

送信電力制御により隠れ端末問題による衝突を回避した 無線マルチホップ通信の接続性改善

沼田 直弥^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要：無線マルチホップ配送経路上をデータメッセージ群が配送される時、経路上の中継無線ノードにおける無線信号の衝突とそれを回避するための競合とがデータメッセージ群のスループットを低下させる。そのため、隠れ端末の関係にある前後2ホップ隣接する中継無線ノードとの衝突を回避したデータメッセージ配送手法が求められる。各無線ノードが送信電力を調節することが可能なディスクモデルに基づく競合回避方法としてRH2SWLが提案されている。ここでは、順次短縮無線リンク列で配送経路を構成することで、前後ホップ中継無線ノードが同時並行に送信する無線信号の衝突を回避している。しかし、広域無線マルチホップネットワークでは、経路長の延長とともに経路検出率が急速に低下する問題がある。本論文では、衝突回避にSIRモデルを導入することで、無線リンク列が順次短縮されない場合でも前後2ホップ隣接する中継無線ノード間の衝突を回避した無線マルチホップ配送を実現する手法を提案する。中継無線ノード候補の探索範囲を狭めないように優先度を与えて経路探索要求メッセージを送信する手法を提案し、その有効性を示す。

Improvement of Connectivity in Hidden Terminal Problem Free Wireless Multihop Transmission Power Control

NAOYA NUMATA^{1,a)} HIROAKI HIGAKI^{1,b)}

Abstract: In wireless multihop networks, a sequence of data messages are transmitted along a predetermined wireless multihop transmission route. Collisions among wireless transmission signals from the intermediate wireless nodes cause reduction of end-to-end data message throughput. Hence, avoidance and/or reduction of collisions between 2-hop neighbour intermediate nodes due to the hidden terminal problem is required. For the disk model wireless transmissions in which each intermediate wireless node determines its wireless signal transmission range, RH2SWL is one of the efficient the solutions. Here, a wireless multihop transmission route consists of a sequence of wireless communication links whose length becomes shorter in hop-by-hop manner. However, in a wide-area wireless multihop network where a wireless multihop transmission route tends to be longer, the route detection ratio tends to be lower since it becomes difficult for each intermediate wireless node to detect its next-hop node with its shorter wireless signal transmission range to configure a sequence of hop-by-hop shorter wireless communication links. In order to solve this problem, this paper proposes a novel routing method for a wide-area wireless multihop networks based on the SIR model. The proposed routing method configures a wireless multihop transmission route where each intermediate wireless node receives wireless signal from its previous-hop intermediate wireless node without collisions with that from its next-hop wireless node. The results of simulation experiments show that the proposed method improves the route detection ratio. In addition to achieve higher route detection ratio, this paper mentions that prioritized transmissions of route request control messages supporting stable next-hop detection ratio in each intermediate node might be efficient and the results of preliminary simulation experiments show its potentials.

¹ 東京電機大学大学院ロボット・メカトロニクス学専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki
University, Adachi Tokyo 120-8551, Japan
a) numa@higlab.net
b) hig@higlab.net

1. はじめに

無線アドホックネットワークや無線センサネットワーク

における無線マルチホップ通信では、中継無線ノードが転送するデータメッセージがブロードキャストを基礎とする無線信号によって伝送されることから、1ホップ隣接無線ノードおよび2ホップ隣接無線ノードが送受信する無線信号との衝突が確率的に発生する。このため、再送信によるエンドエンド配送遅延の延長や配送スループットの低下、電力消費等の通信オーバーヘッドの拡大が問題となる。IEEE802.11[1]による晒し端末間の衝突回避やRTS/CTS制御による隠れ端末間の衝突回避などの手法が導入されているが、競合状態にある1ホップ隣接無線ノードと2ホップ隣接無線ノードの行なう通信との並行性を犠牲にして、これらの送受信を遅延させる問題がある。これまでに、中継無線ノードの無線信号送信電力を転送先次ホップ隣接無線ノードに到達可能な最低限の電力とすることによって、異なる経路の中継無線ノードとなっている隣接無線ノードとの並行性をできるだけ高く保つ手法が提案されている。

RH2SWL(Routing Protocol for Multihop Transmission along a Sequence of Hop-by-Hop Shortening Wireless Links)では順次短縮無線通信リンク列で無線マルチホップ配送経路を構成することによって、経路内の隠れ端末間の衝突/競合を回避することを可能とした[14]。ただし、近隣無線ノード間の衝突/競合の発生条件をディスクモデル[11]を基礎として定めていることから、順次短縮無線通信リンク列によって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構成するためには、比較的高い密度で無線ノードが分布する環境を適用対象とすることが求められる。また、経路長が延長する傾向にある広域無線マルチホップネットワークでは、送信先無線ノードに近付くにつれて次ホップ無線ノードの探索領域が縮小することにより、経路検出率が低下する問題がある。

