

# 順次短縮無線リンク列からなる無線マルチホップ配送経路におけるデータメッセージ配送手法

須田 哲志<sup>1,a)</sup> 梶垣 博章<sup>1,b)</sup>

概要：無線マルチホップネットワークにおけるデータメッセージ群の配送では、各データメッセージのエンドエンド配送遅延の短縮、無線マルチホップ配送経路に沿ったデータメッセージ群の配送スループットの向上のために、中継無線ノードによるデータメッセージの転送における無線信号の衝突（経路内衝突）を回避、削減することが求められる。著者らは、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路を隣接中継無線ノード間の無線リンク長が順次短縮する経路とし、各中継無線ノードがその次ホップ中継無線ノードに到達可能な最小の電力でデータメッセージを送信する RH2SWL 手法を提案している。これによって、隠れ端末問題によるデータメッセージの衝突の発生そのものを回避することが可能であり、中継無線ノードによるデータメッセージの同時並行転送の機会を増加させることができる。しかし、順次短縮無線リンク列の適用によって、各中継無線ノードが次ホップ中継無線ノードのデータメッセージ転送を検知することができないことから、データメッセージ転送を行なっている次ホップ中継無線ノードに対してデータメッセージを転送することによる衝突が発生する問題がある。本論文では、CTS 制御メッセージの送信電力拡大と RTS 制御メッセージの送信タイミング制御を用いた手法を提案する。ここでは、RTS 制御メッセージはデータメッセージと同様に次ホップ中継無線ノードに到達可能な最小電力で送信するが、次ホップ中継無線ノードへのデータメッセージ転送後に一定のインターバルを置いてから RTS 制御メッセージを送信し、また、CTS 制御メッセージは前ホップ中継無線ノードに到達可能な最小電力で送信するように送信電力を高くする。さらに、提案手法を用いた場合のデータメッセージのエンドエンドスループットの理論値を評価することで、提案手法の有効性を示す。

キーワード：無線マルチホップネットワーク、順次短縮無線リンク列、無線信号送信電力制御、RTS/CTS 制御、衝突

## 1. はじめに

アドホックネットワークやセンサネットワークにおけるデータメッセージの無線マルチホップ配送では、中継無線ノードにおけるデータメッセージ同士、データメッセージと制御メッセージ、制御メッセージ同士の衝突により、配送遅延の延長、スループットの低下といった配送性能の低下を余儀なくされる。これを回避、低減するためには、これらの衝突、特にデータメッセージ同士の衝突を回避することが有効である。ひとつの無線マルチホップ配送経路を同時並行に配送されるデータメッセージによる衝突は経路内衝突と呼ばれ、互いに晒し端末の関係にある 1 ホップ隣接中継無線ノードによる同時並行なデータメッセージ送信や、

互いに隠れ端末の関係にある 2 ホップ隣接中継無線ノードによる同時並行なデータメッセージ送信によって経路内衝突が発生する。従来の無線マルチホップ配送では、1 ホップ隣接中継無線ノードによる衝突は CSMA/CA によって、2 ホップ隣接中継無線ノードによる衝突は RTS/CTS 制御によって回避、低減している。しかし、このようなデータメッセージの送信タイミングを調節する方法では、データメッセージを送信する中継無線ノードの前後 2 ホップの中継無線ノードのデータメッセージ送信を抑制しなければならないため、配送遅延の延長やスループットの低下といった問題の改善は限定的となる。そこで、著者らは論文 [4] で順次短縮無線リンク列によって無線マルチホップ配送経路を構成し、各中継無線ノードが次ホップ中継無線ノードを無線信号到達範囲に含む最小の送信電力でデータメッセージを送信する RH2SWL 手法を提案した。これによって、2 ホップ隣接中継無線ノード間の隠れ端末問題による衝突は発生そのものを回避することができる。しかし、各中継無

