送信電力制御と補助チャネルによる経路内衝突のない無線マルチホップ配送

松 村 真 吾[†1] 桧 垣 博 章[†1]

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データメッセージ転送の衝突を回避している．しかし，順次短縮無線リンク列で接続可能な送受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適用できない問題がある．本論文では，補助チャ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．また，このような経路を探索するプロトコルを設計する．これによって，より離れた送受信無線ノード間をデータメッセージの経路内衝突を発生しない配送経路で接続することが可能となる．

Wireless Multihop Transmission without Collisions by Transmission Power Control and Subsidiary Channel

Shingo Matsumura[†1] and Hiroaki Higaki[†1]

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 subsidiary channel different from an ordinary channel used in each hop-by-hop shortening link is applied. Here, no collisions occur and connectivity by using a multihop transmission route is improved. In addition, en 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に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[2)]．

IEEE802.11[6)] 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[3)] 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) が提案されている[8)]．

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，特に広域な無線マルチホップネットワークでは経路検出率が低下するため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 2 チャ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案する．

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

†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

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 $|M_{i-1}M_i\rangle$ 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．なお，RTS/CTS 制御のオーバ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[4] があるが，競合発生の問題を解決するものではない．

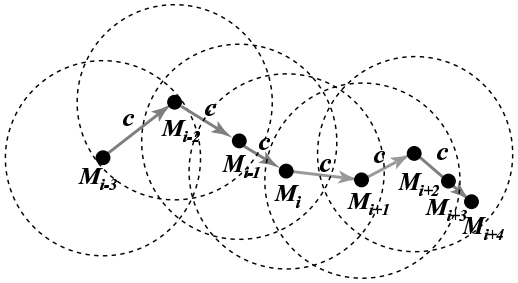

図 1　送信電力一定の場合の無線マルチホップ配送
Fig. 1　Wireless Multihop Transmission Route without Power Control.

論文 1) 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 $|M_{i-1}M_i| > |M_iM_{i+1}|$ を満足する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，経路検出率の低下を避けることができず，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 7) で提案している．しかし，再送信による通信オーバヘッドの拡大が問題である．

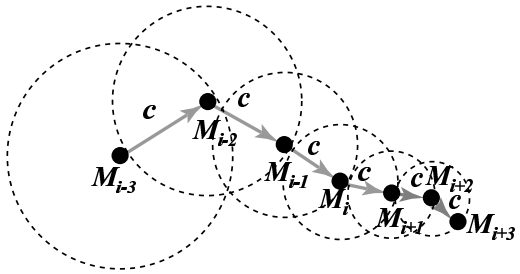

図 2　順次短縮リンク列による無線マルチホップ配送経路
Fig. 2　Wireless Multihop Transmission Route Detected by RH2SWL.

3. 提案手法

3.1 補助チャネル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す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 $R = ||M_0 \ldots M_n\rangle\rangle$ 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，補助チャネルを用いることによって無線リンクを伸長する手法を提案する．RH2SWL 手法では，すべての無線リンクで同一のチャネル c (以下では通常チャネルとよぶ) を用いることを前提としている．ここで導入する補助チャネル c' とは，通常チャネルとは波長の異なるチャネルであり，このチャネルを用いて転送されるメッセージは通常チャネルを用いて転送されるメッセージと衝突することがない．中継無線ノード M_i の隣接無線ノード M のすべてが $|M_{i-1}M_i| > |M_iM|$ を満たすことがで

きないことを検出した場合，**図 3** に示すように，M_i は次ホップ無線中継ノード M_{i+1} への無線リンク $|M_iM_{i+1}\rangle$ では補助チャネルを用いることとする[⋆1]．ここで，無線リンク長 $|M_iM_{i+1}|$ 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することが可能である．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 $|M_{j-1}M_j\rangle$ で通常チャネルを用いて転送されるデータメッセージと $|M_iM_{i+1}\rangle$ で補助チャネル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．

