

## 片方向無線マルチホップ配送によるスループット改善手法

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科

小杉 正昭 櫛谷 智史 桧垣 博章

E-mail: {kosugi, kushiya, hig}@higlab.net

無線マルチホップ配送で到達可能なアクセスポイントを介して他のノードと双方向にデータメッセージを交換する無線ノードを対象として、高スループット通信を可能とする手法を提案する。単一のアクセスポイントとの無線マルチホップ配送を用いる従来手法では、双方向に配送されるデータメッセージの転送による競合、衝突によってスループットが低下する。そこで、この無線ノードを含む2つのアクセスポイント間のマルチホップ配送経路を片方向にデータメッセージを配送することによって競合と衝突を削減し、スループットを改善する。また、順次短縮無線リンク列からなる経路を用いたマルチホップ配送プロトコルRH2SWLと提案手法とを組み合わせることで、より高いスループットが得られることをシミュレーション実験で確認した。

## Uni-Directional Wireless Multihop Transmission for High Throughput Communication

Masaaki Kosugi, Satoshi Kushiya and Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {kosugi, kushiya, hig}@higlab.net

In a wireless multihop network, a wireless node exchanges data messages with another node out of the network through an access point to which the data messages are transmitted by using wireless multihop transmission. High throughput bi-directional data message transmission as in P2P network applications is required; however, in bi-directional wireless multihop data message transmission, many contentions and collisions reduce the throughput. This paper proposes a novel data message transmission method in which data messages are transmitted along a uni-directional wireless multihop transmission route from an access point to another one through the wireless node. Simulation result shows that our method achieves higher throughput by combination with RH2SWL in case that access points are sparsely distributed in a wireless multihop network.

### 1 はじめに

多数の無線ノードから構成されるアドホックネットワーク、メッシュネットワーク、センサネットワークでは、限られた無線送信電力を用いて競合、衝突を削減した通信を実現する手法として無線マルチホップ配送を用いる。ここでは、高スループットの無線マルチホップ配送を要するネットワークアプリケーションのサポートも求められる。そのため、マルチホップ配送経路に含まれる異なる無線通信リンクを

配送されるデータメッセージの間の競合や衝突を回避、削減する手法が必要である。

### 2 関連研究

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の配送スループット改善については、これまで様々な研究がなされている。

隣接無線ノード間の1ホップ通信に用いるIEEE802.11 [5] や Bluetooth [6] といった無線LAN

プロトコルは、データメッセージがマルチホップ配送されることを考慮した設計とはなっていない。そこで MARCH [3] では、前ホップ無線ノードからデータメッセージを受信した無線ノードが次ホップ無線ノードへデータメッセージを転送することを考慮することで、無線マルチホップ配送のスループットを改善している。

LBAR [1] は、無線マルチホップ配送経路検出時に既存のマルチホップ配送経路に含まれないあるいはより少ないマルチホップ配送経路にしか含まれない無線ノードを中継ノードに含むように選択することで、他のマルチホップ配送経路に含まれる無線ノードによるデータメッセージ転送との競合、衝突を回避、削減し、スループットを改善する手法である。論文 [7] では、データメッセージ配送時に他のマルチホップ配送経路に含まれる無線ノードによるデータメッセージ転送との競合、衝突を回避、削減するように経路を変更する手法を提案している。ここでは、無線ノードの無線送信電力を変更し、中継無線ノードの追加、変更を行なう。データメッセージ配送時に経路の変更を行なうことから、無線ノードの移動によって競合、衝突が発生する場合においても再経路探索を行なうことなく高スループットを得られる経路に修正することができる点に優れている。

RH2SWL [2] は、マルチホップ配送経路内での競合、衝突を回避、削減することで高スループットを得るためのルーティングプロトコルおよびデータメッセージ配送プロトコルである。ここでは、無線マルチホップ配送経路を順次短縮する無線通信リンク列によって構成することで、配送経路内における隠れ端末問題を回避している。送信元無線ノード  $N_0$  から送信先無線ノード  $N_n$  までの  $n$  ホップ無線マルチホップ配送経路  $R = \langle N_0 \dots N_n \rangle$  の中継無線ノード  $N_i$  では、前ホップ中継無線ノード  $N_{i-1}$  と次ホップ中継無線ノード  $N_{i+1}$  との間で  $|N_{i-1}N_i| > |N_iN_{i+1}|$  を満たしている。そこで、 $N_i$  が無線信号到達範囲に  $N_{i+1}$  を含む  $N_{i-1}$  を含まないように無線送信電力を調節することで、 $N_i$  と  $N_{i-2}$  との間の隠れ端末問題を解消する。

