

## 広域無線アドホックネットワークのための 拡張RH2SWLの性能評価

松村 真吾<sup>†1</sup> 桧垣 博章<sup>†1</sup>

アドホックネットワークにおける無線ノード列によるマルチホップ配送において、データメッセージ群の高スループット配送を実現するためには、経路内衝突を回避、削減することが必要である。RH2SWL手法では、単一チャンネル通信を前提として、配送経路を順次短縮無線リンク列で構成することによって経路内の隠れ端末問題を解決している。しかし、順次短縮無線リンク列で接続可能な送信無線ノード間距離が限られていることから、広域アドホックネットワークではRH2SWL手法を適用できない問題がある。本論文では、2つの異なるチャンネルを用いてデータメッセージ転送を行なう無線リンクをマルチホップ配送経路に含むことによって、経路内衝突を回避しながら無線リンク長を拡大するRH2SWLの拡張手法を提案する。チャンネルの適用手法として対等チャンネル手法と通常チャンネル/補助チャンネル手法の2つを示し、後者の方が経路検出成功率が高いことをシミュレーション実験によって示す。

### Performance Evaluation of Extended RH2SWL for Wide-Area Wireless Ad-Hoc Networks

SHINGO MATSUMURA<sup>†1</sup> and HIROAKI HIGAKI<sup>†1</sup>

For achieving higher end-to-end throughput of data messages with wireless multihop transmission in ad-hoc networks, collisions and contentions among wireless nodes in a transmission route are required to be avoided or reduced. Under an assumption that each wireless node communicates by using a single channel, collisions are avoided by RH2SWL since a transmission route consists of a sequence of hop-by-hop shortening wireless links. However, distance between a source and a destination wireless nodes connected by a sequence of hop-by-hop shortening wireless links is limited. Therefore, it is difficult for RH2SWL to be applied in wide-area ad-hoc networks. This paper proposes an extension of RH2SWL by introduction of an extending wireless link into a transmission route in which a different channel from that used in the previous hop is applied. Here, no collisions occur and connectivity by using a multihop transmission route is improved. In addition, an extended RH2SWL routing protocol is designed and evaluated in simulation experiments.

### 1. 背景と目的

コンピュータ技術とネットワーク技術の発達により、移動コンピュータを構成要素を含むモバイルネットワークの普及が進んでいる。ここで、携帯性の高いノート型PCやPDA、あるいは小型軽量化を特に必要とするセンサノード等では、搭載可能なバッテリー容量が必ずしも大きくないことから、無線送信電力を無制限に大きくすることはできない。また、無線通信は共通の電磁場を媒体として利用するブロードキャストメディアであり、無線信号の衝突回避の観点からも、データメッセージの送信元無線ノードが送信先無線ノードと常に直接通信する方法が適切であるとはいえない。限られた無線通信電力を用いる無線ノード群によって構成されるモバイルネットワークにおいて高い接続性を得るためには、送信元無線ノードから送信先無線ノードまで配送される各データメッセージを中継無線ノードが順次転送する無線マルチホップ配送が用いられる。これまでに、データメッセージの無線マルチホップ配送経路を決定するさまざまなルーティングプロトコルが提案されている<sup>2)</sup>。

IEEE802.11<sup>5)</sup>をはじめとするCSMA/CAに基づく無線LANプロトコルでは、異なる無線ノードが送信した無線信号が衝突する隠れ端末問題<sup>3)</sup>を回避するためにRTS/CTS制御が導入されている。これによって無線信号の衝突を回避することが可能となるが、無線マルチホップ配送経路に含まれる2ホップ近隣の無線ノードは同時に無線信号を送信することができなくなる。この競合によって、各無線ノードの無線信号送信機会が減少し、エンドエンドスループットが低下する問題がある。このマルチホップ配送経路上の2ホップ近隣無線ノード間の競合を回避するために、各無線ノードが次ホップ無線ノードに到達可能な最小送信電力を用いてデータメッセージを送信する機構を備えることを前提として、マルチホップ配送経路を順次短縮される無線リンク列によって構成するRH2SWL (Routing Protocol for Multihop Transmission along a Sequence of Hop-by-Hop Shortening Wireless Links)を提案している<sup>1)</sup>。

しかし、無線通信リンクを順次短縮させなければならないという制約条件から、送信元無線ノードと送信先無線ノードとの間の距離が大きくなる広域無線マルチホップネットワークでは経路検出率が低下し、可用性が損なわれる問題がある。本論文では、各無線ノードで互いに干渉しない2つのチャンネルが使用可能であることを前提とし、順次短縮無線リンク列でデータメッセージ転送に用いる通常チャンネルと伸長無線リンクのみでデータメッセージ転送に用いる補助チャンネルとして使い分けることによって、隠れ端末問題による経路内のデータメッセージ転送の衝突を回避する無線マルチホップ配送経路の検出率を改善する手法を提

<sup>†1</sup> 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

案する．また，2チャンネルを対等に適用する手法とシミュレーション実験による比較評価を行ない，提案手法の有効性を示す．

## 2. 関連研究

無線マルチホップネットワークにおいては，単一マルチホップ配送経路内における衝突，競合を削減，回避するための手法と複数マルチホップ配送経路間における衝突，競合を削減，回避する手法とが提案されている．本論文では，前者の問題について議論する．なお，ここではデータメッセージ配送には単一チャンネル  $c$  のみを用いることを前提とする．