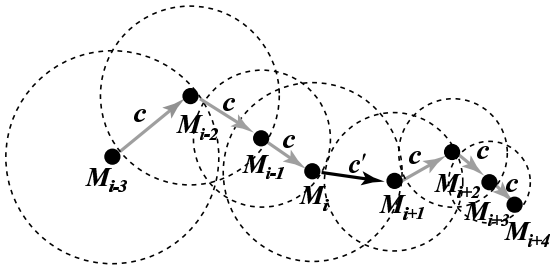

図 3　補助チャネルを用いる伸長無線リンク
Fig. 3　Extending Wireless Link with Subsidiary Channel.

なお，M_{i+1} 以降のマルチホップ配送経路は，伸長した $|M_iM_{i+1}|$ を基準とした順次短縮無線リンク列として構成する．また，補助チャネルはひとつの無線マルチホップ配送経路上で複数回導入することが可能であり，その都度無線リンクを伸長する．

3.2　無線リンク伸長による経路内衝突

無線リンク $|M_iM_{i+1}\rangle$ 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とすることによって，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 $|M_iM_{i+1}\rangle$ 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 $|M_iM_{i+1}|$ 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 4** 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内に含まれることがある．このとき，$|M_iM_{i+1}| > |M_{i+1}M|$ 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 $|M_{i+1}M|$ 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．

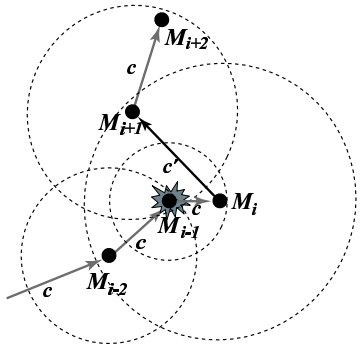

図 4　無線リンク伸長による経路内衝突
Fig. 4　Collision by Extending Link.

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} 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，$|M_{i+1}M_{i+2}| < \min(|M_iM_{i+1}|, |M_{i-1}M_{i+1}|)$ 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 5**)．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 $\min(|M_iM_{i+1}|, |M_{i-1}M_{i+1}|)$ 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．

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

⋆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．

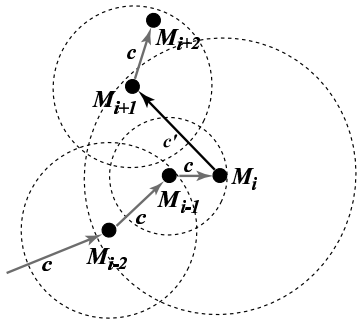

図 5　無線リンク長の追加制約による経路内衝突回避
Fig. 5　Collision Avoidance by Additional Restriction.

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．

$$Rreq.dst := M_d; \quad Rreq.dist := \infty; \quad Rreq.prev := null;$$
$$Rreq.seq := \langle\langle M_s \rangle\rangle; \quad Rreq.chan := \text{通常チャネル};$$

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 $M.cashe$ 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，$M.cashe$ 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，$M_i.cashe$ 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，$M_i.cashe$ 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．

$$Rreq'.dst := Rreq.dst; \quad Rreq'.dist := \min(|M_{i-1}M_i|, |M_jM_i|);$$
$$Rreq'.prev := M_{i-1}; \quad Rreq'.seq := Rreq.seq + M_i;$$
$$Rreq.chan := \text{通常チャネル};$$

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．

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

[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．

提案プロトコルによる *Rreq* メッセージがフラッディングされる様子を**図 6** に示す．従来手法では a) のように *Rreq* の到達範囲が限定的となる一方，無線リンク伸長を導入した提案手法では， *Rreq* が全体的に拡散する．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ネルで最大送信電力を用いて転送される．

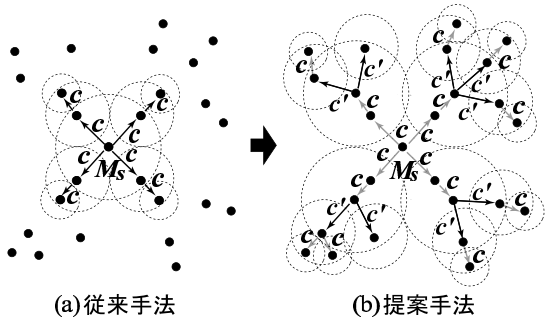

図 6　*Rreq* フラッディングの到達範囲拡大
Fig. 6　Improvement of *Rreq* Reachability.