RH2SWL は、データメッセージを片方向に配送するときには有効に機能するが、双方向にデータメッセージを配送することは考慮していない。MARCH も同様に片方向に配送されるデータメッセージのスループット改善を実現するものであり、双方向に配送されるデータメッセージを対象とはしていない。

### 3 片方向無線マルチホップ通信

#### 3.1 想定システム

図1のように、無線マルチホップネットワーク  $N^i$  は、複数の無線ノード  $N_j^i$  と有線ネットワークへの複数のアクセスポイント  $A_m^i$  から構成される。 $N^i$  に含まれる任意の  $N_j^i$  と  $A_m^i$  との間では、 $N^i$  内の無線ノードを介してデータメッセージを無線マルチホップ配送することが互いに可能である。また、無線アクセスポイントは互いに有線ネットワークを介してデータメッセージを交換することが可能である。ここでは、同一の無線マルチホップネットワーク  $N^i$  に含まれる無線アクセスポイント  $A_m^i$  と  $A_n^i$  との間のみでなく、異なる無線マルチホップネットワーク  $N^i$  と  $N^j$  にそれぞれ含まれる無線アクセスポイント  $A_m^i$  と  $A_n^j$  との間でもデータメッセージの交換が可能である。

各無線ノードは、同一の無線マルチホップネットワーク  $N^i$  に含まれる他の無線ノードとは  $N^i$  内の無線ノードやアクセスポイントを中継ノードとした無線マルチホップ通信を用いてデータメッセージを交換する。一方、各無線ノード  $N_j^i$  と有線ネットワークに接続された固定ノード  $F$  との間の通信は、 $N_j^i$  と  $A_m^i$  との間の  $N^i$  内での無線マルチホップ配送と  $A_m^i$  と  $F$  との間の有線ネットワークによる配送を用いることによって実現する。さらに、他の無線マルチホップネットワーク  $N^j$  を構成する無線ノード  $N_j^j$  との間の通信では、 $N_j^i$  と  $A_m^i$  との間の  $N^i$  内の無線マルチホップ配送、 $A_m^i$  と  $A_n^j$  との間の有線ネットワークによる配送、 $A_n^j$  と  $N_j^j$  との間の  $N^j$  内の無線マルチホップ配送を用いることで実現される。

データメッセージを交換する各無線ノードは対等であり、これらの間の通信は P2P 型を想定する。つまり、クライアントサーバ型通信における上り下りの概念はなく、データメッセージ配送方向と配送歴には特定の関係を想定しない。

#### 3.2 問題点

無線マルチホップネットワークの無線ノード  $N_s (= N_0)$  と  $N_d (= N_n)$  との間の双方向経路  $R = \langle \langle N_0 \dots N_n \rangle \rangle$  を用いた無線マルチホップ配送通信を考える。ここで、すべての無線ノードは隣接無線ノードと双方向の無線通信リンクで接続されているものとする。すなわち、中継ノード  $N_i$  とその次ホップ中継ノード  $N_{i+1}$  との間には、無線通信リンク  $|N_iN_{i+1}|$  と  $|N_{i+1}N_i|$  の両方が存在するとする。このとき  $N_i$  は、 $R$  に含まれる隣接無線ノード  $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれる。したがって、CSMA/CA

