

移動速度変動を想定した DTN ルーティング手法

千 明 陽^{†1} 梶 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として隣接ノードの位置、速度、移動計画を用いる分散的手法とすべてのノードの移動計画を用いる集中的手法とが提案されている。しかし、前者では情報が不十分であるために適切な次ホップ選択が困難であり、後者では通信コストと計算コストが膨大となる。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。また、ノードの移動速度が一定でない場合の到達率への影響をシミュレーション実験評価し、それに基づいて転送ノード隣接時間を考慮した DTN ルーティング手法への拡張を提案する。

DTN Routing for Mobile Nodes with Variable Speed

YO CHIGIRA^{†1} 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. For avoidance of communication overhead caused by copies of data messages, a unique next-hop node is selected based on locations, velocities, mobility plans and so on of neighbor nodes in distributed methods, and based on mobility plans of all nodes in global methods. However, in the former, due to lack of information about the future topology of the network, it is difficult for intermediate nodes to select their next-hop nodes with high reachability of data messages to the destination node. On the other hand, in the latter, high communication overhead for distribution of mobility plans and high computation overhead to determine next-hop node are required. This paper proposes a localized distribution method of mobility plans where each node distributes 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、移動計画を広域で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。ただし、各移動無線ノードの移動速度は必ずしも一定ではなく、時間とともに変動することを考慮するものとする。

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 $\mathcal{N} = (\mathcal{M}, \mathcal{L})$ 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 (M_i, M_j)

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

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⁵⁾。

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 ルーティング技術が提案されている⁴⁾。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）を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 Ferrying⁸⁾ 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 Routing⁷⁾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。また、Probabilistic Routing³⁾では、隣接移動無線ノードが送信先無線ノードと隣接する確率を過去の移動履歴から評価し、閾値以上の確率を持つ隣接移動無線ノードへデータメッセージを転送する手法である。

このように多種多様な DTN ルーティング手法が提案されているが、より一般的な自律移動無線ノードから構成されるネットワークにおいて、各移動無線ノードの移動計画を低い通信オーバーヘッドで拡散、取得し、それを活用して到達性の高い DTN ルーティングを実現する手法が十分に検討されていない。そこで、本論文では、データメッセージ配送とは独立に各移動無線ノードが局所的に移動計画を拡散し、これを取得した移動無線ノードが保持した

*1 論文⁶⁾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。

配送途中のデータメッセージの DTN ルーティングに使用し、より到達性を高める配送戦略 (データメッセージの保持と転送の選択) を構築する手法を考案する。

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、各移動無線ノードがそれぞれの移動計画に基づいて移動する場合、その移動計画情報に基づいてデータメッセージの DTN ルーティングを行なうことによって、データメッセージの送信先無線ノードへの到達率、配送遅延、通信オーバーヘッドを削減することが期待される。また、この移動計画が各移動無線ノードによって自律的に決定される場合には、各移動無線ノードがすべての移動無線ノードの移動計画を取得している、あるいは取得可能であることを前提とした DTN ルーティングは現実的ではない。そのため、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可能な他の移動無線ノードの移動計画に基づいて、隣接移動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ままの移動とを選択する DTN ルーティング手法が必要とされる。論文¹⁰⁾等では、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隣接移動無線ノードの移動計画に基づいて、隣接移動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ままの移動とを選択する DTN ルーティング手法が提案されている。しかし、この手法では、データメッセージを保持した移動無線ノードが以降に隣接する移動無線ノードへの転送によってより適切な DTN ルーティングを行なうことができる可能性を考慮することができない。さらに、1 ホップ隣接移動無線ノードの移動計画のみによって DTN ルーティングを行なっていることから、転送先移動無線ノードによる他の隣接移動無線ノードへの転送による効果を転送と保持の選択に考慮することができない、という問題点がある。

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 $t_{ji} > t_{ij}$ 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}。

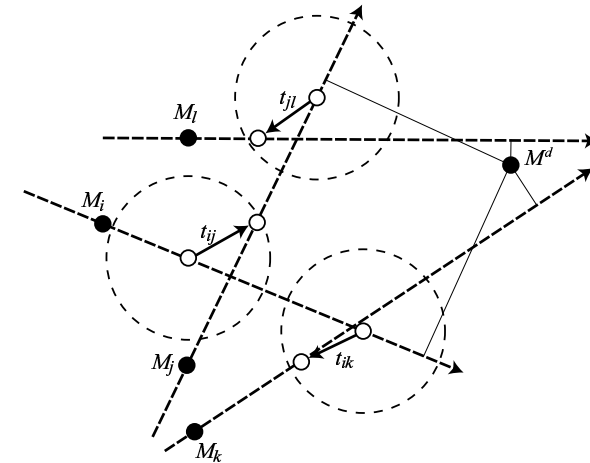


図 1 局所拡散させた移動計画に基づく DTN ルーティング

このような DTN ルーティングを実現するために、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 $\{MP^j\}$ ($M_j \in MS^i$) 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