<sup>1</sup> 東京電機大学  
Tokyo Denki University, Adachi, Tokyo 120-8551, Japan

a) suda@higlab.net

b) hig@higlab.net



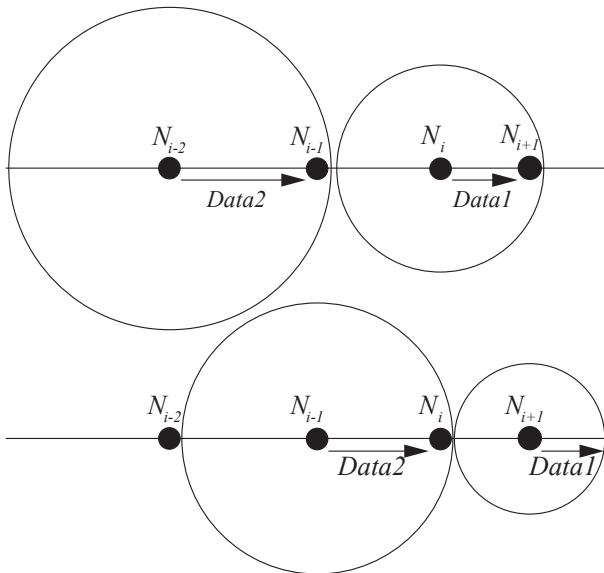


図 2 RH2SWL による無線マルチホップ配送の最大スループット.

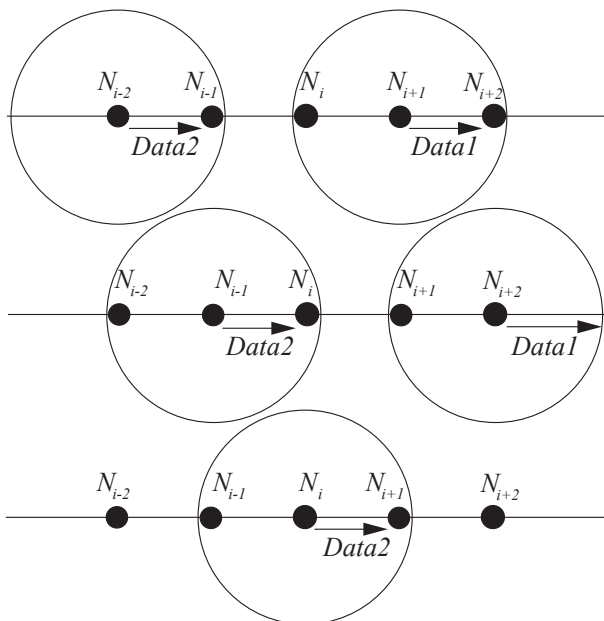


図 3 従来手法による無線マルチホップ配送の最大スループット.

避することができる。しかし、順次短縮無線リンク列の適用により、各中継無線ノードが自身の次ホップ中継無線ノードがデータメッセージを受信することが可能な状態であるか否かを知ることができなくなる、という問題がある。図 4 に示すように、順次短縮無線リンク列を適用しない従来の無線マルチホップ配送では、中継無線ノード  $N_i$  が次ホップ中継無線ノード  $N_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれている。このため、 $N_{i+1}$  がデータメッセージを次ホップ無線ノードに送信している最中であることは、無線 LAN プロトコルの CSMA/CA 機能によって  $N_i$  が検知することが可能であり、これによってデータメッセージ（および制御メッセージ）の送信を延期することができる。また、隠れ端末問題によるデータメッセージの衝突を回避するための RTS/CTS

制御により、 $N_{i+1}$  が  $N_i$  から転送されるデータメッセージを受信することができない状態であることを  $N_i$  が検知し、データメッセージの転送を延期することが可能である。

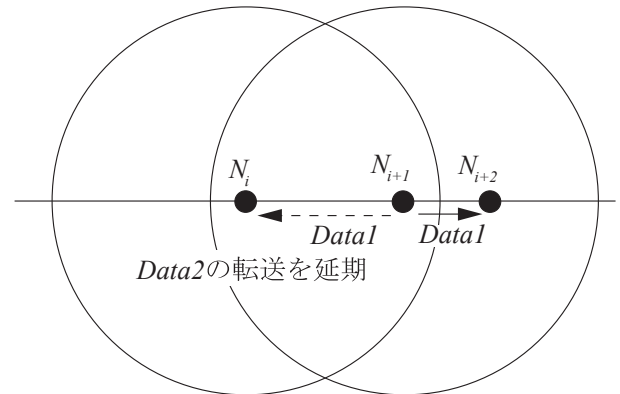


図 4 従来手法によるデータメッセージ転送の延期.