本論文では、隣接無線ノードから受信する無線信号間の衝突条件をSIRモデルに基づいて定めることによって、必ずしも順次短縮無線通信リンク列ではなくても、前後2ホップ隣接する中継無線ノードとの隠れ端末問題を解消することが可能な無線マルチホップ配送経路を構成する手法を提案する。これによって隠れ端末間の経路内衝突/競合を回避し、データメッセージ配送遅延を短縮し、配送スループットを拡大するとともに、比較的低い無線ノード分布密度の広域無線マルチホップネットワークにおいてもより高い接続性を提供することが可能となる。

2. 関連研究

2.1 経路内衝突回避

無線マルチホップネットワークにおけ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は、配送経路 $\{N_0 \dots N_n\}$ の中継無線ノード $N_i (0 < i < n)$ によるデータメッセージの転送によって実現される。このとき、この配送経路をデータメッセージ配

送に先立って検出するAODV[9]、DSR[3]、TORA[8]等のルーティングプロトコルを適用する場合には、経路探索のための制御メッセージをフラッディングによって広域に拡散させる通信オーバーヘッドを要する。このため、検出経路を多数のデータメッセージからなるデータメッセージ群の配送に用いることで、各データメッセージあたりの通信オーバーヘッドを低減することが好ましい。逆に、ひとつあるいは少数のデータメッセージ配送には、フラッディングのような全域的な制御メッセージ交換を要さないGEDIR[7]、FACE[2, 5, 12]等の各メッセージについて次ホップ無線ノードを局所的かつ動的に決定する手法が有効である。

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においては、単一経路上を複数のデータメッセージが順次配送されることから、経路に含まれる複数の中継無線ノードが同時並行にデータメッセージを送信することによる無線信号間の衝突、すなわち、経路内衝突による配送性能低下の問題を解消あるいは低減することが必要である。必ずしも無線基地局を介することなく隣接無線ノード間でデータメッセージ転送が可能な無線アドホックネットワークにおいては、晒し端末の関係にある隣接無線ノード間ではIEEE802.11等の無線LANプロトコルのもつCSMA/CAによる衝突回避手法が適用される。また、隠れ端末の関係にある2ホップ隣接無線ノードによる無線信号の同時並行送信によって発生する衝突の回避にはRTS/CTS制御が適用される。各無線ノードの無線信号送信電力が一定で等しい場合、すなわち、各無線ノードの無線信号到達距離が一定で等しいユニットディスクモデル[6]に基づく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配送では、図1に示すように、これらの衝突回避手法の働きによって前後2ホップの中継無線ノードとは互いに競合し、同時並行にデータメッセージ転送を行なうことができない。これは、各中継無線ノード N_i からその無線信号到達距離内に N_{i+1} のみならず N_{i-1} が必ず含まれるためである。このため、 N_{i-1} は N_{i-2} と N_i の無線信号到達範囲内に含まれることとなり、これらの間の隠れ端末問題から衝突/競合の発生を余儀なくされる。この結果、各中継無線ノードの通信容量を C とすると、無線マルチホップ配送のエンドエンドの通信容量は高々 $C/3$ となる(図2)[13]。

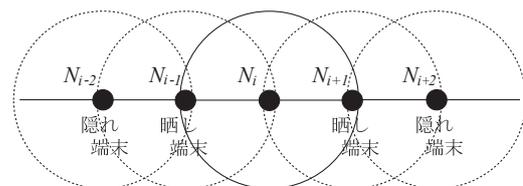


図1 前後2ホップ中継無線ノードとの競合。

なお、ここではユニットディスクモデルに基づいた隣接無線ノード間のデータメッセージ配送を対象としている。

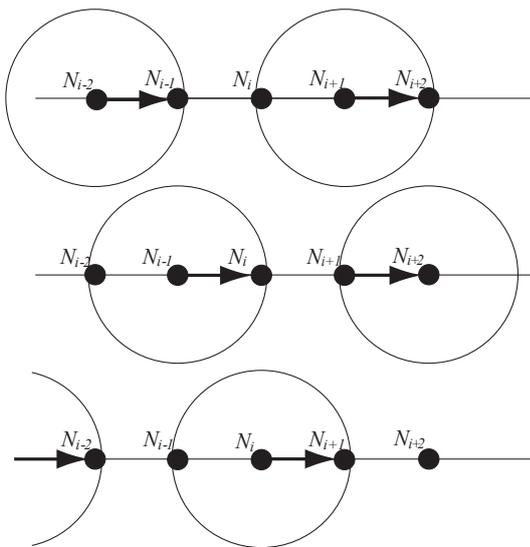


図 2 無線マルチホップ配送の通信容量.