無線マルチホップ配送経路  $R$  に含まれる各中継無線ノード  $M_i$  は，前ホップ無線ノード  $M_{i-1}$  から受信したデータメッセージを次ホップ無線ノード  $M_{i+1}$  へ転送する．したがって， $M_i$  は  $M_{i-1}$  の無線信号到達範囲に含まれ， $M_i$  の無線信号到達範囲には  $M_{i+1}$  を含む．各無線ノードの無線信号送信電力が一定である場合，隣接無線ノードは互いに相手を無線信号到達範囲に含むことになる．したがって， $M_i$  の無線信号到達範囲には  $M_{i-1}$  を含み， $M_i$  は  $M_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれる(図1)．すなわち， $M_i$  は  $M_{i-1}$  と  $M_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれることとなり， $M_{i-1}$  と  $M_{i+1}$  は互いに隠れ端末の関係となる．そのため，これらの送信する無線信号の  $M_i$  における衝突によって無線通信リンク  $|M_{i-1}M_i|$  を転送されるデータメッセージが再送信されることによるスループットの低下を回避するためには，RTS/CTS 制御の導入によって隠れ端末問題を解決することが考えられる．しかし，RTS/CTS 制御によって  $M_i$  における衝突は回避可能となるものの， $M_{i-1}$  と  $M_{i+1}$  は同時にデータメッセージを転送することができない競合が発生することとなり，データメッセージの転送待ちによってエンドエンドのスループットが低下する．論文<sup>6)</sup>では， $M_{i-1}$  の  $M_i$  に対する隠れ端末数に応じて  $|M_{i-1}M_i|$  でのデータメッセージ転送に RTS/CTS 制御を用いるか否かを決定する手法が提案されている．また，無線マルチホップ配送における RTS/CTS 制御のオーバーヘッドによるスループット低下を縮小するための手法として MARCH<sup>4)</sup> が提案されている．しかし，いずれの手法も競合の発生を回避するものではない．

論文<sup>1)</sup>では，無線マルチホップ配送経路を順次短縮する無線リンクで構成することによって，互いに隠れ端末である  $M_{i-1}$  と  $M_{i+1}$  との間の競合を解消する手法 RH2SWL を提案している．ここでは，図2に示すように各中継無線ノード  $M_i$  において  $|M_{i-1}M_i| > |M_iM_{i+1}|$  を満たす無線マルチホップ配送経路を探索，検出し， $M_i$  が  $M_{i+1}$  を無線信号到達範囲に含むための最小送信電力でデータメッセージを転送する．このため， $M_i$  は  $M_{i-1}$  の無線信号到達範囲に含まれる一方， $M_{i+1}$  の無線信号到達範囲には含まれないため， $M_{i-1}$  と  $M_{i+1}$  の競合が解消され，これらが同時にデータメッセージを転送することが可能となる．ただし，順次短縮する無線通信リンクによって経路を構成する制約から，ホップ数の大きな経路ほど次ホップ無線ノードを検出することが困難となり，経路検出率の低下を避けることがで

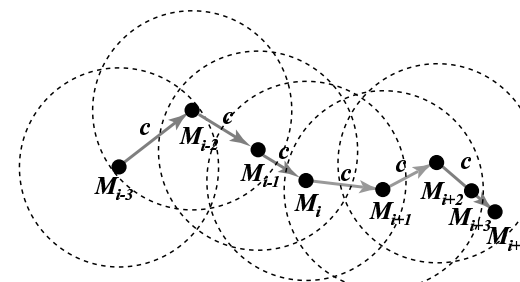


図1 送信電力一定の場合の無線マルチホップ配送

きない．特に送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの距離が大きくなる広域無線マルチホップネットワークへの適用が困難である．経路探索プロトコルにおける経路探索要求メッセージ  $Rreq$  のフラッディングでは，各無線ノードがすべての隣接無線ノードによってブロードキャスト送信される  $Rreq$  メッセージを受信することから，次ホップ無線ノードの検出可能性がより高くなる場合には  $Rreq$  メッセージの再送信を行なうことで経路検出率を改善する RH2SWLwRB を論文<sup>7)</sup>で提案している．しかし，再送信による通信オーバーヘッドの拡大が問題である．

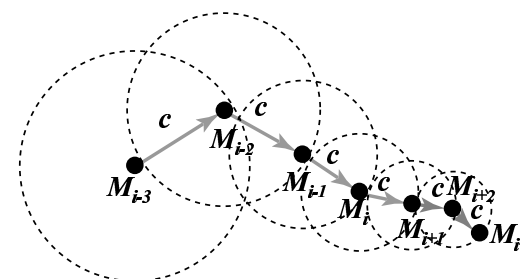


図2 順次短縮リンク列による無線マルチホップ配送経路

## 3. 提案手法

### 3.1 チャンネル変更による無線リンク伸長

RH2SWL 手法では，無線マルチホップ配送経路を順次短縮無線リンク列で構成することによって，経路内隠れ端末問題を回避し，データメッセージ転送の経路内衝突発生を防

止ることによって高スループット配送を実現している．しかし，マルチホップ配送経路  $R = \{M_0 \dots M_n\}$  の無線リンク列が順次短縮となる条件  $|M_{i-1}M_i| > |M_iM_{i+1}|$  は  $i$  が大きくなるほど充足することが困難となる．これは，中継無線ノード  $M_i$  の次ホップ中継無線ノード  $M_{i+1}$  が  $M_i$  を中心として半径  $|M_{i-1}M_i|$  の円の内部に存在しなければならず， $|M_{i-1}M_i|$  が  $i$  が大きくなるほど小さくなるためである．このため，送信元無線ノード  $M_s$  から送信先無線ノード  $M_d$  までの距離  $|M_sM_d|$  が長くなるほど順次短縮無線リンク列からなる配送経路を検出することは困難になり，ある距離以上ではほとんど配送経路を検出することができない．