*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_{ji} 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。

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。

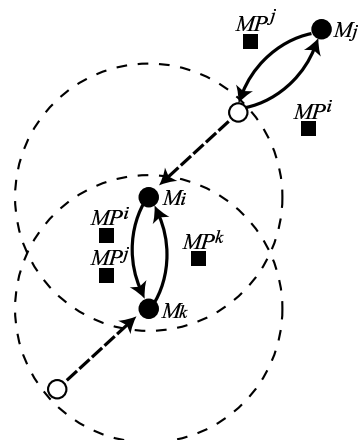


図 2 隣接移動無線ノード間の交換による移動計画の局所拡散

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

3.2 移動速度変動

前節では、各移動無線ノードの移動計画を局所的に拡散し、中継無線ノードが取得した移動計画に基づいてデータメッセージを転送する次ホップ無線ノードを選択する手法について述べた。ここでは、次ホップ無線ノードの選択基準として、中継無線ノードが取得済みの移動計画からデータメッセージが最も送信先無線ノードに接近すると判断される転送、移動の組み合わせを実現すること、を用いている。ただし、これは各移動無線ノードが正確に移動計画に従って移動した場合を想定しての判断である。図 3 に示すように移動無線ノード M_i, M_j が破線で示される直線経路に沿った移動計画に従っている場合でも、これらが隣接し、互いに無線信号到達範囲に含む時間が大きく異なる。 M_i と M_j の移動速度が変動する場合には、これらが隣接する時間も変動し、最悪の場合にはまったく隣接しないことも考えられる。この場合には、 M_i から M_j へのデータメッセージ転送に失敗するため、データメッセージを保持する M_i は、保持している移動計画から再度データメッセージ転送先の次ホップ移動無線ノードを選択しなければならない。

移動速度変動によるデータメッセージ配送性能への影響をシミュレーション実験によって評価する。ここでは、各移動無線ノードが保持する移動計画に基づいて速度変動がない前提のもとで、最も送信先無線ノードへ近づくことができると判断した転送と移動の組み合わせ

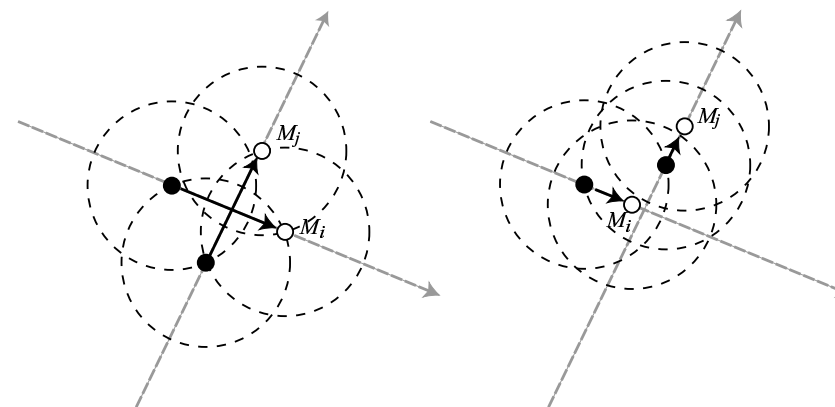


図 3 移動無線ノードの隣接時間

を実現する次ホップ無線ノードにデータメッセージを転送する方法を適用し、移動速度変動の大きさによってデータメッセージの送信先無線ノードへの到達率がどのように変化するかを実験評価する。