ユニットディスクモデルでは、送信無線ノード N_s が送信した無線信号を受信無線ノード N_r が受信できる条件をノード間距離 $|N_s N_r|$ が一定値 R 以下であることとしている。

$$|N_s N_r| \leq R \quad (1)$$

この R を N_s の無線信号到達距離といい、上の議論では R が各無線ノードで一定かつすべての無線ノードにおいて等しいことを仮定している。

2.2 RH2SWL

前節では、すべての中継無線ノードの無線信号到達距離が一定で同一であることを前提とすると、無線マルチホップ配送のエンドエンド通信容量は高々 $C/3$ であることを示した。これに対して RH2SWL[14] では、各中継無線ノードの送信電力が変更可能であり、中継無線ノードごとに異なる無線信号到達距離を持つことが可能であることを前提として無線マルチホップ配送のエンドエンド通信容量を最大 $C/2$ とすることができる。ここでは、図 3 に示すように無線マルチホップ配送経路 $\|N_0 \dots N_n\|$ を順次短縮する無線通信リンク列、すなわち以下の条件を満足する無線通信リンク列によって構成する。

$$|N_{i-1} N_i| > |N_i N_{i+1}| \quad (2)$$

そして、各中継無線ノード N_i は自身の次ホップ隣接無線ノードに無線信号が到達可能な最小の無線信号送信電力によってデータメッセージを転送する。これによって、 N_i が N_{i+1} へデータメッセージを転送する場合にも、このデータメッセージ転送に用いられる無線信号は N_{i-1} には到達しない。つまり、 N_{i-2} から N_{i-1} へ転送されるデータメッセージのための無線信号と N_i から N_{i+1} へ転送されるデータメッセージのための無線信号が N_{i-1} で衝突するという互いに隠れ端末の位置にある N_{i-2} と N_i によって発生する N_{i-1} における衝突は、順次短縮無線通信リンク列による

無線マルチホップ配送経路に沿った次ホップ隣接無線ノードへの最小無線信号送信電力を用いた配送によって回避することができる。

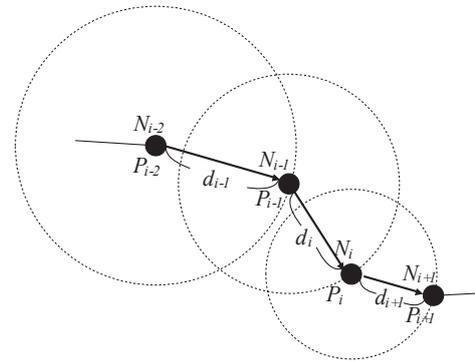


図 3 ディスクモデルに基づく無衝突無線マルチホップ配送経路.

これによって、図 4 に示すように、すべての中継無線ノードの無線信号到達距離が一定で同一であるユニットディスクモデルに基づく場合とは異なり、各中継無線ノードの無線信号送信電力を個別に変更可能なディスクモデルに基づく場合には、 N_i は前後 2 ホップ隣接中継無線ノードとの間で隠れ端末問題による衝突を回避することから、 N_i は N_{i-2} , N_{i+2} とは互いに競合することなく、同時並行にデータメッセージを転送することが可能である。その結果、各中継無線ノードの通信容量を C とするとき、エンドエンドの通信容量は最大 $C/2$ となり、無線信号到達距離が一定で同一である場合の $C/3$ を拡大することができる。

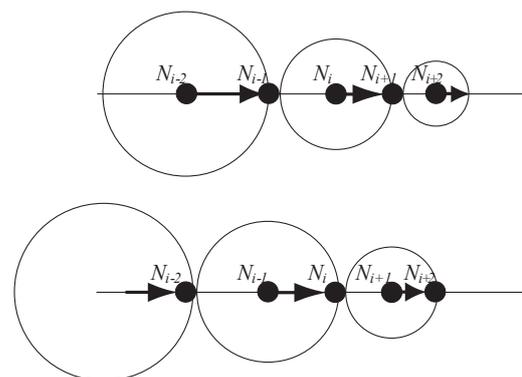


図 4 RH2SWL による無線マルチホップ配送の通信容量.

このように、RH2SWL では、ディスクモデルに基づいて各中継無線ノードが次ホップ中継無線ノードにデータメッセージを転送することが可能となる最小の送信電力を用いることを前提に、中継無線ノード N_i が前ホップ中継無線ノード N_{i-1} の無線信号到達距離内にありながら、 N_{i+1} の無線信号到達距離外にあるようにすることで N_i における衝突を回避する。しかし、順次短縮する無線通信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場合には、

送信先無線ノードに近づくほど中継無線ノードの送信電力を低減させる必要があることから、次ホップ隣接無線ノードの探索対象範囲が縮小する。これによって次ホップ隣接無線ノードの検出確率が低下することから、送信元無線ノードと送信先無線ノードとの距離が長くなる広域無線マルチホップネットワークにおける適用には困難がある。論文 [15] では、一時的に異なる無線通信チャネルを用いる中継無線ノードを導入することによって短縮された無線マルチホップ配送経路上の無線通信リンク長を拡大する手法を提案している。これによって広域無線マルチホップネットワークにおいても前後 2 ホップの中継無線ノードとの隠れ端末問題による衝突/競合を回避することが可能である。ただし、データメッセージの無線マルチホップ配送においては、他の中継無線ノードとは異なる通信チャネルを用いてデータメッセージを転送する中継無線ノード間で同期的に送受信に用いる通信チャネルを切替える必要があるなどの通信オーバーヘッドが大きい。このため、単一通信チャネルだけを用いてこの問題を解決する手法が求められる。