[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．

$$Rrep.dst := M_d; \quad Rrep.seq := Rreq.seq; \quad Rrep.dist := |M_{n-1}M_d|$$

[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．

$$Rrep'.dst := Rrep.dst; \quad Rrep'.seq := Rrep.seq; \quad Rrep'.dist := |M_{i-1}M_i|$$

[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

3 章で提案した補助チャネルによる無線リンク伸長を導入した RH2SWL の拡張手法の性能をシミュレーション実験評価する．評価環境は 5,000m×5,000m の正方形領域とし，最大送信電力での無線信号到達距離が 100m である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．送信元無線ノード位置を領域の中心に固定として，経路探索メッセージ *Rreq* のフラッディングを行なうときの，*Rreq* メッセージの到達率，検出経路[⋆2]の平均ホップ数，*Rreq* メッセージの転送数を測定した．比較対象は，RH2SWL，RH2SWLwRB およびそれぞれに本論文で提案した補助チャネルを導入した 4 つの手法である．シミュレーションには GloMoSim[5] を用いる．

シミュレーション実験結果を**図 7**–**図 9** に示す．図 7 は，*Rreq* メッセージの到達率を示している．従来手法では，順次短縮無線リンク列のみでマルチホップ経路を構成するため全体の 10%程度の無線ノード (送信元無線ノードから 800m 程度の距離まで) のみに *Rreq* メッセージが到達している．これに対して提案手法では，無線リンク長の縮小によって次ホップ無線ノードが検出できなくなると補助チャネルを用いて無線リンク伸長を行なうため，無線ノード密度が特に低い場合を除いてほぼ全域的に *Rreq* メッセージを到達させることができる．*Rreq* メッセージの到達はマルチホップ配送経路の検出と同値であることから，提案手法は広域アドホックネットワークにおける経路検出率を大幅に改善する．なお，提案手法に *Rreq* メッセージの再送信を組み合わせる (RH2SWL+補助チャネル手法と RH2SWLwRB+補助チャネル手法とを比較する) と，無線ノード密度が特に低い場合に経路検出率が改善される．

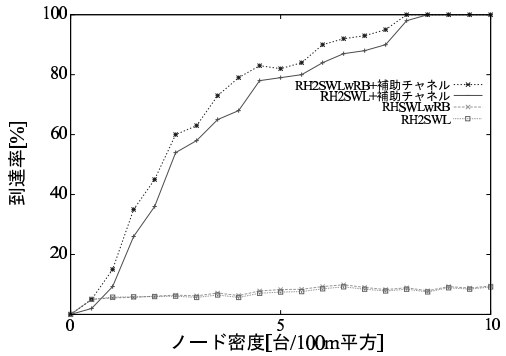

図 7　*Rreq* フラッディングの到達率
Fig. 7　Reachability of *Rreq*.