このように、従来の無線マルチホップ配送では、データメッセージを転送している最中の次ホップ無線ノードに中継無線ノードがデータメッセージを送信することはない。しかし、図 5 に示すように、順次短縮無線リンク列で構成される無線マルチホップ配送経路を用いる RH2SWL では、中継無線ノード  $N_i$  が次ホップ中継無線ノード  $N_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれないために、 $N_{i+1}$  がデータメッセージを転送している最中であることを、 $N_i$  が検知することはできない。このため、その次ホップ中継無線ノード  $N_{i+2}$  にデータメッセージを転送している最中である  $N_{i+1}$  に対して、 $N_i$  がデータメッセージを転送することにより  $N_{i+1}$  においてデータメッセージ同士の衝突が発生し、このデータメッセージの受信に失敗することが考えられる。

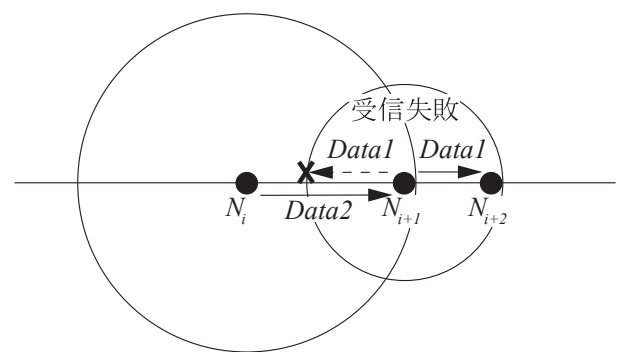


図 5 RH2SWL による転送データメッセージ同士の衝突.

### 3.3 送信電力制御をともなう RTS/CTS

前節で述べた RH2SWL における中継無線ノードとその前ホップ中継無線ノードとの同時並行なデータメッセージ転送による衝突の発生を回避する手法として、本節では RTS/CTS 制御を拡張して適用する手法を提案する。ここ



で、RTS/CTS 制御を無線マルチホップ配送経路の中継無線ノード間の衝突回避機構として捉えると<sup>\*1</sup>、RTS メッセージは、次ホップ中継無線ノードに対してデータメッセージの送信開始を通知するとともに、前ホップ中継無線ノードに対して自身へのデータメッセージ転送を抑制するように通知する。これは、自身の次ホップ中継無線ノードへのデータメッセージ送信最中には、前ホップ中継無線ノードから送信されるデータメッセージを受信することができないことから、前ホップ中継無線ノードに対してデータメッセージ転送を延期させるものである。一方、CTS メッセージは、前ホップ中継無線ノードに対して自身がデータメッセージを受信することが可能であることを通知することに加えて、次ホップ中継無線ノードに対して自身における隠れ端末問題によるデータメッセージの衝突を回避するために、データメッセージの転送を延期させる効果を持つ。

図 6 に示すように、中継無線ノードが次ホップ中継無線ノードへのデータメッセージ転送前に RTS メッセージをデータメッセージと同じ送信電力を用いて送信するならば、この RTS メッセージは次ホップ中継無線ノードには受信されるが、前ホップ中継無線ノードには受信されない。したがって、前節で指摘したデータメッセージの転送先である次ホップ中継無線ノードがデータメッセージを送信している最中に中継無線ノードがデータメッセージを送信してしまい、次ホップ中継無線ノードがこのデータメッセージの受信に失敗してしまうという問題を解決することができない。

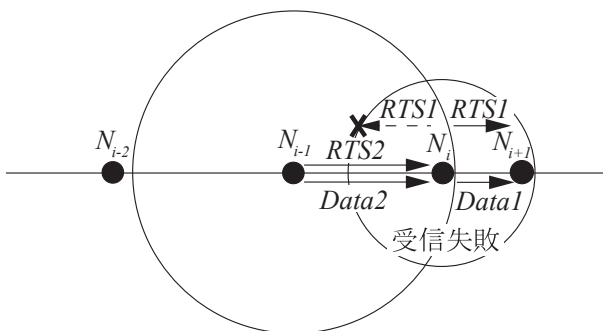


図 6 RTS メッセージの到達範囲縮小.