3. 提案手法

3.1 SIR モデルに基づく経路内衝突回避

無線ノード N から送信電力 P で送信された無線信号の隣接無線ノード N' における受信電力は、 $d = |NN'|$ とすると $\beta P/d^\alpha$ で与えられる。 N' において、この無線信号を正しく受信するためには、受信電力が閾値 \bar{P} 以上であること、すなわち、 $\beta P/d^\alpha \geq \bar{P}$ を満足することが必要である。この観点で、RS2SWL を用いた無線マルチホップ配送における隣接無線ノード間距離と受信電力の関係を示したものが図 5 である。中継無線ノード N_i における、その前ホップ隣接無線ノード N_{i-1} から送信された無線信号の N_i における受信電力が \bar{P} に等しく、その次ホップ隣接無線ノード N_{i+1} から送信された無線信号の受信電力が \bar{P} と等しくなる N_{i+1} からの距離よりも $|N_i N_{i+1}|$ の方が長くなるような N_{i+1} を次ホップ隣接無線ノードとする。したがって、 $|N_{i-1} N_i| > |N_i N_{i+1}|$ が任意の i において成り立つ、すなわち、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する。

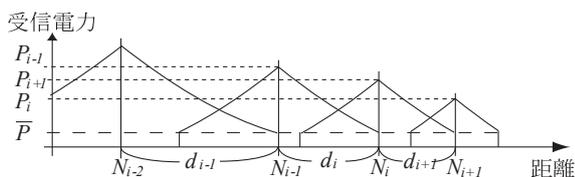


図 5 RH2SWL における隣接無線ノード間距離と受信電力。

SIR モデル [4] もしくは物理モデル [10] では、無線ノード N_r が隣接無線ノード N_s からの無線信号を衝突なく受信するための条件は、無線ノード N_i の無線信号送信電力を

P_i, N_i と N_r との距離 $|N_i N_r|$ を d_i, N_r の周辺ノイズ強度を P_r^n とするとき、以下の式で表すことができる。

$$P_s/d_s^\alpha \geq \beta(P_r^n + \sum_{i \neq s} P_i/d_i^\alpha) \quad (3)$$

簡単のため $P_r^n = 0$ とし、無線マルチホップ配送経路上において 2 ホップ隣接無線ノードの送信する無線信号による影響がその距離によって十分に減衰すると仮定する。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 $\{N_0 \dots N_n\}$ においては、中継無線ノード N_i が前ホップ中継無線ノード N_{i-1} の送信する無線信号を衝突なく受信するためには、 $d_i := |N_{i-1} N_i|$ として以下を満たすことが求められる。

$$P_{i-1}/d_i^\alpha \geq \beta P_{i+1}/d_{i+1}^\alpha \quad (4)$$

N_{i+1} が次ホップ中継無線ノード N_{i+2} を検出する確率をより高くするためには P_{i+1} をより大きく定めることが望ましい。したがって $P_{i+1} = (P_{i-1}/\beta)(d_{i+1}/d_i)^\alpha$ とする。

RH2SWL と同様に AODV[9], DSR[3] 等を含む多くのアドホックルーティングプロトコルを基礎として、経路探索要求メッセージ $Rreq$ のフラッディングによって経路探索を送信元無線ノードから送信先無線ノードに向けて順次次ホップ中継無線ノードを検出することで実現する。これを想定すると、 N_0 から $i+1$ ホップ目の中継無線ノード N_{i+1} を検出する時点では直前ホップ中継無線ノード N_i までは検出済みである。そのため、 $P_j (0 \leq j < i)$ および $d_j (1 \leq j < i)$ は決定しており、 N_{i+1} は P_{i+1} を計算することが可能である。したがって、 N_i の隣接無線ノード、すなわち、 N_i が送信電力 P_i で送信した無線信号の受信電力が \bar{P} 以上である無線ノード N_{i+1} であれば、 N_i からの距離 $d_{i+1} = |N_i N_{i+1}|$ に応じて自信の送信電力を $P_{i+1} = (P_i/\beta)(d_{i+1}/d_i)^\alpha$ として定めればよい。 N_{i+1} が次ホップ中継無線ノードへデータメッセージを転送する際に、ここで求めた無線信号送信電力 P_{i+1} を用いるのであれば、 d_i と d_{i+1} の大小関係とは無関係に N_{i+1} が N_i の次ホップ中継無線ノードとなることが可能である。つまり、図 6 に示すように $d_i > d_{i+1}$ となる N_{i+1} が N_i の次ホップ中継無線ノードとなっても、図 7 に示すように $d_i < d_{i+1}$ となる N_{i+1} が N_i の次ホップ中継無線ノードとなっても、 N_i において N_{i-1} と N_{i+1} が同時にデータメッセージを送信しても N_i で衝突することなく N_{i-1} から N_i へのデータメッセージ転送を行うことができる。これは、ディスクモデルに基づく RH2SWL においては、 N_i における N_{i-1} と N_{i+1} による隠れ端末間の衝突を回避するため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ことができる隣接無線ノード、すなわち、 $d_i > d_{i+1}$ を満たす N_{i+1} のみが N_i の次ホップ中継無線ノードとなることができる RH2SWL と比較して経路内衝突を回避した無線マルチホップ配送経路を構成する機会が増加することを意味している (図 8)。

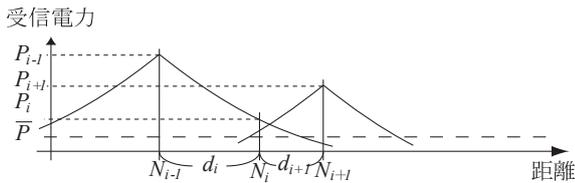


図 6 SIR モデルに基づく拡張 RH2SWL における隣接無線ノード間距離と受信電力 (1).