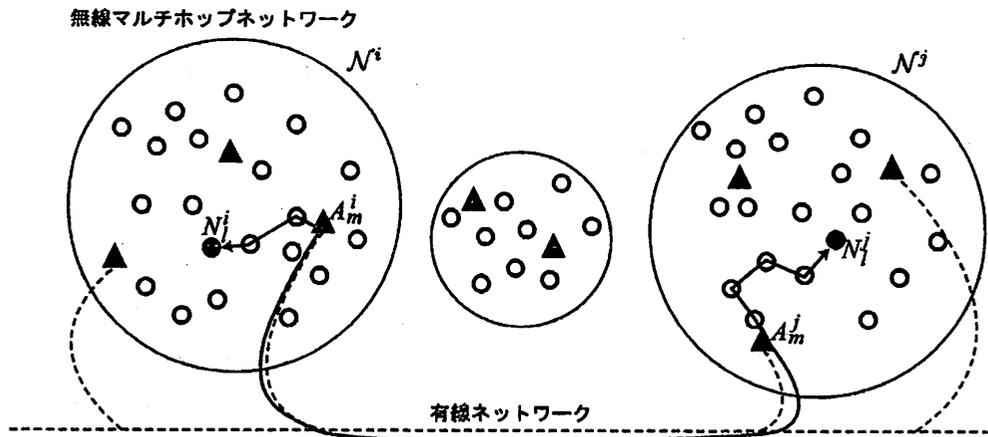


図 1: 無線マルチホップネットワーク間通信

を用いる無線 LAN プロトコルにおいては、 $N_i$  は  $N_{i-1}$  および  $N_{i+1}$  と競合し、これらの隣接無線ノードが無線信号を送信していない時間のみ無線信号を送信することができる。一方、 $N_i$  の無線信号到達範囲には  $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  が含まれる。したがって、 $N_i$  が送信した無線信号は、これらの隣接無線ノードが他の無線ノードから受信する無線信号と衝突し、どちらの無線信号の受信も失敗する。 $R$  を用いてデータメッセージが無線マルチホップ配送される時、 $N_{i-2}$  および  $N_{i+2}$  から送信された無線信号との衝突が発生する可能性がある。以上により、図 2 に示すように  $|N_i N_{i+1}|$  を用いたデータメッセージ転送は、無線通信リンク  $|N_{i-1} N_i|$ ,  $|N_{i-1} N_{i-2}|$ ,  $|N_{i+1} N_{i+2}|$ ,  $|N_{i+1} N_i|$ ,  $|N_i N_{i-1}|$  を用いたデータメッセージ転送と競合し、 $|N_{i-2} N_{i-1}|$ ,  $|N_{i+2} N_{i+3}|$ ,  $|N_{i+2} N_{i+1}|$  を用いたデータメッセージ転送と衝突する。

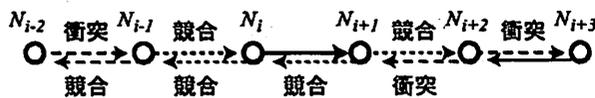


図 2: 双方向配送における競合と衝突

ここで、無線マルチホップネットワーク  $N^i$  の無線ノード  $N_i^i$  と固定ノード  $F$  あるいは他の無線マルチホップネットワーク  $N^j$  の無線ノード  $N_j^j$  との通信を考えると、 $N^i$  内では  $N_i^i$  と無線アクセスポイント  $A_m^i$  との間の双方向経路  $R = \langle\langle N_i^i \dots A_m^i \rangle\rangle$  を用いた無線マルチホップ配送通信を用いることとなる。このため、中継ノードが次ホップ中継ノードへデータメッセージを転送する際に、 $R$  に含まれる 2 ホップ近隣無線ノードが用いる多数の無線通信リンクを用いたデータメッセージ転送と競合、衝突する可能性がある。これによって、データメッセージの