この問題を解決するために，本論文では，異なる2つのチャネルを使い分けることによって短縮した無線リンクを伸長する手法を提案する．RH2SWL手法では，単一のチャネル  $c$  をすべての無線リンクで用いることを前提としている．本論文では，各無線ノードが波長が異なり互いに干渉しない  $c$  と  $c'$  の2つのチャネルを使用可能であることを前提とし，短縮した無線リンクを伸長することで，より経路長の長い無線マルチホップ通信を可能とする．すなわち， $c$  を用いて RH2SWL 手法によって構成された順次短縮無線マルチホップ配送経路検出において，中継無線ノード  $M_i$  の隣接無線ノード  $M$  のすべてが  $|M_{i-1}M_i| > |M_iM|$  を満足することができないことを検出した場合<sup>\*1</sup>でも， $M_i$  から次ホップ無線ノード  $M_{i+1}$  への無線リンク  $|M_iM_{i+1}|$  においてチャネル  $c'$  を用いることによって  $|M_{i-1}M_i| < |M_iM_{i+1}|$  とすること，すなわち， $|M_iM_{i+1}|$  を伸長リンクとすることが可能である．ここで， $M_i$  を中心として半径  $|M_iM_{i+1}|$  の円の内部に  $M_j$  ( $j < i$ ) が含まれることがあるが，無線リンク  $|M_{j-1}M_j|$  で  $c$  を用いて転送されるデータメッセージと  $|M_iM_{i+1}|$  で  $c'$  を用いて転送されるデータメッセージが衝突することはない．

なお， $M_{i+1}$  以降の順次短縮無線マルチホップ配送経路は，伸長した無線リンク長  $|M_iM_{i+1}|$  を基準として構成されるが，そこでのチャネル適用手法には次の2つの手法が考えられる．  
[対等チャネル手法]  $M_{i+1}$  以降の順次短縮無線マルチホップ配送経路は  $c'$  を用いて構成される．なお， $c'$  を用いた順次短縮無線マルチホップ配送経路が中継無線ノード  $M_i$  の次ホップ無線ノードの検出に失敗することで延長不能となった場合には， $c$  を用いる伸長無線リンクを導入することで延長を可能とする(図3)．

[通常チャネル/補助チャネル手法]  $M_{i+1}$  以降の順次短縮無線マルチホップ配送経路は  $c$  を用いて構成される．すなわち， $c'$  を用いるのは伸長無線リンクのみとし，他の無線リンクではすべて  $c$  を用いる．このとき， $c$  を通常チャネル， $c'$  を補助チャネルとよぶ．

\*1 RH2SWL 手法では，経路探索プロトコルにおいて  $M_i$  の次ホップとなり得る無線ノード  $M$  のみが最大送信電力で経路探索メッセージ  $Rreq$  をブロードキャスト送信する．そこで，この  $Rreq$  メッセージに前ホップ無線ノード  $M_i$  の ID を付与する． $M_i$  が  $Rreq$  メッセージのブロードキャスト送信時にタイマをセットし，自身の ID が付与された  $Rreq$  メッセージ受信時にタイマをリセットする機構を導入する．そして，タイムアウトの検出をもって次ホップ無線ノードへ伸長リンクを導入することを決定する．

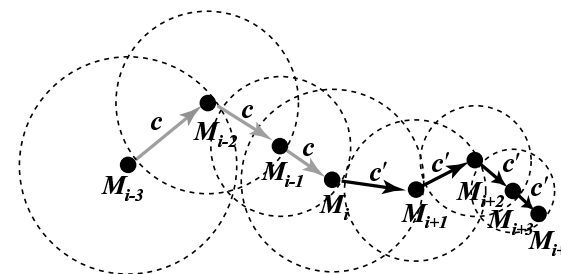


図3 対等チャネル手法

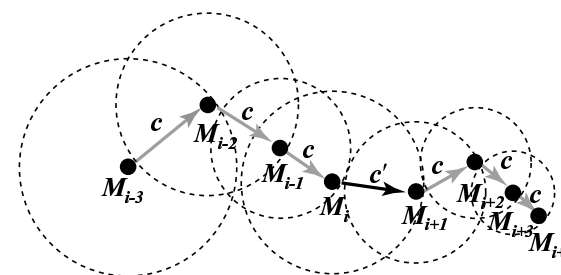


図4 通常チャネル/補助チャネル手法

現在普及している移動無線ノードでは，同時に異なる複数のチャネルに対して受信待機することはできないのが一般的である．すなわち，無線リンク  $|M_iM_{i+1}|$  にチャネル  $c$  が割当てられた場合， $M_i$  からデータメッセージは  $c$  を用いて転送されることから， $M_{i+1}$  は  $c$  で受信待機する．このため， $M_{i+1}$  が同時に他の無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードとなる場合，この前ホップ無線ノードからは  $c$  を用いてデータメッセージが転送されなければならない．すなわち，この経路においては  $M_{i+1}$  は  $c'$  を用いる無線リンクの受信無線ノードとなることはできない．この制約から，無線マルチホップ配送要求頻度が高く，要求配送量が大きい(無線マルチホップ配送経路の継続使用時間が長い)無線マルチホップネットワークにおいては，無線ノードが複数の無線マルチホップ配送経路に含まれる頻度が高くなることが考えられる．そこで本論文では，通常チャネル/補助チャネル手法について，その無線マルチホップ配送経路構成手法を検討する．