一方、図 7 に示すように、中継無線ノードが前ホップ中継無線ノードへのデータメッセージ転送前に RTS メッセージを前ホップ中継無線ノードに到達可能な送信電力を用いて送信するならば、この RTS メッセージは次ホップ中継無線ノードと前ホップ中継無線ノードの両方に受信されることになる。この RTS メッセージを受信した中継無線ノードは、次ホップ中継無線ノードがデータメッセージの送信を

<sup>\*1</sup> RTS/CTS 制御では無線マルチホップ配送経路に含まれない隣接無線ノードに対する送信抑制も同時に行なっている。

開始することを検知できることから、自身の次ホップ中継無線ノードへのデータメッセージ転送を抑制することができる。しかし、図 2 に示したように、順次短縮無線リンク列によって無線マルチホップ配送経路を構成する RH2SWL では、隠れ端末問題を解消することで高スループットな無線マルチホップ配送を実現することを目指しており、この観点では、各中継無線ノードは前後 2 ホップ近隣の中継無線ノードと同時に並行にデータメッセージを転送する機会をより多く持つことが期待される。これは、すなわち、この送信電力を調整して前ホップ中継無線ノードを無線信号到達範囲に含むようにして RTS メッセージを送信するならば、この RTS メッセージが前ホップ中継無線ノードにおいてその前ホップ中継無線ノードから転送されるデータメッセージと衝突する可能性が高いことを意味する。これは、順次短縮無線リンク列の導入によって隠れ端末問題による衝突を回避した RH2SWL の効果を著しく低下させるものであり、前節の問題を解決する適切な手法とは考えにくい。

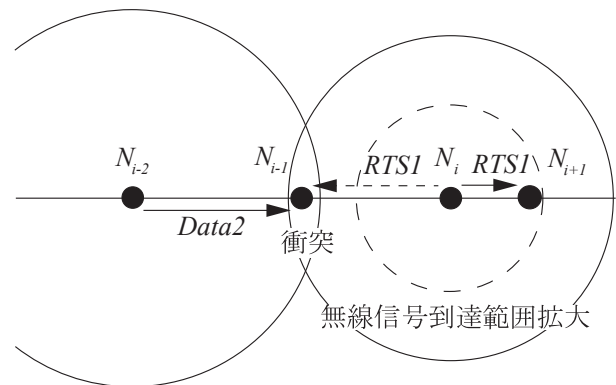


図 7 RTS メッセージの到達範囲拡大.

また、図 8 に示すように、データメッセージ送信と同じ送信電力を用いて前ホップ中継無線ノードが送信した RTS メッセージを受信した中継無線ノードがデータメッセージと同じ送信電力で CTS メッセージを送信した場合、この CTS メッセージは次ホップ中継無線ノードには到達するものの前ホップ中継無線ノードには到達しない。この場合、前ホップ中継無線ノードは CTS メッセージを受信することができないため、中継無線ノードが次ホップ中継無線ノードに対してデータメッセージを転送している最中であり、前ホップ中継無線ノードからデータメッセージを受信することができない状態であるのか、それとも、中継無線ノードは次ホップ中継無線ノードへのデータメッセージ転送を行なっておらず、前ホップ中継無線ノードからのデータメッセージを受信することが可能な状態であるのかを検知することができない。また、この CTS メッセージは次ホップ中継無線ノードに受信されるが、RH2SWL では順次短縮無線リンク列で無線マルチホップ配送経路を構成していることから、次ホップ中継無線ノードの無線信号到達範囲にこ

の中継無線ノードは含まれない。したがって、この中継無線ノードにおける前ホップ中継無線ノードが送信するデータメッセージと次ホップ中継無線ノードが送信するデータメッセージとの衝突は発生せず、この CTS メッセージの受信によって得られる有効な情報は無い。

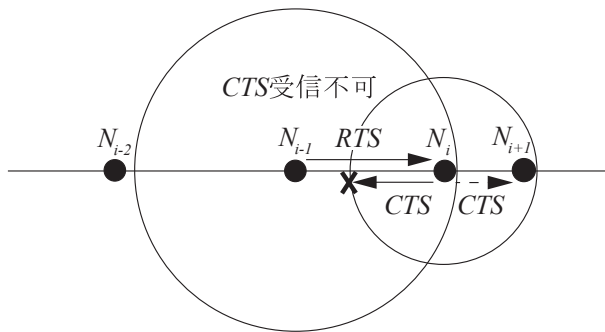


図 8 CTS メッセージの到達範囲縮小.

