

# 経路修正とネットワークコーディング の組合せによる無線マルチホップ配送

村木 裕一郎<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では、晒し端末問題と隠れ端末問題による無線信号の衝突、競合が配送性能低下の主要要因のひとつである。異なる配送経路間の衝突、競合の発生は、中継無線ノードのデータメッセージ転送頻度に依存する。あらかじめ互いに干渉しない配送経路を選択する従来手法は、無用に配送経路長を拡大し、配送遅延を延長する問題がある。そこで、本論文では、配送経路間の衝突、競合の発生頻度に応じて経路を動的かつ局所的に修正することで、この問題を解決する手法を提案する。ここでは、まず、近接する配送経路を分離するふたつのアルゴリズムを適用する。ただし、この分離手法は配送経路が局所的に並行である場合にのみ有効であり、配送経路が互いに交差する場合には無効である。そこで、経路分離に失敗する場合には経路を合流させ、ネットワークコーディング手法を適用することで、配送経路近接による性能低下を縮小する。最後に、データメッセージの傍受によるネットワークコーディング手法が適用可能性を大きく改善することをシミュレーション実験により示す。

**キーワード:** 無線マルチホップネットワーク, 経路間衝突, アルゴリズム, ネットワークコーディング

## Performance Improvement of Wireless Multihop Transmissions by Route Modification and Network Coding

MURAKI YUICHIRO<sup>1, a)</sup> HIGAKI HIROAKI<sup>1, b)</sup>

**Abstract:** In wireless multihop networks, collisions and contentions of wireless signals caused by exposed and hidden-terminal problems results in longer transmission delay of data messages. Though avoidance and/or reduction of collisions between neighbor nodes in different transmission routes is important, introduction of detour routes only causes longer end-to-end transmission delay. In order to solve this problem, this paper proposes on-demand and localized route modification by applying the following two algorithms; one is route separation algorithm by replacement of an intermediate node and the other is route separation algorithm by addition of an intermediate node. These algorithms work only for adjacent transmission routes. For intersect transmission routes, it is impossible for the algorithms to be applied for route separation. Hence, we propose the method to introduce an intersection node of them and to apply the network coding in order to reduce the performance reduction of neighbor transmission routes. The proposed overhearing method drastically improve applicability of the network coding method and it is expected to improve the performance of data message transmissions.

**Keywords:** Wireless Multihop Networks, Collisions between Routes, Algorithm, Network Coding

<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

<sup>a)</sup> muraki@higlab.net

<sup>b)</sup> hig@higlab.net

### 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 [2]。

無線アドホックネットワークでは、互いに無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードが同時にデータメッセージを送信することによって衝突が発生する。データメッセージの受信無線ノードにおける衝突が発生すると、そのデータメッセージの受信は失敗となり、再送信が必要となる。データメッセージ群の無線マルチホップ配送において、転送データメッセージの衝突が中継無線ノードで頻繁に発生すると配送遅延の延長やスループットの低下を招くこととなる。異なる無線マルチホップ配送経路に含まれる無線ノード間で発生する転送データメッセージの衝突を回避する方法として、あらかじめ衝突が発生し難い配送経路を探索、検出する方法が提案されている [1], [4]。しかし、衝突を回避する無線マルチホップ配送経路の選択は、経路長の延長や経路検出率の低下を招きやすい。また、異なる無線マルチホップ配送経路に含まれる無線ノード間で実際に転送データメッセージの衝突が発生するか否かは、データメッセージの転送頻度や転送タイミングに依存し、あらかじめ衝突発生頻度を予測することは困難である。

そこで、本論文では、AODV [3] 等のルーティングテーブルを用いたオンデマンド型アドホックルーティングプロトコルによって検出された無線マルチホップ配送経路を対象とし、転送データメッセージの衝突発生頻度が閾値を超えることを検出した中継無線ノードが近接する他の無線マルチホップ配送経路に含まれる隣接中継無線ノードとの衝突を回避するために、中継無線ノード変更による経路分離アルゴリズム、あるいは、中継無線ノード追加による経路分離アルゴリズムを適用することで経路を修正する手法を提案する。また、適切な隣接無線ノードが存在していないか経路が互いに交差しているためにこれらのアルゴリズムによって経路を分離することができない場合にはこれらの経路を合流させ、ネットワークコーディングを用いて配送経路の延長とスループットの低下を低減する手法を提案