### 3.2 無線リンク伸長にともなう経路内衝突の回避

無線リンク  $|M_iM_{i+1}|$  では補助チャネルを用いたデータメッセージ転送を行なうことによって，これを  $|M_{i-1}M_i| < |M_iM_{i+1}|$  を満たす伸長無線リンクとし， $M_i$  以降

をこれを基準とした順次短縮無線リンク列として構成する．これによって，送信元無線ノード  $M_s$  からより遠距離にある  $M_d$  との間にデータメッセージ転送の衝突を回避したマルチホップ配送経路を構築することができる．

ただし，伸長無線リンク  $|M_i M_{i+1}|$  の終点無線ノード  $M_{i+1}$  の次ホップ中継無線ノード  $M_{i+2}$  の選択においては，データメッセージ転送の衝突回避のために無線リンク長  $|M_{i+1} M_{i+2}|$  に制約を課す必要がある．ここで，伸長無線リンク長  $|M_i M_{i+1}|$  は  $M_i$  の最大送信電力による無線信号到達距離以下の任意の距離となり得る．図5に示すように， $M_{i+1}$  は  $M_{i-1}$  の次ホップ中継無線ノードとならなかったことから  $|M_{i-1} M_{i+1}| > |M_{i-2} M_{i-1}| (> |M_{i-1} M_i|)$  であるが， $M_{i+1}$  は  $M_{i-1}$  の最大送信電力による無線信号到達範囲に含まれることがある．このとき， $|M_i M_{i+1}| > |M_{i+1} M_i|$  を満たす任意のノードを  $M_{i+1}$  の次ホップ中継無線ノード  $M_{i+2}$  とすると， $|M_{i+1} M_{i+2}| > |M_{i-1} M_{i+1}|$  を満たす可能性がある． $M_{i+1}$  が無線信号到達距離が  $|M_{i+1} M_i|$  となる送信電力を用いた場合， $M_{i-1}$  を無線信号到達範囲に含むことを意味する．つまり， $M_{i-1}$  で隠れ端末問題によるデータメッセージ転送の経路内衝突が発生する．

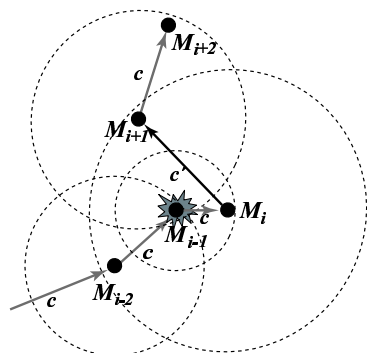


図5 無線リンク伸長による経路内衝突

この問題を解決するためには， $|M_{i+1} M_{i+2}| < |M_{i-1} M_{i+1}|$  を満足するように無線中継ノード  $M_{i+2}$  を定めなければならない．ここで，RH2SWL手法では，経路探索メッセージ  $Rreq$  をつねに最大送信電力でブロードキャスト送信し，その無線信号到達範囲にあるすべての無線ノードが受信電力から送信無線ノードとの距離を計算することから， $M_{i-1}$  で  $M_{i+1}$  と経路内衝突が発生する場合には  $M_{i+1}$  は  $M_{i-1}$  がブロードキャスト送信した  $Rreq$  メッセージを受信しており， $M_i$  から伸長無線リンクによる次ホップ中継無線ノード探索のため

にブロードキャスト送信された  $Rreq$  メッセージを受信する時点で距離  $|M_{i-1} M_{i+1}|$  を取得済みである．したがって， $|M_{i+1} M_{i+2}| < \min(|M_i M_{i+1}|, |M_{i-1} M_{i+1}|)$  を満たす  $M_{i+2}$  を定めることによって，伸長無線リンクの導入による経路内衝突の発生を防止することができる(図6)．なお，この場合の  $M_{i+2}$  の探索も  $M_{i+1}$  がブロードキャスト送信する  $Rreq$  メッセージにピギーバックする無線リンク長を  $\min(|M_i M_{i+1}|, |M_{i-1} M_{i+1}|)$  とすることによって，RH2SWL手法の順次短縮無線リンクによる次ホップ中継無線ノードの探索と同様の方法で実現することができる．また， $M_{i+2}$  から最大送信電力で送信された  $Rreq$  は  $M_{i+1}$  には受信されるが  $M_{i-1}$  と  $M_i$  には受信されない． $|M_i M_{i+1}|$  と  $|M_{i+1} M_{i+2}|$  ではそれぞれ  $c'$  と  $c$  が用いられることから， $M_{i+1}$  での衝突は発生しない．以上により， $|M_{i+1} M_{i+2}|$  は制約なく定めることが可能である．

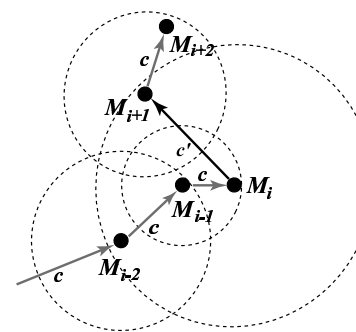


図6 無線リンク長の追加制約による経路内衝突回避

### 3.3 経路探索プロトコル

本論文で提案する補助チャネルを用いる伸長無線リンクを含む順次短縮リンク列による無線マルチホップ配送経路を探索するためのプロトコルを設計する．提案プロトコルは，単一チャネルを用いた経路探索メッセージ  $Rreq$  のフラッディングによるオンデマンド(リアクティブ)型のプロトコルである．また， $Rreq$  メッセージを中継転送した無線ノード ID 列を  $Rreq$  メッセージにピギーバックする．これは，経路検出メッセージ  $Rrep$  を送信先無線ノード  $M_d$  から送信元無線ノード  $M_s$  へ検出経路に沿って転送することで，すべての中継無線ノードと  $M_s$  の経路表に  $M_d$  へ配送するための次ホップ無線ノードと次ホップ無線ノードまでの距離を登録するために用いられることに加えて，3.2節で述べた伸長無線リンク導入後の経路内衝突を回避するために用いられる．