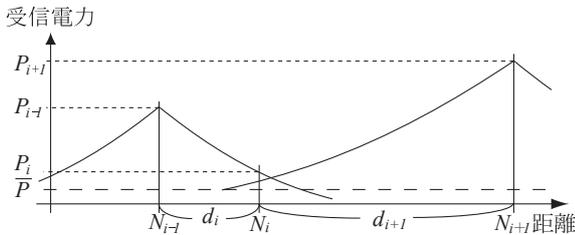


図 7 SIR モデルに基づく拡張 RH2SWL における隣接無線ノード間距離と受信電力 (2).

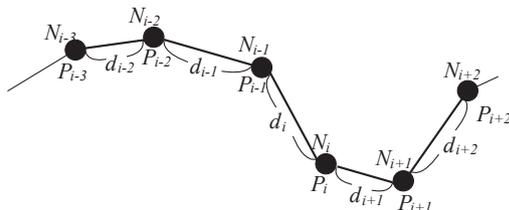


図 8 提案手法による無衝突無線マルチホップ配送経路.

以上により、 N_i の次ホップ中継無線ノードの N_{i+1} の位置が満たすべき条件とその送信電力についてまとめると以下ようになる。

$$\beta P_i / d_{i+1}^\alpha \geq \bar{P} \quad (5)$$

$$P_{i+1} = (P_{i-1} / \beta) (d_{i+1} / d_i)^\alpha \quad (6)$$

さて、 N_i の次ホップ中継無線ノード N_{i+1} の検出においては、 P_{i+1} の条件を与える (6) 式から、 d_{i+1} が大きいほど P_{i+1} を大きくすることができることが分かる。すなわち、 N_i における隠れ端末間の衝突回避という条件のみに注目すると、 N_i からより離れた無線ノードを N_{i+1} とすることによって P_{i+1} を大きくすることが可能となり、 N_{i+2} の探索範囲を拡大することができる。しかし、その一方で (6) 式に示した N_{i+1} における隠れ端末間の衝突回避という条件に注目すると、 d_{i+1} が大きくなることによって P_i / d_{i+1}^α は小さくなる。これによって、 P_{i+2} / d_{i+2}^α に対する制約条件が厳しくなり、 P_{i+2} をより小さくすることが求められる。これは、 N_{i+3} の探索範囲を縮小することを意味しており、無線マルチホップ配送経路の検出率を低下させる原因となり得る。以上により、 N_{i+1} の検出には P_{i+1} と d_{i+1} との間のトレードオフを考慮する必要があることが分かる。

3.2 経路探索手法

前節で述べた中継無線ノード N_i における無線信号送信電力 P_i に対する条件に従って送信元無線ノード N_0 から送信先無線ノード N_n までの無線マルチホップ配送経路 $\|N_0 \dots N_n\|$ を探索する手法を提案する。ここでは、RH2SWL と同様に N_0 から経路探索要求メッセージ $Rreq$ をフラッディングすることによって行なう。このとき、中継無線ノード N_i は送信する $Rreq$ メッセージに次ホップ中継無線ノードの候補 N_{i+1} が無線信号送信電力 P_{i+1} を決定するために必要な情報をピギーバックする。すなわち、(6) 式によって N_{i-1} と N_i が決定したそれぞれの無線信号送信電力 P_{i-1} と P_i およびこれらの中継無線ノード間の距離の推定値 d_i が $Rreq$ メッセージにピギーバックされる。

本論文では、各無線ノードが GPS 受信機のような自身の位置情報を取得するためのデバイスを備えていることを仮定しない。そのため、隣接無線ノードとの距離は $Rreq$ メッセージの無線信号受信電力によって推定する。上に述べたように $Rreq$ メッセージをブロードキャスト送信する無線ノードのデータメッセージ送信電力は既に決定済みであり、 $Rreq$ メッセージにピギーバックされることから、 N_i はこの送信電力を用いて $Rreq$ メッセージをブロードキャスト送信する。これを受信した N_{i+1} は、以下の式に従って隣接無線ノード間距離を推定する。

$$d_{i+1} = \frac{\lambda}{4\pi} \left(\frac{P_i}{P_{rec}} g_t g_r \right)^{1/\alpha} \quad (7)$$