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、競合を削減、回避する手法とが提案されている。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  $N_i$  は、前ホップ無線ノード  $N_{i-1}$  から受信したデータメッセージを次ホップ無線ノード  $N_{i+1}$  へ転送する。したがって、 $N_i$  は  $N_{i-1}$  の無線信号到達範囲に含まれ、 $N_i$  の無線信号到達範囲には  $N_{i+1}$  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、 $N_i$  の無線信号到達範囲には  $N_{i-1}$  を含み、 $N_i$  は  $N_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれる。すなわち、 $N_i$  は  $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれることとなり、 $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  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  $N_i$  における衝突によって無線通信リンク  $[N_{i-1}, N_i]$  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  $N_i$  における衝突は回避可能となるものの、 $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  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配送遅延は延長し、スループットは低下する。RTS/CTS制御のオーバーヘッドによる配送性能低下を縮小するための手法として MARCH [6] がある。

本論文では、各無線ノードが無線信号送信電力を制御することが可能であること、各無線ノードが無線信号受信電力を観測し、この無線信号の送信電力が既知であるならば、送信無線ノードを無線信号到達範囲に含む最小電力を算出可能であることを前提とする。受信無線ノードにおける受信電力は、送信無線ノードにおける無線信号送信電力が一定である場合には、その間の距離の 2-4 乗に反比例する。これに基づいて、無線信号送信電力を既知もしくは一定として、GPS 等の位置情報取得デバイスを持たない無線ノードが測定した受信電力から隣接無線ノードまでの距離を推定する方法が多数提案されている [7]。また、無線ノード間の距離が一定である場合には、受信電力は送信電力に比例する。したがって、無線信号送信電力  $P_s$  を既知もしくは一定とするならば、測定した受信電力  $P_r$  から、送信無線ノードを無線信号到達範囲に含む最小送信電力  $P_{min}$  が以下によって算出できる。

$$P_{min} = P_{req} P_s / P_r$$

ただし、 $P_{req}$  は受信無線ノードにおいて必要な最小受信電

力である。これを用いた単一マルチホップ配送経路内の衝突、競合回避手法として RH2SWL[5] が提案されている。ここでは、各中継無線ノードは次ホップ中継無線ノードが受信するのに必要な最小電力で無線信号を送信するものとして、ホップごとに順次短縮する無線リンク列からなる無線マルチホップ配送経路を用いる。これによって、各中継無線ノードが前ホップ中継無線ノードの無線信号到達範囲に含まれる一方、次ホップ中継無線ノードの無線信号到達範囲には含まれないようにして経路内の隠れ端末問題を解消している。

一方、データメッセージ群の配送要求発生頻度が高い場合には、アドホックネットワーク内に複数の無線マルチホップ配送経路が同時に存在する。互いに近接する無線マルチホップ配送経路においては、ある無線マルチホップ配送経路における中継無線ノードの転送メッセージが他の無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードにおける衝突が発生することが考えられる。論文 [1], [4] では、オンデマンド型アドホックルーティングプロトコルを用いた無線マルチホップ配送経路探索において、各無線ノードが既に含まれている無線マルチホップ配送経路数や各無線ノードを無線信号到達範囲に含む既に存在する無線マルチホップ配送経路の中継無線ノード数を指標として各無線ノードを評価し、同一無線ノードや隣接無線ノードを中継無線ノードとして含む近接無線マルチホップ経路数が少なくなるような無線マルチホップ配送経路を検出、選択する手法を提案している。しかし、新たに検出、選択される経路は既存の経路と近接することを回避することとなり、配送経路長の拡大による配送遅延の延長やスループットの低下が問題となる。特に、近接する配送経路間の衝突発生頻度は、近接する中継無線ノードにおけるデータメッセージ転送頻度と転送タイミングに依存することから、あらかじめ衝突発生を回避する迂回経路を用いる手法を適用した場合、衝突回避の効果が低く、配送性能の低下を招くのみ結果となることが考えられる。