5,000m × 5,000m のシミュレーションフィールドのひとつの頂点を原点として、送信元無線ノード M_s と送信先無線ノード M_d を (1,000m, 1,000m) および (4,000m, 4,000m) の位置に固定する。無線信号到達距離 100m の移動無線ノード 50-300 台を一樣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。移動目標は、フィールド全体を対象として一樣分布乱数によってランダムに決定し、現在位置と移動目標を結ぶ直線上を移動する。移動目標に到達した無線ノードには、一樣分布乱数によってランダムに決定する 0-50s の停止時間を設ける。この停止時間においても、データメッセージの送受信、隣接無線ノードとの移動計画の交換は継続する。移動速度は、平均 15m/秒の正規分布に従うものとして 1 秒ごとにランダムに決定する。移動速度の標準偏差 (σ) を 0.0-1.0m/秒の範囲で変化させた場合のデータメッセージ到達率を評価する。シミュレーション時間は、3,000 秒とする。なお、比較対象としてすべての移動無線ノードの移動計画がすべての移動無線ノードで共有されていることを前提として次ホップ移動無線ノードを選択する手法²⁾を移動速度変動がない環境に適用した場合を従来手法とする。シミュレーション実験結果を図 4、図 5、図 6 に示す。

図 4 は、移動無線ノード数とデータメッセージ到達率の関係を示している。移動速度変動の大きさに関わらず、移動無線ノード数の増加とともに到達率が上昇している。移動無線ノード数が 200 台以下の場合、 $\sigma \geq 0.8$ m/秒では $\sigma \leq 0.6$ m/秒に比べて到達率が低く、200 台を超える場合、 $\sigma = 1.0$ m/秒では、 $\sigma \leq 0.8$ m/秒に比べて到達率が低くなっている。いずれも従

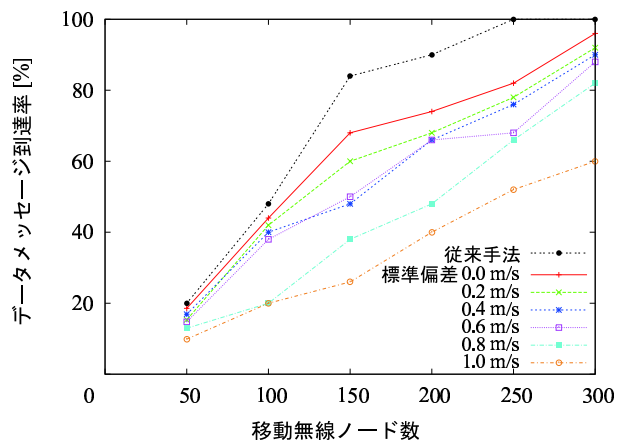


図 4 データメッセージ到達率 (1)

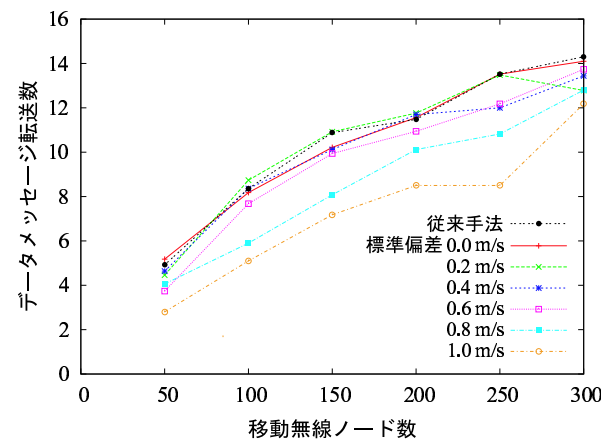


図 6 通信オーバーヘッド

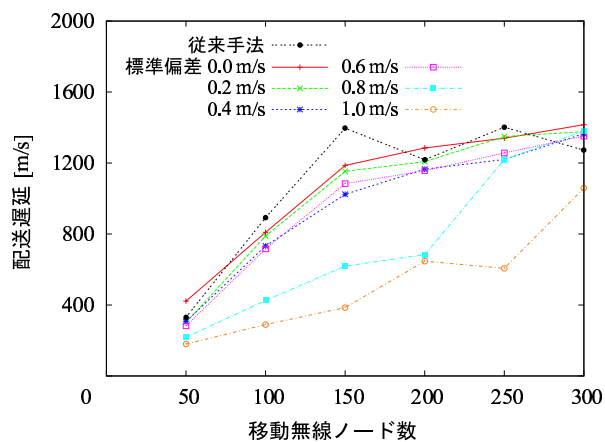


図 5 配送遅延

来手法を下回っているものの、従来手法は遅延なくすべての無線ノード移動計画をすべての無線ノードが得ているという非合理的な前提によるものであることから移動速度変動の大きい環境では十分な到達率を実現していると言える。一方、データメッセージ配送遅延は $\sigma \leq 0.6$ m/秒では従来手法とほぼ同等である。移動速度変動の大きな環境では到達率その