図 8 は，*Rreq* メッセージのフラッディングによって検出されるマルチホップ配送経路長の平均値の測定結果である．従来手法と比較して，提案手法では 3.0 倍長い経路を検出している．これは，*Rreq* メッセージのフラッディングによる拡散領域を拡大した効果である．

⋆2 送信元無線ノードから *Rreq* メッセージを受信したそれぞれの無線ノードまでの *Rreq* メッセージのマルチホップ配送経路

従来手法と提案手法のいずれにおいても *Rreq* メッセージの再送信機構を導入することで経路長が約 20%短縮している．図 7 で到達率を改善している，すなわち，より広い領域へ *Rreq* メッセージを到達させていることから，再送信機構が経路のホップ数を削減する高い効果を持つことが示されている．

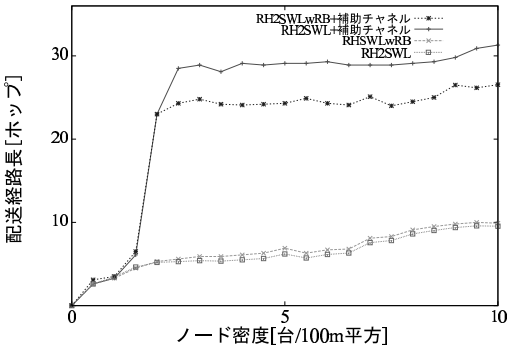

図 8　マルチホップ配送経路長 (平均)
Fig. 8　Length of Multihop Transmission Routes.

図 9 は，*Rreq* メッセージのフラッディングに要する通信オーバヘッドを評価するためにその転送数を測定した結果である．提案手法では，従来手法に比べて転送数が 4.3 倍程度に拡大している．しかし，無線リンク伸長によって到達ノード数が 12 倍程度の拡大していることから，転送数の拡大は妥当な範囲であると考えられる．従来手法と提案手法のいずれにおいても 2.2 倍程度に転送数が拡大する．各無線ノードにおいて前ホップとの距離がより長いものを選択するために *Rreq* メッセージを複数回送信することによる拡大であり，無線ノード分布密度が特に低い場合の経路検出率の改善と検出経路長の短縮の効果とのトレードオフとなる．ただし，提案手法では *Rreq* の拡散領域が広くなっていることから，転送数拡大効果が大きいため，無線ノード分布密度が特に低い場合を除いては，再送信機構導入による効果は相対的に小さいと考えられる．

5. まとめと今後の課題

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補助チャネルを用いる伸長無線リンクを含むことによって，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，無線リンク伸長によって新たに生じる経路内衝突を回避するために次ホップ無線ノード選択条件を示し，これを充足するノードのみを経路に含むようにするルーティングプロトコルを設計した．シミュレーション実験の結果，経路検出率を大幅に改善することが示された．

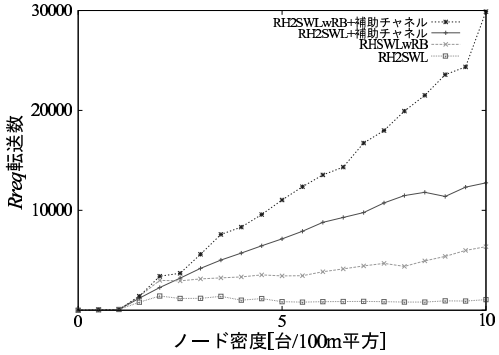

図 9　経路探索通信オーバヘッド
Fig. 9　Routing Protocol Overhead.

伸長無線リンクの終点無線ノードは補助チャネルを用いてデータメッセージを受信し，それ以外の無線ノードは通常チャネルを用いてデータメッセージを受信する．アドホックネットワークに複数のマルチホップ配送経路が同時に存在する場合には，ある無線ノードが複数の経路に含まれる場合がある．複数チャネルからのデータメッセージ受信を同時に待つことができない無線ノードである場合には，既に受信に使うチャネルが決定している無線ノードが他のチャネルを使って受信する経路に加わることはできない．この点を考慮して，複数のマルチホップ配送経路が同時に存在する場合の性能について，今後評価を行なう．

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) “GloMoSim,” http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/ .
6) “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” Standard IEEE 802.11 (1997).
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).
8) 沼田, 桧垣, “順次短縮リンクによる広帯域無線マルチホップ配送,” 情処研報, vol.2006, No.98, pp.17–24 (2006).