配送スループットが低下する。

### 3.3 提案手法

前節で述べた問題を解決するために、送信元無線ノード  $N_s (= N_0)$  から送信先無線ノード  $N_d (= N_n)$  への片方向経路  $R = \langle\langle N_0 \dots N_n \rangle\rangle$  を用いた無線マルチホップ配送通信を考える。すなわち、データメッセージは中継無線ノード  $N_i$  から次ホップ中継無線ノード  $N_{i+1}$  へ転送されるのみであり、 $N_{i+1}$  から  $N_i$  へと転送されないこととする。ただし 3.2 節と同様に、すべての無線ノードは隣接無線ノードと双方向の無線通信リンクで接続されているものとする。このとき  $N_i$  は、 $R$  に含まれる隣接無線ノード  $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれる。したがって、CSMA/CA を用いる無線 LAN プロトコルにおいては、 $N_i$  は  $N_{i-1}$  および  $N_{i+1}$  と競合し、これらの隣接無線ノードが無線信号を送信していない時間のみ無線信号を送信することができる。一方、 $N_i$  の無線信号到達範囲には  $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  が含まれる。したがって、 $N_i$  が送信した無線信号は、これらの隣接無線ノードが他の無線ノードから受信する無線信号と衝突し、どちらの無線信号の受信も失敗する。 $R$  を用いてデータメッセージが無線マルチホップ配送される時、 $N_{i-2}$  および  $N_{i+2}$  から送信された無線信号との衝突が発生する可能性がある。以上により、 $|N_i N_{i+1}|$  を用いたデータメッセージ転送は、無線通信リンク  $|N_{i-1} N_i|$ ,  $|N_{i+1} N_{i+2}|$  を用いたデータメッセージ転送と競合し、 $|N_{i-2} N_{i-1}|$ ,  $|N_{i+2} N_{i+3}|$  を用いたデータメッセージ転送と衝突する。これは、3.2 節で述べた双方向無線マルチホップ配送経路を用いる場合よりも競合、衝突の機会が減少する可能性があることを示している。

そこで、無線マルチホップネットワーク  $N^i$  に複



図 3: 片方向配送における競合と衝突

数のアクセスポイント  $A_m^i$  が存在するならば、無線ノード  $N_i^i$  と固定ノード  $F$  もしくは他の無線マルチホップネットワーク  $N^j$  に含まれる無線ノード  $N_j^j$  との間のデータメッセージ配送を、 $N_i^i$  から  $A_m^i$  への無線マルチホップ配送と  $A_n^i$  から  $N_i^i$  への無線マルチホップ配送との組合せによって実現する (図 4)。すなわち、 $N_i^i$  から  $F$  もしくは  $N_j^j$  へのデータメッセージは、 $N^i$  内では  $N_i^i$  から  $A_m^i$  へのマルチホップ配送経路を片方向に配送し、逆に、 $F$  もしくは  $N_j^j$  から  $N_i^i$  へのデータメッセージは、 $N^i$  内では  $A_n^i$  から  $N_i^i$  へのマルチホップ配送経路を片方向に配送する。

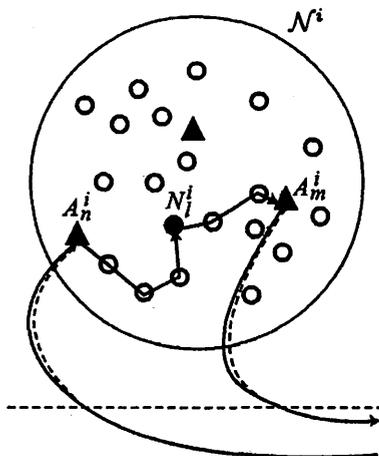


図 4: アクセスポイント間片方向配送

#### 4 片方向配送経路探索

無線マルチホップネットワーク  $N^i$  に含まれる無線ノード  $N_i^i$  が  $N^i$  に含まれないノードと 3 章で提案したデータメッセージの片方向配送を用いて双方向通信する場合、 $N^i$  に含まれる 2 つのアクセスポイント  $A_m^i$  と  $A_n^i$  を検出し、 $A_n^i$  から  $N_i^i$  までの無線マルチホップ配送経路と  $N_i^i$  から  $A_m^i$  までの無線マルチホップ配送経路とを検出することが必要である。このとき、高スループットのデータメッセージ配送を実現するためには、よりホップ数の小さい経路が求められる。さらに、この 2 つの配送経路に含まれる無線ノードによるデータメッセージ転送が互いに競合、衝突しないことが望ましい。ただし、以下の条件を満たす場合には、提案手法ではなく従来

手法を適用するべきである。

- $N_i^i$  といずれかのアクセスポイントとの間のホップ数が閾値  $h_t$  よりも小さい場合
- $\|A_n^i \dots N_i^i\|$  と  $\|N_i^i \dots A_m^i\|$  との間に閾値  $ch_t$  以上の中継ノードが共通に含まれる場合