一方、図 9 に示すように、前ホップ中継無線ノードから RTS メッセージを受信した中継無線ノードが CTS メッセージを前ホップ中継無線ノードを無線信号到達範囲に含む送信電力を用いて送信するならば、中継無線ノードは前ホップ中継無線ノードに対して自身がデータメッセージを受信可能な状態であることを通知することができる。もし、中継無線ノードが次ホップ中継無線ノードへデータメッセージを転送している最中であり、前ホップ中継無線ノードからのデータメッセージを受信することができない状態であるならば、中継無線ノードは CTS メッセージを送信しない。そして、前ホップ中継無線ノードがタイムアウトによって CTS メッセージが送信されていないことを検知することで、データメッセージの転送を延期することができる。このとき、中継無線ノードが送信した CTS メッセージは次ホップ中継無線ノードによっても受信されるが、前ホップ中継無線ノードと次ホップ中継無線ノードとは順次短縮無線リンク列の適用によって互いに隠れ端末の関係にはないことから、受信した CTS メッセージを単純に破棄し、データメッセージの転送抑制は行なわない。

提案手法では、CTS メッセージを送信電力を順次短縮無線リンク列をデータメッセージが転送される場合よりも強め、データメッセージは到達しない前ホップ中継無線ノードの受信を可能とする。このため、この CTS メッセージとデータメッセージあるいは他の制御メッセージとが衝突することが考えられる。

● CTS メッセージとデータメッセージとの衝突

$N_{i-1}$  から  $N_i$  へと転送されるデータメッセージと  $N_{i+1}$  から  $N_i$  へと無線信号到達範囲を拡大して送信される CTS メッセージとの  $N_i$  における衝突は発生しない。 $N_{i+1}$  が  $N_i$  へ CTS メッセージを送信するのは  $N_{i+1}$

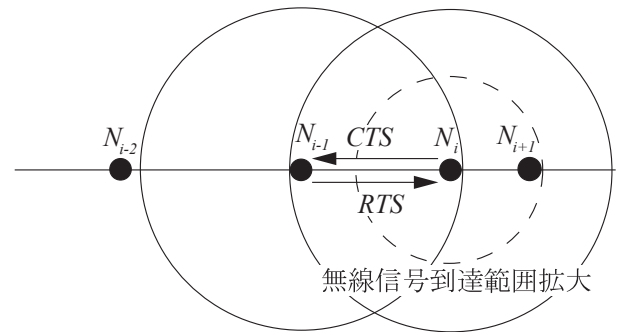


図 9 CTS メッセージの到達範囲拡大.

が  $N_i$  からの RTS メッセージを受信した直後であり、 $N_i$  が  $N_{i+1}$  へ RTS メッセージを送信するのは、 $N_{i-1}$  からのデータメッセージ受信最中ではないときである。

● CTS メッセージと RTS メッセージとの衝突

$N_{i-1}$  が  $N_i$  へ送信する RTS メッセージと  $N_{i+1}$  が  $N_i$  へと無線信号到達範囲を拡大して送信する CTS メッセージとが  $N_i$  で衝突する可能性があるが、データメッセージの転送タイミングを適切に制御することによって発生確率を低減することが可能である。この衝突が発生するのは、 $N_{i-1}$  から  $N_i$  へのデータメッセージ転送と  $N_i$  から  $N_{i+1}$  へのデータメッセージ転送とが同時並行に開始される場合である。データメッセージは無線マルチホップ配送経路に沿って配送されることから、 $N_{i-1}$  が  $N_i$  へデータメッセージを転送した直後に  $N_i$  が  $N_{i+1}$  へこの受信したデータメッセージを転送することを  $N_{i-1}$  が予想することは可能である。したがって、次節での提案でも述べるように、 $N_{i-1}$  がデータメッセージの転送を終えた後に適切なインターバルを置いてから次のデータメッセージ転送を開始することによって、この衝突は回避可能である。また、RTS メッセージはデータメッセージのように継続的に送信されるものではないサイズの小さな制御メッセージであることから、RTS メッセージと CTS メッセージとの衝突発生確率は低く見積もることができる。