$Rreq$  メッセージには，以下の情報がピギーバックされる．

- ・ 送信先無線ノード ID  $Rreq.dst$
- ・ 前ホップ無線ノードとの距離  $Rreq.dist$
- ・ 前ホップ無線ノード ID  $Rreq.prev$
- ・ 経路無線ノード列  $Rreq.seq$
- ・ データメッセージ転送チャンネル  $Rreq.chan$

[送信元無線ノード  $M_s = M_0$ ]

- 1) 以下の情報をピギーバックした経路探索メッセージ  $Rreq$  をブロードキャスト送信する。

$Rreq.dst := M_d;$   
 $Rreq.dist := \infty;$   
 $Rreq.prev := null;$   
 $Rreq.seq := \{|M_s\};$   
 $Rreq.chan := \text{通常チャンネル};$

各無線ノード  $M$  には、隣接無線ノード ID および隣接無線ノードとの距離の対 ( $NID, dist$ ) を保持する隣接ノードキャッシュ  $M.cache$  を備える。隣接無線ノード  $M'$  から経路探索メッセージ  $Rreq$  を受信し、その受信電力から計算した距離  $|M'M|$  が  $M'$  とその前ホップ無線ノード  $M''$  との距離  $|M''M'|$  以上である ( $|M''M'| \leq |M'M|$ ) 場合、 $M'$  は  $M$  の次ホップ無線ノードとはならない。ただし、3.2 節で述べたように  $M$  が  $M'$  以降他の無線ノードを中継ノードとして転送された  $Rreq$  メッセージを受信し、 $M'$  から  $M$  へマルチホップ転送される間に伸長無線リンクを含む場合には、 $M$  から転送されるデータメッセージが  $M'$  に到達可能となり隠れ端末問題による経路内衝突が発生する可能性がある。そこで、 $M.cache$  には  $M'$  の無線ノード ID と  $|M'M|$  の対を保持する。 $M$  の次ホップ無線ノード探索時には、 $M$  からの距離が  $|M'M|$  未満であることが条件として課される。

[中継無線ノード  $M_i$ ]

- 1) 隣接無線ノード  $M_{i-1}$  からブロードキャスト送信された経路探索メッセージ  $Rreq$  を受信した  $M_i$  は、その受信電力から  $|M_{i-1}M_i|$  を計算する。

- 1-1)  $Rreq$  が既に送信済みの  $Rreq$  と同一ならば、処理を終了する。
- 1-2)  $Rreq.dist \leq |M_{i-1}M_i|$  ならば、 $M_i.cache$  に  $(M_{i-1}, |M_{i-1}M_i|)$  を追加して処理を終了する。
- 1-3)  $Rreq.dist > |M_{i-1}M_i|$  ならば、以下の情報をピギーバックした経路探索メッセージ  $Rreq'$  をブロードキャスト送信する。ただし、 $M_j$  は  $Rreq.seq$  に含まれ、 $M_i.cache$  に対  $(M_j, |M_jM_i|)$  が含まれる  $M_i$  のすべての隣接無線ノードとする。

$Rreq'.dst := Rreq.dst;$   
 $Rreq'.dist := \min(|M_{i-1}M_i|, |M_jM_i|);$

$Rreq'.prev := M_{i-1};$   
 $Rreq'.seq := Rreq.seq + M_i;$   
 $Rreq.chan := \text{通常チャンネル};$

- 2) タイマ  $T_i$  を設定する。

2-1)  $T_i$  がタイムアウトする以前にいずれかの隣接無線ノードから  $Rreq.prev = M_i$  である  $Rreq$  メッセージを受信したならば、 $T_i$  をリセットして処理を終了する。

2-2) いずれの隣接無線ノードからも  $Rreq.prev = M_i$  である  $Rreq$  を受信することなく  $T_i$  がタイムアウトしたならば、以下の情報をピギーバックした経路探索メッセージ  $Rreq'$  をブロードキャスト送信する。

$Rreq'.dst := Rreq.dst;$   
 $Rreq'.dist := \infty;$   
 $Rreq'.prev := M_{i-1};$   
 $Rreq'.seq := Rreq.seq + M_i;$   
 $Rreq.chan := \text{補助チャンネル};$

[送信先無線ノード  $M_d = M_n$ ]

- 1) 隣接無線ノード  $M_{n-1}$  からブロードキャスト送信された経路探索メッセージ  $Rreq$  を受信した  $M_d$  は、その受信電力から  $|M_{n-1}M_d|$  を計算する。

- 1-1) 既にマルチホップ配送経路が検出済みならば処理を終了する。
- 1-2)  $Rreq.dist \leq |M_{n-1}M_d|$  ならば、処理を終了する。
- 1-3)  $Rreq.dist > |M_{n-1}M_d|$  ならば、マルチホップ配送経路  $Rreq.seq + M_d$  が検出される。