ただし、送信する無線信号の波長を λ 、送受信ゲインをそれぞれ g_t, g_r 、 $Rreq$ メッセージの受信電力を P_{rec} とする*1。受信した $Rreq$ メッセージの受信電力に基づいて d_{i+1} を推定した中継無線ノード N_{i+1} は、この $Rreq$ メッセージが無線マルチホップ配送されてきた経路を延長した送信元無線ノードまでの経路探索を継続する。このとき、 N_{i+1} は自身がこの無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードとなった場合の無線信号送信電力 P_{i+1} を定め、送信する $Rreq$ メッセージにピギーバックする必要がある。

[ルーティングプロトコル]

- (1) 送信元無線ノード N_0 は、経路探索要求メッセージ $Rreq$ を最大送信電力でブロードキャスト送信する。このとき、自身の無線信号送信電力を $Rreq$ にピギーバックする。
- (2) N_0 から送信された $Rreq$ メッセージを受信した N_0 の隣接無線ノード N_1 は、 $Rreq$ メッセージを最大送信電力を用いて $Rreq$ メッセージをブロードキャスト送信する。 $Rreq$ メッセージには N_0 と N_1 の無線信号送信電力、すなわち最大送信電力と $Rreq$ メッセージの受信電力から推定した $d_1 = |N_0 N_1|$ をピギーバックする。
- (3) N_{i-1} から送信された $Rreq$ メッセージを受信した N_{i-1} の隣接無線ノード N_i は、 $Rreq$ メッセージをブロード

*1 $P_{rec} \geq \bar{P}$ である。

キャスト送信済みである場合には受信した $Rreq$ メッセージに対しては何も処理をしない。 N_i がまだ $Rreq$ メッセージをブロードキャスト送信していない場合には、受信した $Rreq$ メッセージにピギーバックされた $P_{i-2}, P_{i-1}, d_{i-1}$ および $Rreq$ の受信電力から推定される d_i から自身のデータメッセージ送信時に用いる無線信号送信電力 P_i を算出し、これを用いて $Rreq$ メッセージをブロードキャスト送信する。このとき、 N_i は自身のデータメッセージ送信時の無線信号送信電力 P_i を定め、送信する $Rreq$ メッセージには、 P_i に加えて受信した $Rreq$ メッセージにピギーバックされていた P_{i-1} および推定済みの d_i をピギーバックする。

- (4) 送信先無線ノード N_n が N_{n-1} からブロードキャスト送信された $Rreq$ メッセージを受信することによって、 N_0 から N_n までの n ホップ無線マルチホップ配送経路が検出される。このとき、各中継無線ノードがデータメッセージを次ホップ中継無線ノードに転送する際に用いる無線信号送信電力が決定しており、この送信電力で各中継無線ノードがデータメッセージを次ホップ中継無線ノードへ転送することによって、経路内衝突を回避した配送が実現できる。なお、各中継無線ノードへの無線マルチホップ配送経路検出の通知には、AODV, RH2SWL 等と同様に経路探索応答メッセージ $Rrep$ の検出経路に沿ったユニキャスト配送を用いる。□

4. 評価

本論文で提案した SIR 衝突モデルに基づいた RH2SWL の拡張手法による、接続性の改善効果、すなわち、経路検出率の改善を評価する。ここでは、図 9 に示すように、 $1,000\text{m} \times 1,000\text{m}$ の正方形シミュレーション領域に無線信号到達範囲が 100m の無線ノード $100\sim 1,000$ 台を一様分布乱数を用いてランダムに配置する。送信元無線ノードはシミュレーション領域境界である正方形の 1 辺の midpoint に固定し、送信先無線ノードは送信元無線ノード位置である正方形の 1 辺の midpoint とその対辺の midpoint を結ぶ直線上とし、これらのノード間距離を $200\sim 1,000\text{m}$ とする。それぞれのノード数、送信元/送信先無線ノード間距離に対して 500 通りの異なる無線ノード配置を行ない、無線マルチホップ配送経路の検出率を求める。シミュレーション実験の結果を図 10 に示す。

従来の RH2SWL 手法と本論文で提案した SIR 衝突モデルによる拡張手法のいずれにおいても、無線ノード数が多いほど検出率が高く、また、送信元/送信先無線ノード間距離が長くなるにしたがって経路検出率が低下する。ただし、従来手法が順次短縮無線リンク列の適用によって次ホップ中継無線ノード候補の存在可能領域が単調に狭くなるのに対して、提案手法では SIR 衝突モデルの導入によって必ず

しも無線リンク列が順次短縮する必要がないことから、経路検出率が改善され、より長距離の無線マルチホップ配送経路が検出できるようになっている。経路検出率は全体として 20%改善している。また、経路検出率が 90%となる距離は、提案手法によって従来手法から 108.3%延長しており、50%となる距離は 250.0%、0%となる距離は 7%の延長であった。