● CTS メッセージ同士の衝突

$N_{i-1}$  が  $N_{i-2}$  へと無線信号到達範囲を拡大して送信する CTS メッセージと  $N_{i+1}$  が  $N_i$  へと無線信号到達範囲を拡大して送信する CTS メッセージとが  $N_i$  で衝突する可能性がある。CTS メッセージはデータメッセージのように継続的に送信されるものではないサイズの小さな制御メッセージであることから、CTS メッセージとの衝突発生確率は低く見積もることができる。ただし、図 2 に示したように、提案手法では順次短縮無線リンク列によって無線マルチホップ配送経路を構成することで隠れ端末問題による衝突を回避しており、

理想的には2ホップ隣接中継無線ノードと同時並行にデータメッセージを次ホップ中継無線ノードへと転送することを想定している。この場合、2ホップ隣接中継無線ノードはほぼ同時にCTSメッセージを前ホップ中継無線ノードへと送信することになるため、送信電力を強めてのCTSメッセージの送信はCTSメッセージ同士の衝突頻度を上げる可能性がある。この問題は、今後のシミュレーション実験結果に基づいて評価することとする。

なお、RH2SWLでは、無線マルチホップ配送経路が順次短縮無線リンク列で構成されることのみを要件としている。このため、図10に示すように、 $|N_{i-1}N_i| > |N_iN_{i+2}|$ を満足する場合、送信電力を強めて送信されるCTSメッセージが $N_i$ の2ホップ隣接中継無線ノードである $N_{i+2}$ に到達する可能性がある。このとき、中継無線ノード $N_i$ はデータメッセージを $N_{i+1}$ に到達可能な最小電力で送信するが、 $N_{i-1}$ から受信したRTSメッセージに対するCTSメッセージを $N_{i-1}$ を無線信号到達範囲に含むように送信電力を強めて送信する。その結果、このCTSメッセージは $N_{i+1}$ ばかりでなく $N_{i+2}$ にも到達することになる。 $N_{i-1}$ と $N_{i+1}$ は同時並行にデータメッセージを次ホップ中継無線ノード $N_i$ と $N_{i+2}$ に転送することが考えられることから、 $N_{i+2}$ でCTSメッセージとデータメッセージが衝突する可能性がある。これを回避する方法として以下の二つが考えられる。

- 無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードが満たすべき条件に $|N_{i-1}N_i| < |N_iN_{i+2}|$ を加える(図11)。
- 無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードが満たすべき条件に、 $|N_{i-1}N_i| > |N_iN_{i+2}|$ を満たす場合には、 $|N_{i-1}F_i| < |F_iN_i| < |N_iN_{i+2}|$ を満たす転送無線ノード $F_i$ が存在することを加える(図12)。CTSメッセージは $N_i$ から $F_i$ を経由して $N_{i-1}$ へと転送されるが、いずれも転送先へ到達可能な最小電力で送信することにより $N_{i+2}$ におけるデータメッセージとの衝突を回避する。

これらの方法は、CTSメッセージの転送を導入しても2ホップ隣接中継無線ノードにおけるデータメッセージとの衝突を回避することを可能とするが、いずれも経路検出率の低下を招く可能性がある。今後、経路検出率への影響を実験評価することで有効性を検討する。

### 3.4 転送インターバル調整による衝突回避手法

前節では、順次短縮無線リンク列で構成される無線マルチホップ配送経路に沿ってデータメッセージを送信電力制御を行なう中継無線ノードを用いて隠れ端末問題に起因するデータメッセージ間の衝突を回避するRH2SWL手法において、隣接中継無線ノードが同時並行にデータメッセージを転送することによって発生するデータメッセージの転