### 3. 提案手法

#### 3.1 近接配送経路の修正による衝突回避

2章で述べたように、互いに無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードを中継無線ノードとする近接無線マルチホップ配送経路の発生を回避するように配送経路を検出、選択する従来手法では、配送経路長の拡大による配送遅延の延長が問題となる。特に、データメッセージ配送要求発生頻度が低い場合には、配送経路の近接を原因として発生する衝突、競合の頻度が必ずしも高くないことから、無用な配送経路長の拡大が配送性能の低下の原因となる。そこで、本論文では、AODV等のアドホックルーティングプロトコルで検出した配送経路を用いてデータメッセージ群の配送を行ない、異なる配送経路間の衝突、競合があら

じめ定められた閾値以上の頻度で発生する場合にのみ配送経路を局所的に修正することで配送経路の近接を解消し、データメッセージの配送遅延の延長を回避、縮小する手法を提案する。

2つの無線マルチホップ配送経路  $R^i = |N_0^i \dots N_n^i|$  と  $R^j = |N_0^j \dots N_m^j|$  の中継無線ノード  $N_p^i \in R^i$  と  $N_q^j \in R^j$  が互いに隣接無線ノードであるか同一の無線ノードであるとき、 $R^i$  と  $R^j$  は互いに近接無線マルチホップ配送経路である。このとき、 $R^i$  と  $R^j$  は互いに並行である(図1)か互いに交差する(図2)かのいずれかである。なお、 $N_p^i$  と  $N_q^j$  が同一の無線ノードであるとき、 $R^i$  と  $R^j$  はこの無線ノードで合流する。

[近接無線マルチホップ配送経路]

- ・ 中継無線ノード  $N_p^i \in R^i$  と  $N_q^j \in R^j$  とが互いに隣接無線ノードであり、前ホップ無線ノードと次ホップ無線ノード  $N_{p-1}^i$  と  $N_{p+1}^i$  および  $N_{q-1}^j$  と  $N_{q+1}^j$  が互いに同じ側にある(線分  $N_{p-1}^i N_{p+1}^i$  と線分  $N_{q-1}^j N_{q+1}^j$  が交わらない)ならば、 $R^i$  と  $R^j$  は  $N_p^i$  と  $N_q^j$  において(局所的に)並行である。
- ・ 中継無線ノード  $N_p^i \in R^i$  と  $N_q^j \in R^j$  とが互いに隣接無線ノードであり、前ホップ無線ノードと次ホップ無線ノード  $N_{p-1}^i$  と  $N_{p+1}^i$  および  $N_{q-1}^j$  と  $N_{q+1}^j$  が互いに反対側にある(線分  $N_{p-1}^i N_{p+1}^i$  と線分  $N_{q-1}^j N_{q+1}^j$  が交わる)ならば、 $R^i$  と  $R^j$  は  $N_p^i$  と  $N_q^j$  において(局所的に)交差する、という。□

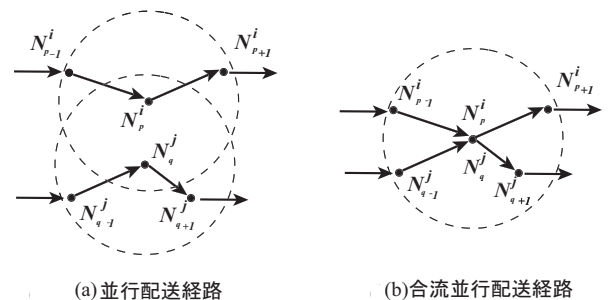


図1 互いに並行な配送経路

本論文では、各無線ノードにはGPS等の位置情報取得デバイスが備えられていないものとする。また、2章で述べたように、無線信号送受信電力の関係は既知であり、送信電力から受信電力を得ること、受信電力から送信電力を得ることは可能であるとする。各中継無線ノードは、Helloメッセージの交換等によってすべての隣接無線ノードを把握しているものとする。また、Helloメッセージを定められた最大送信電力で送信することによって、各無線ノードは、隣接無線ノードへ到達可能な最小送信電力を取得し