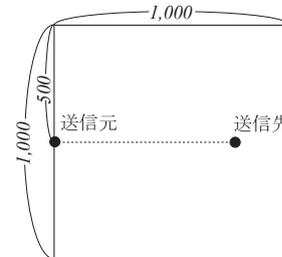


図 9 シミュレーション実験の送信元/送信先無線ノード配置。

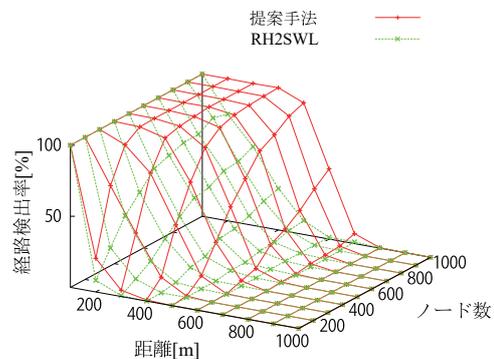


図 10 接続性評価結果 (1)。

このように、提案手法の適用によって無線マルチホップ配送経路の検出率が改善されたが、経路検出率が 0%となる距離については 7%の改善にとどまった。そこで、提案手法の経路検出率をさらに改善する手法について考察する。提案手法では、無線マルチホップ配送経路の検出を経路探索要求メッセージのフラッディングを用いて行なっている。一般に、フラッディングによって経路を検出する手法では、複数の無線ノードが同時並行に経路探索要求メッセージをブロードキャスト送信することによって発生する衝突による経路探索要求メッセージの紛失による影響を考えないならば、経路検出は各無線ノードのブロードキャスト送信順序には依存しない*2。しかし、提案手法では中継無線ノードの候補無線ノード N_i の隣接無線ノード N が次ホップ中継無線ノードの候補無線ノードとなることができるとは N_i の前ホップ中継無線ノードの候補ノードがどの隣接無線ノードであるかに依存する。たとえば、図 11 に示すように、隣接無線ノード N_{i-1} がブロードキャスト送信した

*2 検出される無線マルチホップ配送経路の経路長は送信順序に依存する。

経路探索要求メッセージを最初に受信してブロードキャスト送信を行なった場合には N は N_i の次ホップ中継無線ノードの候補無線ノードとなって経路探索を継続するが、別の隣接無線ノード N'_{i-1} がブロードキャスト送信した経路探索要求メッセージを最初に受信してブロードキャスト送信を行なった場合には N が N_i の次ホップ中継無線ノードの候補ノードとはなれない場合がある。これは、ブロードキャスト送信した経路探索要求メッセージを受信した無線ノードが次ホップ中継無線ノードの候補ノードとなることができるか否かが前ホップ中継無線ノードに依存するにもかかわらず、各無線ノードが経路探索メッセージを直ちに送信しなければならず、かつ一度だけした送信できないためである。そこで、各無線ノードにおけるブロードキャスト順序を最適化した場合の経路検出率のシミュレーション実験結果を図 12 に示す。ここでは、経路検出率が 90%、50%、0%となる送信元/送信先無線ノード間距離が提案手法に対してそれぞれ 19.5%、32.8%、34%延長している。この最適化されたブロードキャスト送信順序を実現することは不可能である。より適切な前ホップ中継無線ノードとつぎホップ中継無線ノードの対を選択するために、単一の経路探索要求メッセージを受信してただちに経路探索要求メッセージをブロードキャスト送信を行なわない方法や複数回の経路探索要求メッセージのブロードキャスト送信を各無線ノードが行なう方法が考えられるが、経路探索に要する時間が延長する、経路探索により多くの制御メッセージ交換が必要となり、各無線ノードにおける処理が複雑になる、という問題を解決しなければならない。