ものが低いことから、逆に配送遅延の短い場合にのみ到達可能であることが分かる。なお、通信オーバーヘッドも配送遅延と同様の結果となっている。

無線ノードの移動速度変動が大きくなるほどデータメッセージ到達率が低下するという実験結果から、各無線ノードが取得している移動計画からデータメッセージの転送と移動の組み合わせを評価する際に、移動速度変動を考慮する必要性が高いことが分かる。すなわち、移動速度が一定であることを前提として、データメッセージがどれだけ送信先無線ノードに近づくことができるか、という評価項目だけではなく、いかに安定的にデータメッセージを転送することができるかを示す項目を用意する必要がある。ひとつの方法として、図 2 と図 3 に示されるように、中継無線ノード M_i から M_j へデータメッセージを転送する場合、一定速度で移動することを前提としてこれらの無線ノードが隣接する時間を計算し、より長い隣接時間を持つ中継無線ノード間転送を高く評価する手法を用いる、すなわち、安定的なデータメッセージ配送を高く評価することが考えられる。

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 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。ただし、3.2 節の考察に基づき、安定的な転送を実現するために転送可能時間 (隣接時間) を用いた決定手法とする。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。

[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。

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

つまり、 M_j と M_k が隣接し、データメッセージを交換することが可能な時間 E^{jk} は次式で計算される。

$$E^{jk} = \max(t_b^{jk}, t_b^j, t_b^k) - \min(t_e^{jk}, t_e^j, t_e^k)$$

E^{jk} は M_j と M_k がともに移動計画に完全に従っている場合の隣接時間であり、移動速度の変動によって E^{jk} も変動する。 M_j と M_k の間でデータメッセージ転送が高い成功率を得るための方法として、 E^{jk} が閾値 \bar{E} よりも長い場合のみデータメッセージが転送可能であると M_i が判定する手法が考えられる。逆に、 $E^{jk} < \bar{E}$ である場合には、データメッセージの交換は不可であるとして Step 2 の処理を行なうこととする。

[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⁹⁾ を用いて計算する。

ここで、図 8 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。

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

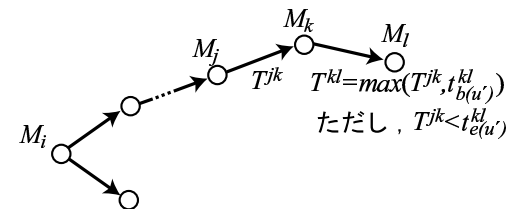


図 7 最早転送可能時刻

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. 評価

本章では、前章で提案した速度変動を考慮した移動計画に基づく DTN ルーティング手法の有効性を評価するために、接続時間閾値 \bar{E} の設定値による接続性の違いをシミュレーション実験評価する。ここでは、5,000m × 5,000m のシミュレーション領域の (1,000m, 1,000m) および (4,000m, 4,000m) に送信元無線ノード M_s と送信先無線ノード M_d を固定し、無線信号到達距離 100m の移動無線ノード 100 台を一樣分布乱数を用いてランダムに初期配置

する。各無線ノードの移動はランダムウェイポイントモデルに従うものとする。ただし、平均移動速度を 7.5m/秒、15m/秒、30m/秒とし、移動速度標準偏差を 0.0–1.0m/秒とする指数分布に従った速度変動を 1 秒ごとに行なうものとする。なお、目標地点到達時の停止時間は 0–50 秒の一樣分布乱数に従うものとし、シミュレーション時間は、各速度に対して 6,000 秒、4,500 秒、2,500 秒とした。接続時間閾値 \bar{E} を 0.0–4.0 秒とした場合のシミュレーション実験結果を図 9、図 10、図 ?? にそれぞれ示す。ここで、速度変動を考慮しない手法は $\bar{E} = 0.0$ の場合に相当する。いずれの平均移動速度においても、 \bar{E} に大きな値を設定するとデータメッセージ到達率が低下する。これは、隣接時間が閾値以下の移動無線ノード対では、データメッセージ転送ができないと判断されるため、DTN ルーティング計算が適切な解を得ることができなくなっているためである。また、閾値をある値以下とすると到達率が明確に低下する結果は本実験では得ることができなかった。これは、現在のシミュレーション設定値の範囲では、速度変動による影響を単純な接続時間閾値の設定では効果的に縮小することができていないことを示している。