5 章の評価実験結果でも示されるように、アクセスポイント間のホップ数に対して無線ノードからアクセスポイントまでのホップ数が閾値よりも小さい場合には、従来手法の方が高いスループットが得られる。また、無線マルチホップネットワークの周縁部に位置する無線ノードでは、2 つのアクセスポイントとの間の無線マルチホップ配送経路に共通に含まれる中継ノード数が多く、従来手法に対する衝突、競合の回避、削減効果が得られにくい一方、全体のホップ数は大きいことから、従来手法の方が高いスループットが得られる。

以上により、提案手法を適用するために、上記の 2 条件を考慮しながら無線ノードからより近い 2 つのアクセスポイントを選択する。ただし、基準となる閾値には、実験で得られた値を適用する。

#### 5 評価

本論文で提案した片方向無線マルチホップ配送経路を用いたデータメッセージ配送手法によるスループットの改善効果について、簡単なシミュレーション実験による評価を行なう。

まず、 $n$  ホップの双方向無線マルチホップ配送経路  $BR = \langle\langle N_0 \dots N_n \rangle\rangle$  の端点無線ノード  $N_0$  と  $N_n$  が  $BR$  を用いて互いにデータメッセージを無線マルチホップ配送する場合と  $m$  ホップの片方向無線マルチホップ配送経路  $UR = \|N_0 \dots N_m\|$  の端点ノード  $N_0$  から  $N_m$  へ  $UR$  を用いてデータメッセージを無線マルチホップ配送する場合のスループットを測定する。ここでは、隣接無線ノード間の距離を 50m、データメッセージが受信可能な無線信号到達距離を 60m とし、無線 LAN プロトコルに IEEE802.11 を用いた場合について GloMoSim [4] を用いてスループットを測定した。

測定結果を図 5 に示す。ここでは、 $UR$  を用いた片方向配送のスループット  $T_{UR}$  を実線、 $BR$  を用いた双方向配送のスループット  $T_{BR}$  として  $N_0$  から  $N_n$  への配送スループットと  $N_n$  から  $N_0$  への配送スループットの和を求めたものを破線で表している。同一ホップ数で比較した場合、 $T_{UR}$  は  $T_{BR}$  よりも 15.6-94.8% 程度のスループット向上がなされている。これは、3.2 節と 3.3 節で考察したように、デー

タメッセージの配送方向を片方向とすることによって、2 ホップ近隣無線ノードによるデータメッセージ転送との競合、衝突の機会が減少したためであると考えられる。

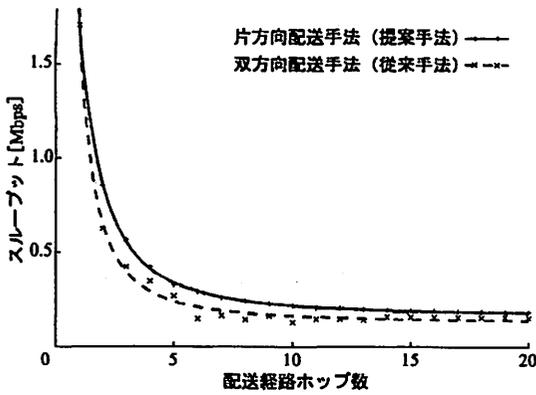


図 5: マルチホップ配送のスループット

しかし、提案手法では図 6 に示すように、データメッセージを送受信する無線ノード  $N_i^j$  は、自身からのホップ数が小さい 2 つのアクセスポイント  $A_m^i$  と  $A_n^i$  を経由したデータメッセージ配送を用いる。すなわち、 $N_i^j$  が送信するデータメッセージは  $N_i^j$  から  $A_m^i$  への  $m_1$  ホップの無線マルチホップ配送経路  $UR_1 = \{N_i^j \dots A_m^i\}$  を用いて配送され、 $N_i^j$  へ送信されるデータメッセージは  $A_n^i$  から  $N_i^j$  への  $m_2$  ホップの無線マルチホップ配送経路  $UR_2 = \{A_n^i \dots N_i^j\}$  を用いて配送される。したがって、 $UR$  を用いた  $m = m_1 + m_2$  ホップの無線マルチホップ配送におけるスループット  $T_{UR}(m)$  と  $BR$  を用いた  $n = \min(m_1, m_2)$  ホップの無線マルチホップ配送におけるスループット  $T_{BR}(n)$  とを比較しなければならない。

