて、暫定的な送信先として固定基地局を利用するルーティング手法を提案している。本提案手法の有効性もシミュレーション実験において検証しており、新規性のあるルーティング手法でありながら実用性が高い。以上より本論文は推薦に値する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 勝本道哲)



岩井 正敏 (学生会員)

平成元年生。平成 24 年東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科卒業。平成 26 年東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻修了。



桧垣 博章 (正会員)

昭和 42 年生。平成 2 年東京大学工学部計数工学科卒業。同年日本電信電話(株) NTT ソフトウェア研究所入所。現在、東京電機大学大学院先端科学技術研究科先端技術創成専攻、大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻、未来科学部ロボット・メカトロニクス学科教授。博士(工学)。分散システム, 分散アルゴリズム, 分散オペレーティングシステム, フォールトトレラントネットワーク, モバイルアドホックネットワークの研究に従事。平成 7 年情報処理学会全国大会奨励賞。平成 9 年情報処理学会山下記念研究賞。平成 17 年情報処理学会学会活動貢献賞。ACM, IEEE, 電子情報通信学会各会員。