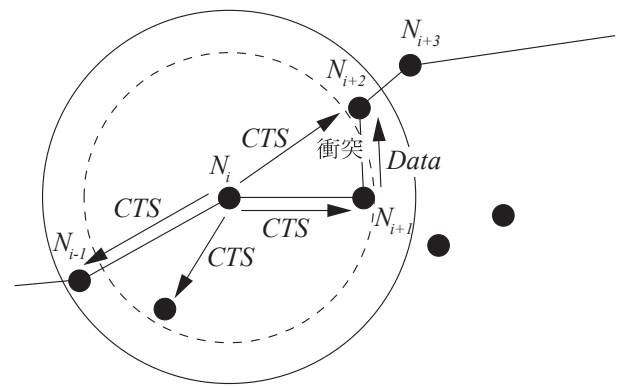


図10 CTSメッセージの到達範囲拡大によるデータメッセージの衝突。

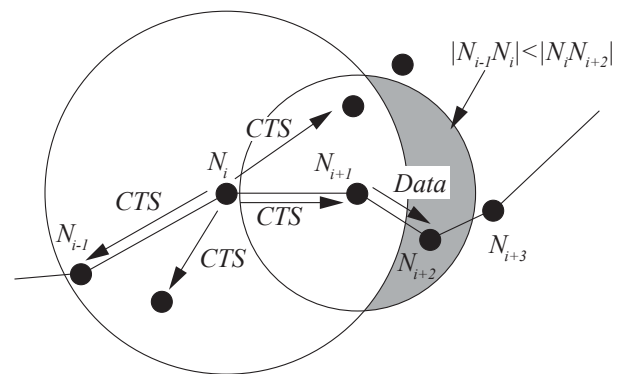


図11 配送経路への制約追加による解決。

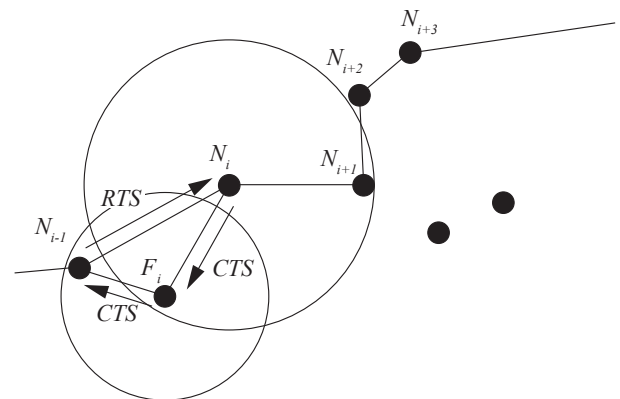


図12 CTSメッセージの転送による解決。

送失敗を、RTSメッセージと送信電力を強めたCTSメッセージの交換によって回避する手法について述べた。本手法では、データメッセージの転送に先立ってRTSメッセージとCTSメッセージの交換を要することから、これによるデータメッセージの転送スループットの低下が懸念される。RH2SWLでは、2ホップ隣接無線ノードとの隠れ端末問題による衝突は各中継無線ノードが考慮することなくデータメッセージを送信することが可能であることから、データメッセージの各中継無線ノードの転送先である次ホップ中継無線ノードがこのデータメッセージをさらに次ホップ中



継無線ノードへの転送を終える時間をより正確に見積もることができれば、各中継無線ノードは制御メッセージの交換を行なうことなく、推定された転送インターバルだけの間隔を開けてデータメッセージを転送することで、衝突のない高スループットな無線マルチホップ配送を実現することができる。

しかし、データメッセージの転送インターバルが短すぎるならば、無線マルチホップ配送経路上で連続する中継無線ノードの同時並行転送が行なわれることでデータメッセージ配送に失敗し、また、転送インターバルが長すぎるならば、各中継無線ノードに無用な転送待ち時間が発生することから、エンドエンドのデータメッセージスループットが低下することが考えられる。そのため、通信開始時には前節で提案した電力制御をとまなう RTS/CTS 制御を用いてデータメッセージの無線マルチホップ配送を行ない、この間にネットワークの特性パラメータを得て適切な転送インターバルを獲得し、本節で提案した転送インターバル付きのデータメッセージ転送を行なう複合手法が有効であると考えられる。

#### 4. 評価

提案手法を用いた無線マルチホップ配送におけるデータメッセージのエンドエンド配送スループットの理論値を従来手法と比較評価する。表1は、評価に用いる IEEE802.11b の仕様を示される数値である [1]。また、データ長は 1,472 バイトとする。