送信先無線ノード  $M_d$  で検出されたマルチホップ配送経路は、経路応答メッセージ  $Rrep$  を検出経路に沿って  $M_d$  から送信元無線ノード  $M_s$  へとユニキャスト転送されることによって、 $M_s$  およびすべての中継無線ノードへと通知される。 $Rreq$  メッセージ転送時に計算された無線リンク長  $|M_iM_{i+1}|$  は  $M_{i+1}$  で計算されているが、この距離はデータメッセージ転送の無線送信電力を決めるのに用いられるため  $M_{i+1}$  から  $M_i$  へ通知されなければならない。これも  $Rrep$  メッセージのユニキャスト転送時に実現する。そこで、 $Rrep$  メッセージには以下の情報をピギーバックする。

- ・ 送信先無線ノード ID  $Rrep.dst$
- ・ 検出したマルチホップ配送経路  $Rrep.seq$
- ・ 前ホップ無線ノードとの距離  $Rrep.dist$

なお、 $Rrep$  メッセージも通常チャンネルで最大送信電力を用いて転送される。

[送信先無線ノード  $M_d = M_n$ ]

- 1) 以下の情報をピギーバックした経路応答メッセージ  $Rrep$  を前ホップ無線ノード  $M_{n-1}$  へユニキャスト転送する .

$$\begin{aligned} Rrep.dst &:= M_d; \\ Rrep.seq &:= Rreq.seq; \\ Rrep.dist &:= |M_{n-1}M_d| \end{aligned}$$

[中継無線ノード  $M_i$ ]

- 1) 次ホップ無線ノード  $M_{i+1}$  からユニキャスト転送された経路応答メッセージ  $Rrep$  を受信した  $M_i$  は, 経路表に (送信先無線ノード ID, 次ホップ無線ノード ID, 送信距離, データメッセージ転送チャンネル) :=  $(Rrep.dst, M_{i+1}, Rrep.dist, Rreq.chan)$  の 4 項組を追加する . ただし,  $Rreq$  は受信した  $Rrep$  に対応する  $Rreq$  メッセージである .

- 2) 以下の情報をピギーバックした経路応答メッセージ  $Rrep'$  を前ホップ無線ノード  $M_{i-1}$  へユニキャスト転送する .

$$\begin{aligned} Rrep'.dst &:= Rrep.dst; \\ Rrep'.seq &:= Rrep.seq; \\ Rrep'.dist &:= |M_{i-1}M_i| \end{aligned}$$

[送信元無線ノード  $M_s = M_0$ ]

- 1) 次ホップ無線ノード  $M_1$  からユニキャスト転送された経路応答メッセージ  $Rrep$  を受信した  $M_s$  は, 経路表に (送信先無線ノード ID, 次ホップ無線ノード ID, 送信距離, データメッセージ転送チャンネル) :=  $(Rrep.dst, M_1, Rrep.dist, Rreq.chan)$  の 4 項組を追加する . ただし,  $Rreq$  は受信した  $Rrep$  に対応する  $Rreq$  メッセージである .

#### 4. 性能評価

本論文で提案した 2 チャンネルを用いて順次短縮無線リンク列に伸長リンクを導入し, 広域無線マルチホップネットワークにおいても隠れ端末問題を解決し, 経路内衝突を回避した無線マルチホップ通信を実現する手法の性能評価を行なう . ここでは, 2 チャンネルのふたつの適用方法である通常チャンネル/補助チャンネル手法 (提案手法) と対等チャンネル手法, オリジナル RH2SWL の 3 つの手法について, 経路検出要求メッセージの送信先無線ノードへの到達率, すなわち無線マルチホップ配送経路の検出率をシミュレーション実験で評価する . ここでは,  $5,000m \times 5,000m$  の正方形領域に無線ノードを一様分布乱数に基づいてランダムに配置する . 各無線ノードの最大送信電力による無線信号到達距離は  $100m$  である . また, 送信元無線ノード位置を正方形領域の中心に固定する .

図 7 に経路検出率の測定結果を示す . 順次短縮リンク列のみによって無線マルチホップ配送経路を構成する RH2SWL 手法では, 無線リンク長の短縮によって遠方の送信先無線ノードとの間の経路を検出することが困難である . そのため, 無線ノード数 (無線ノード分

布密度) にほぼ依存せず, 全体の 10% 程度の送信先無線ノード (送信元無線ノードからの距離が  $800m$  程度の距離までに分布する送信先無線ノード) までのみ, 無線マルチホップ経路を検出することができている . 一方, 2 チャンネルを用いることで無線マルチホップ配送経路に伸長リンクを導入するふたつの手法では, 送信元無線ノードから遠方に位置する送信先無線ノードに対しても無線マルチホップ配送経路を検出することが可能であり, 経路検出率が大幅に改善されている . また, 通常チャンネル/補助チャンネル手法は, 対等チャンネル手法よりも経路検出率が高い . これは, 各中継無線ノードは単一のチャンネルでのみ受信待機することが可能であることから, 複数の無線マルチホップ配送経路に含まれる中継無線ノードは, これらの経路を配送されるデータメッセージを同一のチャンネルで受信待機することが必要であることによるものである . 図 8 および図 9 では, それぞれ対等チャンネル手法と通常チャンネル/補助チャンネル手法において 100 本の無線マルチホップ配送経路を構成した時点での各中継無線ノードへの割当てチャンネル ( $c$  または  $c'$ ) を示している . ここでは, いずれの経路にも含まれていない無線ノードは省略している . また, 領域全体を  $4 \times 4$  の領域に分割し, それぞれに  $c$  と  $c'$  が割当てられた中継無線ノード数を示している . 図 8 のように対等チャンネル方式では, 各分割領域においてそれぞれのチャンネルがほぼ同数の無線ノードに割当てられている . したがって, 順次短縮無線マルチホップ配送経路を追加する場合には, すでにいずれかの経路に含まれ, チャンネルが割当てられている無線ノードのうちの半数は, この経路に含むことができないことになる . これに対して通常チャンネル/補助チャンネル方式では, 図 9 に示すように割当てられたチャンネルのほとんどは通常チャンネル  $c$  であり, ごく一部に  $c'$  が割当てられている . 追加経路においても, そのほとんどにおいて  $c$  が割当てられることから, 提案手法がより高い経路検出成功率を実現している . 以上により, 伸長無線リンクの導入は広域無線マルチホップネットワークにおける順次短縮無線マルチホップ配送経路の検出率を改善し, 特に, 通信要求発生頻度が高く, 無線マルチホップ配送経路の継続使用時間が長い場合には, 通常チャンネル/補助チャンネル手法が高い経路検出率を実現する .