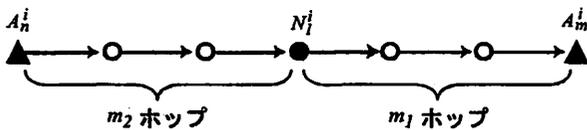


図 6: 片方向配送経路のホップ数

そこで、 $m$  と  $n$  の対とデータメッセージの配送スループットとの関係をまとめたものを図 7 に示す。図中の曲線は  $T_{UR}(m) = T_{BR}(n)$  となる  $m$  と  $n$  の関係を示す。ただし、 $m > n$  である。この曲線と直線  $m = n$  とに挟まれる領域に含まれる  $m$  と  $n$  の対では提案手法の方が高いスループットを得られ、他の領域に含まれる  $m$  と  $n$  の対では従来手法の方が高いスループットを得られる。この結果に基づくと、

近隣の 2 つのアクセスポイントに対して、提案手法の方が高いスループットを得られる無線ノード分布領域と従来手法の方が高いスループットを得られる無線ノード分布領域とが図 8 のように得られる。このアクセスポイント分布に対して、提案手法の方が高いスループットを得られる領域の面積比率をまとめたものを図 9 に示す。この結果、アクセスポイントが比較的疎に分布する場合は提案手法によって高いスループットを得られることが分かる。

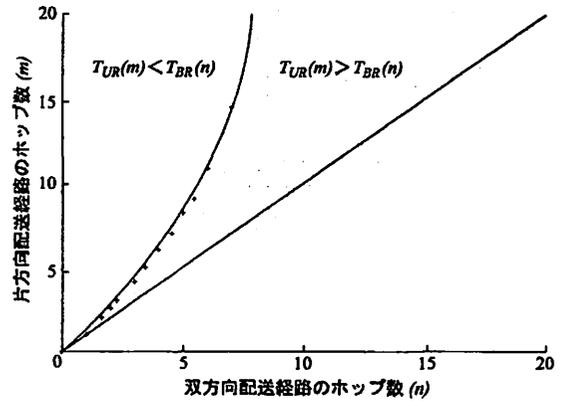


図 7: 片方向通信の適用基準

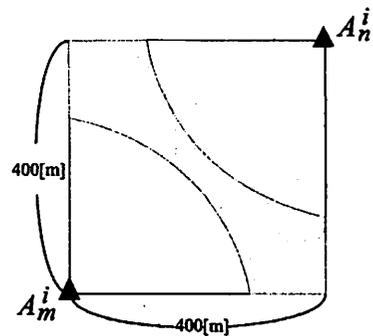


図 8: 片方向通信が有効な無線ノード位置

2 章で述べたように、RH2SWL を用いることで、順次短縮リンク列を用いることによって経路に含まれる無線ノード間の隠れ端末問題を解消し、データメッセージ配送スループットを改善する手法であるが、一方向のマルチホップ通信に対してしか適用することができない。そこで、RH2SWL と提案手法を組み合わせ適用した場合のスループットを測定した結果を図 10、この場合の配送手法の適用基準を図 11、アクセスポイント分布に対する提案手法の有効領域比率を図 12 に示す。RH2SWL と提案手法の組み合わせにより、より効果的にスループットが向上することが分かる。

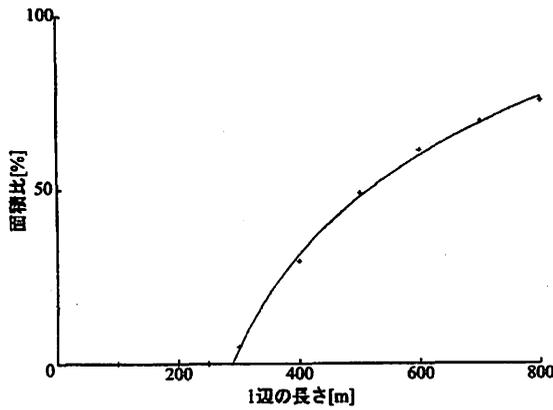


図 9: 片方向配送が有効な領域の面積比率

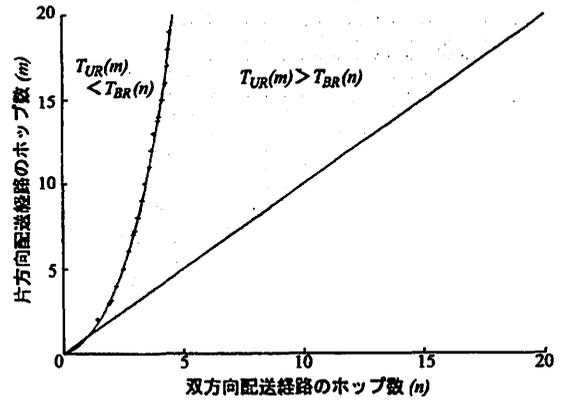


図 11: 片方向配送の適用基準 (RH2SWL)