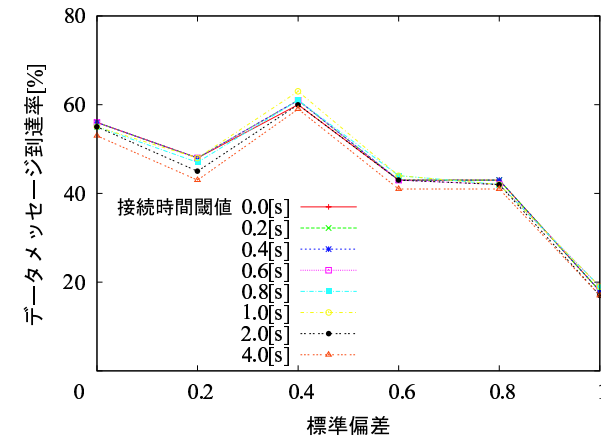


図 8 速度変動に対する隣接時間閾値設定効果の評価実験結果 (7.5m/秒)

5. まとめと今後の課題

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近づけることが

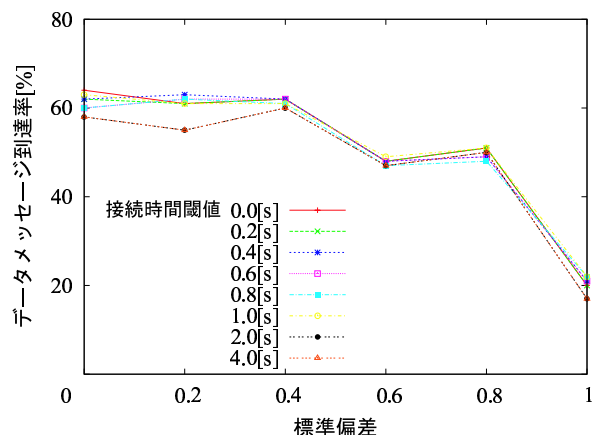


図9 速度変動に対する隣接時間閾値設定効果の評価実験結果 (15m/秒)

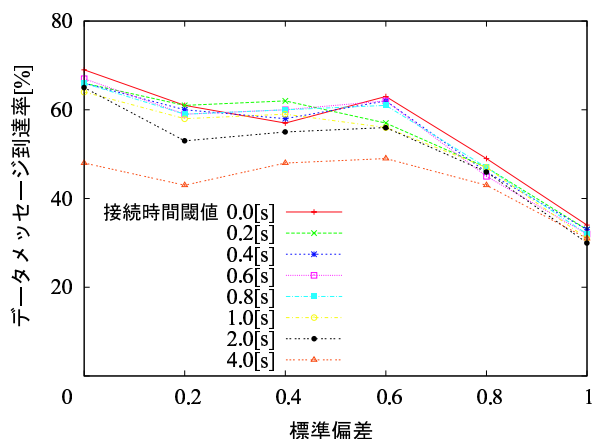


図10 速度変動に対する隣接時間閾値設定効果の評価実験結果 (30m/秒)

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メッセージを転送する DTN ルーティング手法を提案した. 本論文で報告したシミュレーション実験設定の範囲においては, 隣接時間閾値を設定する手法の有効性を確認することができなかった. 提案手法が有効に機能するのは, 各移動無線ノードが次ホップ無線ノードを決定する際

の予測経路ホップ数がある程度大きい場合であり, そのためにはある数以上の移動無線ノードの移動計画を中継移動無線ノードが取得している必要がある. そのため, この取得移動計画画数を評価する必要がある. また, 本論文の提案手法では \bar{E} を一定値としているが, 現在時刻から離れるほど速度変動による接続時間の変動が大きくなることから \bar{E} を時間変動させる ($\bar{E}(t)$ を t に対する増加関数とする) ことで改善される可能性もある. これらの課題に今後は取り組む予定である.

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) Jain, S., Fall, K. and Patra, R., "Routing in a Delay Tolerant Network," Proceedings of the ACM SIGCOMM 2004, pp.145-158 (2004).
- 3) Lindgren, A., Doria, A and Schelen, O., "Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks," Lecture Notes in Computer Science, No.3126, pp.239-254 (2004).
- 4) Parrell, S. and Cahill, V., "Delay- and Disruption-Tolerant Networking," Artech House (2006).
- 5) Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley (2000).
- 6) 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).
- 7) Vahdat, A. and Becker, D., "Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks," Technical Report CS-200006, Duke University (2000).
- 8) 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).
- 9) 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).
- 10) 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," 情報処理学会研究報告, Vol.2008, No.227, pp.25-32 (2008).