また, 配送経路に 1Mbps, 2Mbps でデータメッセージを配送した場合のエンドエンド配送遅延とデータメッセージの配送成功率を評価する . 評価には, 通常チャンネル/補助チャンネル手法によって拡張した RH2SWL によって検出された無線マルチホップ配送経路を用いる手法と AODV によって検出された無線マルチホップ配送経路を用いる手法を用いる . 図 10 および図 11 は, エンドエンド配送遅延の測定結果である . ホップ数の増加とともに, 配送遅延の短縮効果が顕著となっている . 順次短縮無線リンク列によって経路を構成することによって隠れ端末問題が解消されているため, 競合による配送遅延の延長を削減しているためである . また, 図 12 および図 13 にデータメッセージの配送成功率を示す . AODV によって検出された経路では, 経路内の隠れ端末間の競合によって再送信回数が増加し, 中継無線ノードで破棄されるデータメッセージ数が増える一方, RH2SWL によって検出された経



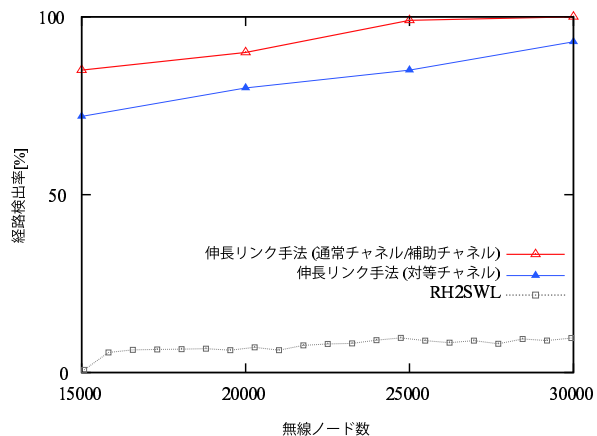


図 7 Rreq フラッディングの到達率

路では隠れ端末問題が生じないため、配送途中で破棄されるデータメッセージが削減されている。ただし、経路間の衝突の影響により提案手法でも配送経路のホップ数の増加とともに配送成功率は低下しているものの、AODV による従来手法に対しては、全経路長に対して配送成功率を改善している。

以上により、提案手法である通常チャネル/補助チャネル手法による RH2SWL の拡張は、対等チャネル手法に対して経路検出成功率の点で優位であり、データメッセージ配送の遅延短縮、配送成功率向上の点で従来手法 (AODV) の性能を大幅に改善するものとなっている。

## 5. ま と め

本論文では、データメッセージ転送の経路内衝突が隠れ端末問題によって発生することを回避して高スループットのデータメッセージ配送を実現する RH2SWL 手法の経路検出率を広域アドホックネットワークで改善する拡張手法を提案した。RH2SWL ではマルチホップ配送経路を順次短縮無線リンク列で構成するが、本論文ではデータメッセージ配送に 2 つの異なるチャネルを用いることによって伸長無線リンクを導入し、より広域に分布する送受信無線ノード間の配送経路を検出する手法を導入した。また、伸長無線リンクにのみ異なるチャネルを用いる通常チャネル/補助チャネル手法が伸長無線リンクごとにチャネルを入れ替える対等チャネル手法よりも高い経路検出率が得られることを示した。さらに、経路内隠れ端末問題を解消していない従来手法に対して、データメッセージ配送成功率の向上とエンドエンド配送遅延の短縮による性能改善が得られていることをシミュレーション実験によ

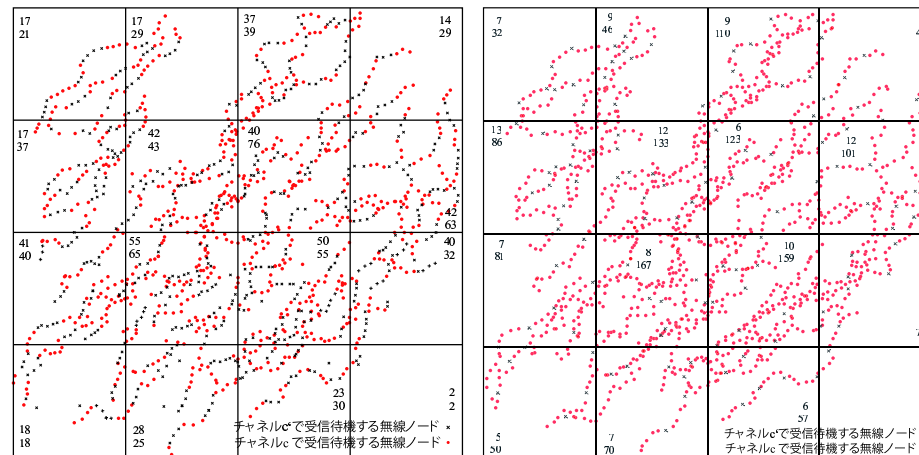


図 8 対等チャネル手法における受信チャネル分布

図 9 通常チャネル/補助チャネル手法における受信チャネル分布

て明らかにした。この改善は配送経路長が長くなるほど顕著であり、本論文の提案手法によって広域アドホックネットワークにおける高性能化が実現できることが明らかとなった。