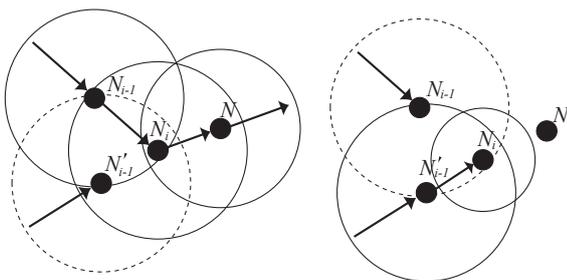


図 11 ブロードキャスト送信順序による経路検出の可否の違い。

ここで、各中継無線ノード N_i のデータメッセージ送信電力 P_i は (6) 式で与えられるが、これを変形すると以下のようになる。

$$P_i = D_i P_1 / d\beta^{(i-1)/2} (i \text{ は奇数})$$

$$P_i = D_i P_0 / d\beta^{i/2} (i \text{ は偶数}) \quad (8)$$

$$\text{ただし } D_1 = d_1 \quad D_{i+1} = d_{i+1} / D_i$$

各中継無線ノード N_i は、経路探索要求メッセージをデー

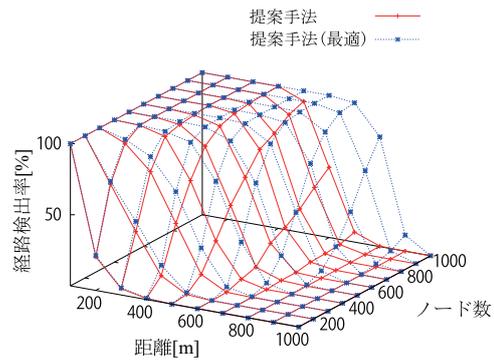


図 12 接続性評価結果 (2)。

タメッセージ転送に用いる電力 P_i で送信することから、 P_i をより大きく維持することによって送信元/送信先無線ノード間距離が長い場合でも経路検出率を低下させにくくすることができる。ここで、 D_i が (8) 式の漸化式で与えられることから、 D_i を大きくすると D_{i+1} は小さくなることから、各中継無線ノードにおけるつぎホップ中継無線ノードの候補ノードの検出率を安定させるために、 D_i を一定値に保つことは、送信元/送信先無線ノード間距離が長い場合にも高い経路検出率を実現するために有効な手法であると考えられる。そこで D_i が 1 に近くなる隣接無線ノードに対して優先的に経路探索要求メッセージをデータメッセージを転送する手法を用いて、経路検出率をシミュレーション実験によって求めた結果を図 13 に示す。この改善手法によって得られた経路検出率は、最適化したものには及ばないものの、提案手法の経路検出率を改善しており、経路検出率が 90%、50%、0%となる送信元/送信先無線ノード間距離を提案手法に対してそれぞれ 7.6%、8.5%、5%改善している。

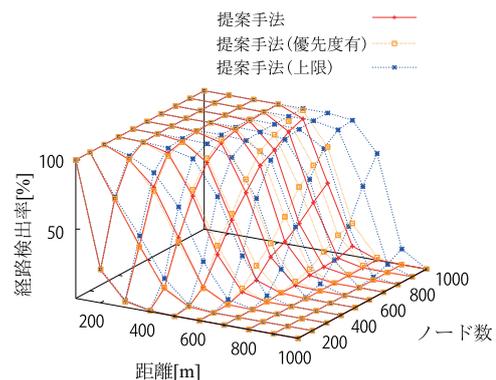


図 13 接続性評価結果 (3)。

5. まとめ

本論文では、データメッセージ群の無線マルチホップ配送において、経路内衝突/競合を回避する SIR モデルに基づいた新しい経路探索手法を提案した。RH2SWL が示したように、中継無線ノードのデータメッセージ送信電力を

制御することによって中継無線ノード N_i が N_{i+1} が無線信号を送信している場合でも N_{i-1} から送信された無線信号を受信することができれば、隠れ端末問題による衝突を競合なしに回避することができる。提案手法では、SIR モデルに基づいて各中継無線ノードの送信電力を定めることでこれを実現している。従来のディスクモデルに基づいた RH2SWL 手法では、順次短縮する無線通信リンク列で無線マルチホップ配送経路を実現していたため、経路長が長くなる傾向にあ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問題があったが、提案手法ではこれを解決している。それは、各無線通信リンクに課されていた順次短縮という制約条件を緩和することによって実現されている。

シミュレーション実験により、提案手法が従来手法の接続性を改善することが確認されたが、経路探索時の制御メッセージのフラッディングを工夫することで、さらに改善できることを明らかにした。提案手法で計算される送信電力の大きさが次ホップ無線ノードの検出しやすさと符号することから、送信電力が中継無線ノードごとに大きく変動しないように、優先度を付して経路探索時の制御メッセージを送信する手法を考案し、これが有効である見込みを得た。今後は、この手法の正当性を検証し、さらにその性能の実験評価を行なう。

参考文献

- [1] “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).
- [2] Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., “Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks,” *Wireless Networks*, Vol. 7, pp. 609–616 (2001).
- [3] David, B., David, A. and Hu, Y.C., “The Dynamic Source Routing Protocol,” Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-09.txt (2003).
- [4] Gupta, P. and Kumar, P.R., “The Capacity of Wireless Networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, pp. 388–404 (2000).
- [5] Higaki, H., “NB-FACE: No-Beacon FACE Ad-hoc Routing Protocol for Reduction of Location Acquisition Overhead,” *Proceedings of the 7th IEEE International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, pp. 81–84 (2008).
- [6] Kranakis, E., Singh, H. and Urrutia, J., “Compass Routing on Geometric Networks,” *Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry*, pp. 51–54 (1999).
- [7] Lin, X. and Stojmenovic, I., “Geographic Distance Routing in Ad Hoc Networks,” Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- [8] Park, V. and Corson, S., “Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification,” Internet Draft, draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt (2001).
- [9] Perkins, C.E. and Royer, E.M., “Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing,” RFC 3561 (2003).
- [10] Shi, Y., Hou, Y., Liu, J. and Kompella, S., “How to Correctly Use the Protocol Interference Model for Multi-hop

- Wireless Networks,” *Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 239–248 (2009).
- [11] Urrutia, J., “Two Problems on Discrete and Computational Geometry,” *Proceedings of Japan Conference on Discrete and Computational Geometry*, pp. 42–52 (1999).
- [12] 江崎, 桧垣, “低信頼無線アドホックネットワークのための Face プロトコルの拡張,” *情報処理学会論文誌*, Vol. 53, No. 8, pp. 1991–2000 (2012).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 松村, 桧垣, “2 チャンネルを用いた順次短縮無線リンク列による無線マルチホップ通信経路内隠れ端末問題解決手法,” *信学技報*, Vol. 110, No. 224, pp. 51–56 (2010).