表 1 IEEE802.11b の諸元。

パラメータ	データ長	伝送時間 (μs)
$PHY_{hdr}$	144bit+48bit=192bit	192
$MAC_{hdr\_data}$	24byte=192bit	-
$LLC_{hdr}$	8byte=64bit	-
$MAC_{payload}$	20byte+8byte+1472byte=12000bit	-
$MAC_{hdr\_RTS}$	16byte=128bit	-
$MAC_{hdr\_CTS/ACK}$	10byte=80bit	-
$FCS$	4byte=32bit	-
$T_{payload}$	1472byte	1071
$T_{DATA}$	$PHY_{hdr}+MAC_{hdr\_data}+LLC_{hdr}+MAC_{payload}+FCS$	966
$T_{RTS}$	$PHY_{hdr}+MAC_{hdr\_RTS}+FCS$	352
$T_{CTS/ACK}$	$PHY_{hdr}+MAC_{hdr\_CTS/ACK}+FCS$	304
$DIFS$	-	50
$SIFS$	-	10
$Slot\_time$	-	20
$CW_{min}$	サイズ: 31	-

従来手法では、隣接中継無線ノード間のデータメッセージ転送は、 $DIFS$  インターバルの待機の後、ランダムバックオフによる待機を行ない、 $RTS$  制御メッセージ、 $CTS$  制御メッセージ、データメッセージ、 $ACK$  制御メッセージを交換することによってなされることから、その配送スループットは次式で与えられる。

$$Th_{con} = \frac{T_{payload} \times 11Mbps}{DIFS + \frac{CW_{min}}{2} \times Slot\_time + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3 \times SIFS}$$

これに表1の数値を代入すると隣接中継無線ノード間のスループットは 4.43Mbps となる。2章で述べたよう

に、従来手法では中継無線ノードがデータメッセージを転送するためにはその前後 2 ホップの中継無線ノードを待機させることが必要であるから、エンドエンドのスループットは 4.43Mbps の 1/3 である 1.48Mbps となる。ただし、この値はランダムバックオフの値によって異なる。これを考慮すると、隣接中継無線ノード間のスループットは 3.97~5.01Mbps、エンドエンドのスループットは 1.32~1.67Mbps となる。

一方、提案手法では、隣接中継無線ノード間のデータメッセージ転送は、 $DIFS$  インターバルの待機の後、ランダムバックオフによる待機を行ない、 $RTS$  制御メッセージ、送信電力制御された  $CTS$  制御メッセージ、データメッセージを交換することによってなされることから、その配送スループットは次式で与えられる。

$$Th_{pro} = \frac{T_{payload} \times 11Mbps}{DIFS + \frac{CW_{min}}{2} \times Slot\_time + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + 2 \times SIFS}$$

これに表1の数値を代入すると隣接中継無線ノード間のスループットは 5.02Mbps となる。2章で述べたように、従来手法では中継無線ノードがデータメッセージを転送するためにはその前後 2 ホップの中継無線ノードを待機させることが必要であるから、エンドエンドのスループットは 5.02Mbps の 1/2 である 2.51Mbps となり、従来手法に対して 70% 向上している。ランダムバックオフの変化を考慮すると、隣接中継無線ノード間のスループットは 4.44~5.79Mbps、エンドエンドのスループットは 2.22~2.89Mbps となる。

#### 5. まとめと今後の課題

本論文では、順次短縮無線リンク列で構成される無線マルチホップ配送経路を用いる RH2SWL 手法において、1 ホップ隣接中継無線ノード間でのデータメッセージ配送に失敗する問題を  $CTS$  メッセージの送信電力制御とデータメッセージの送信インターバルの調整によって解決し、データメッセージの配送スループットを向上させる手法を提案した。適切なデータメッセージの送信インターバルは、データメッセージ長、無線マルチホップ配送経路長などによって異なることから、シミュレーション実験などによってこの値を実験評価することが今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” Standard IEEE 802.11 (2016).
- [2] Fujii, T., Takahashi, M., Bandai, M., Udagawa, T., Sasase, I., “An Efficient MAC Protocol in Wireless Ad-Hoc Networks with Heterogeneous Power Nodes,” Wireless Personal Multimedia Communications, 2002. The 5th International Symposium, pp. 776–780 (2002).
- [3] Urrutia, J., “Two Problems on Discrete and Computational Geometry,” Proceedings of Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, pp. 42–52 (1999).

- [4] 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とその評価,” 情処研報, Vol. 2006, No. 120, pp. 125–132 (2006).
- [5] 藤原, 関屋, 萬代, 呂, 谷萩, “送信範囲の異なる端末で構成される無線アドホックネットワークにおけるビジートーンを使用した MAC プロトコル,” 情報処理学会論文誌, vol. 47, no. 9, pp. 2815–2829 (2006).