## 参 考 文 献

- 1) Numata, Y. and Higaki, H., "Routing and Communication Protocols for Higher Throughput in Wireless Ad-Hoc Networks," Proc. of 7th Int. Conf. on Wireless and Optical Communications, pp.68-74 (2007).
- 2) Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-wesley (2000).
- 3) Tobagi, F.A. and Kleinrock, L., "Packet Switching in Radio Channels: Part II - The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution," IEEE Transactions on Communications vol.23, No.12, pp.1417-1433 (1975).
- 4) Toh, C.K., Vassiliou, V., Guichal, G. and Shih, C.H., "MARCH: A Medium Access Control Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks," Proc. of 21st IEEE MILCOM, pp.512-516 (2000).
- 5) "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," Standard IEEE 802.11 (1997).
- 6) 秋元, 重安, 森永, "隠れ端末の存在を考慮した適応的な RTS/CTS 制御の導入," マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, vol.2010, No.11, pp.137-142 (2010).
- 7) 沼田, 桧垣, "RH2SWLwRB: 経路検出率を改善した順次短縮経路検出プロトコル," 情処研報, vol.2007, No.44, pp.85-90 (2007).

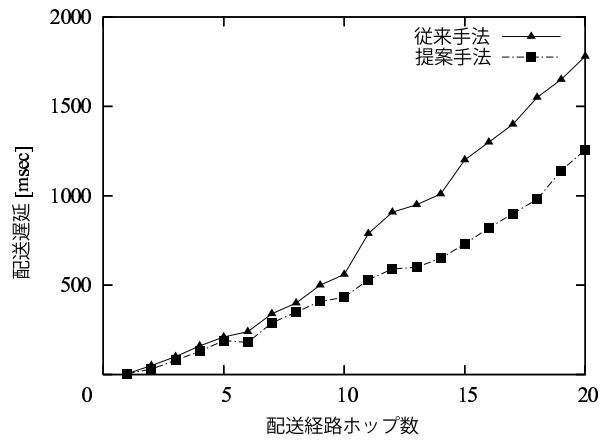


図 10 配送遅延 (1Mbps)

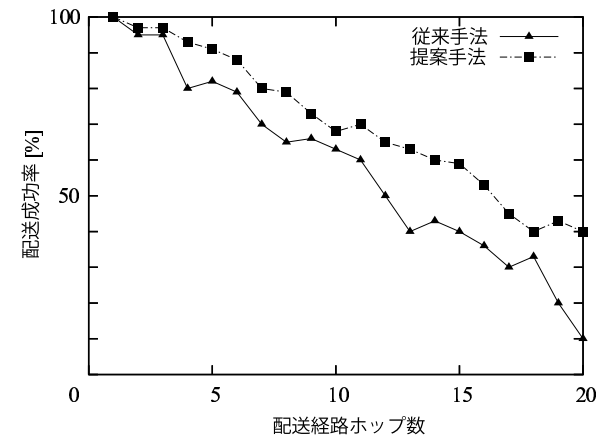


図 12 配送成功率 (1Mbps)

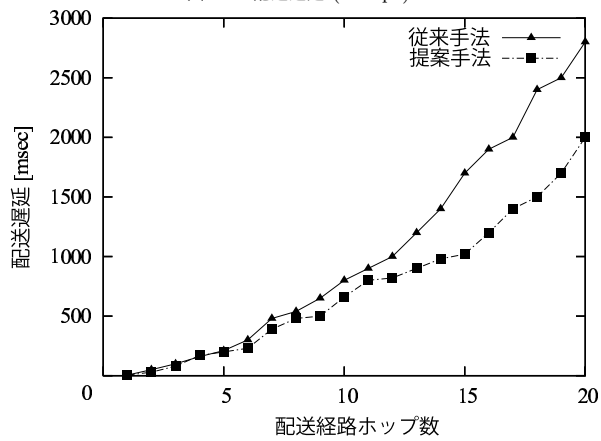


図 11 配送遅延 (2Mbps)

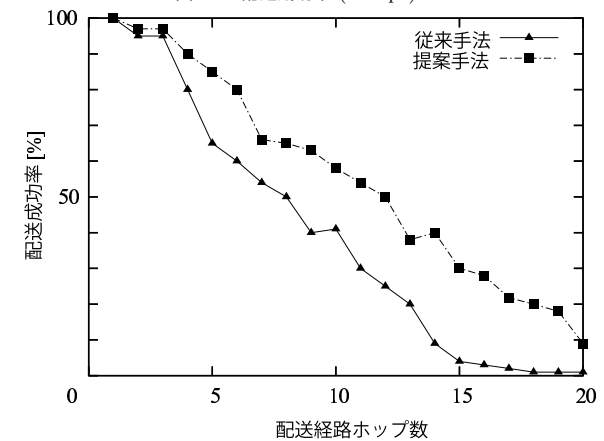


図 13 配送成功率 (2Mbps)