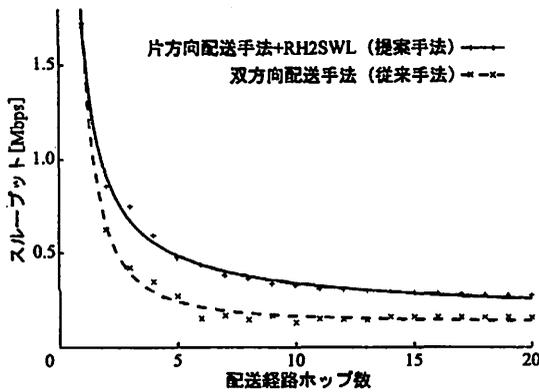


図 10: マルチホップ配送のスループット (RH2SWL)

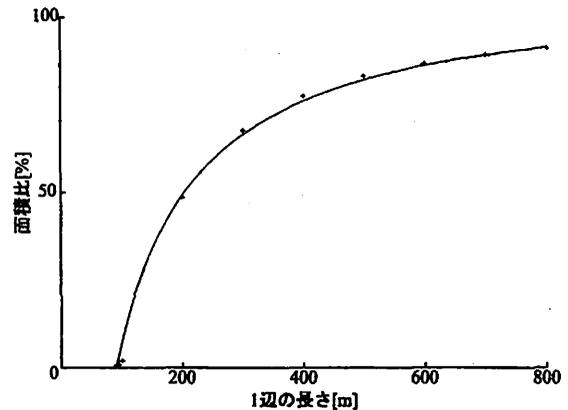


図 12: 片方向配送が有効な領域の面積比率 (RH2SWL)

## 6 まとめと今後の課題

本論文では、多数の無線ノードと複数のアクセスポイントを含む無線マルチホップネットワークを対象として、無線ノードが無線マルチホップネットワークに含まれないノードと通信する場合に、2つのアクセスポイントを送信元と送信先とし、自身を中継ノードに含む片方向配送経路を用いることで、従来の1つのアクセスポイントとの間の双方向配送経路を用いる手法よりも高いスループットを得られる可能性があることを指摘した。また、この可能性を簡単なシミュレーション実験によって確認した。今後は、複数の無線ノードが他のノードと同時に通信する状況に対して、配送経路を適切に定めることでスループットの低下をより小さくする手法を検討する。

### 参考文献

- [1] Hassanein, H. and Zhou, A., "Routing with Load Balancing in Wireless Ad Hoc Networks," Proceedings of the 4th International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless Mobile and Systems, pp. 89-96 (2001).
- [2] Numata, Y. and Higaki, H., "Routing and Communication Protocols for Higher Throughput in Wire-

less Ad-Hoc Networks," Proceedings of the 7th International Conference on Wireless and Optical Communications, pp. 68-74 (2007).

- [3] Toh, C.K., Vassiliou, V., Cuichal, G. and Shih, C.H., "MARCH: A Medium Access Control Protocol for Multiple Wireless Ad Hoc Networks," Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, pp. 512-516 (2000).
- [4] Zeng, X., Bagrodia, R. and Gerla, M., "GloMoSim: a Library for Parallel Simulation of Large-scale Wireless Networks," Proceedings of the International Workshop on Parallel and Distributed Simulation, pp. 154-161 (1998).
- [5] "Local and Metropolitan Area Network Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," Standard IEEE 802.11 (1997).
- [6] "Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs(tm)), Standard IEEE 802.15.1 (2002).
- [7] 梅島, 松垣, "電力制御を利用したアドホックネットワークルーティング," 情報研報, Vol. 2002, No. 12, pp. 7-12 (2002).