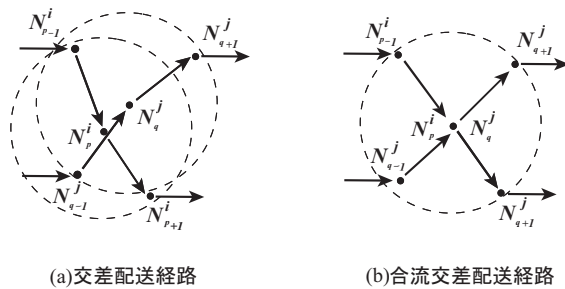


図 2 互いに交差する配送経路

ているものとする<sup>\*1</sup>。さらに、自身の含まれる無線マルチホップ配送経路のそれぞれについて、前ホップ隣接無線ノードと次ホップ隣接無線ノードを把握しているものとする。各中継無線ノード  $N$  は、すべての次ホップ隣接無線ノードに到達可能な最小電力で無線信号を送信する。この送信電力を  $N$  の現送信電力とよぶ。いずれの配送経路にも含まれない無線ノードの現送信電力は、最大送信電力であるとする。各無線ノードは、経路探索プロトコルにおける制御メッセージ送信、データメッセージ配送における次ホップ無線ノードへのデータメッセージ転送のいずれにおいても現送信電力を用いるものとする。

このような前提のもとでは、各中継無線ノードが隣接無線ノードとの間の配送経路間衝突、競合の発生頻度を測定することで、近接配送経路が存在し、衝突、競合の回避が必要であることが検出できる。ただし、近接経路が互いに並行であるか交差しているのかを区別することはできない。そこで、本論文では、まず、配送経路間の衝突、競合発生頻度が閾値以上であることを検出した中継無線ノードが局所的に配送経路を修正することにより、配送経路の近接を解消する経路分離アルゴリズムを適用する手法を提案する(図3)。ここでは、中継無線ノードを変更することによる経路分離アルゴリズムと中継無線ノードを追加して無線信号到達範囲を縮小することによる経路分離アルゴリズムを順に適用する。これらの適用により、適切な代替中継無線ノードあるいは追加中継無線ノードが検出された場合には、並行配送経路が互いに分離され、衝突、競合の発生を回避することができる。ただし、配送経路の交差は経路分離アルゴリズムによって解消することはできない。すなわち、配送経路が互いに交差する場合には、経路分離アルゴリズムによる代替中継無線ノードおよび追加中継無線ノードの検出に失敗する。そこで、互いに交差する配送経路を必要に応じて合流させ、ネットワークコーディング [8] を

\*1 隣接無線ノードと最小送信電力は、配送経路構築時や配送経路修正時にオンデマンドで取得することも可能である。この場合、Hello メッセージによる通信オーバーヘッドが回避される一方、経路構築と経路修正に通信オーバーヘッドを要する。

適用する手法を提案する。ここでは、無線信号のブロードキャスト性を利用することによって、交差する近接配送経路がひとつの中継無線ノードのみを共有する場合にも適用することが可能となり得る配送プロトコルを構成する。

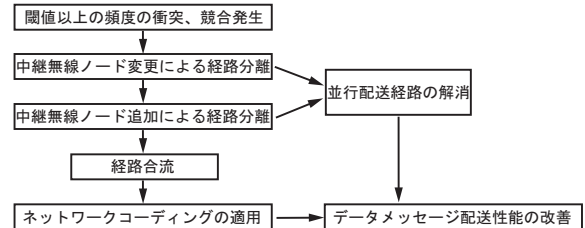


図 3 提案手法

### 3.2 中継無線ノード変更による経路分離

2つの無線マルチホップ配送経路  $R^i = |N_0^i \dots N_n^i|$  と  $R^j = |N_0^j \dots N_m^j|$  の中継無線ノード  $N_p^i \in R^i$  と  $N_q^j \in R^j$  が互いに隣接無線ノードであるか同一の無線ノードであり、定められた閾値以上の衝突、競合の発生頻度を  $N_p^i$  が検出したならば、 $R^i$  の中継無線ノードを  $N_p^i$  から  $N_q^j$  の無線信号到達範囲に含まれない無線ノード  $N_p^{i'}$  へと変更することによって、 $R^i$  と  $R^j$  とを分離する(図4)。このとき、 $N_p^{i'}$  は以下の条件を満足しなければならない。

- $N_p^{i'}$  は  $N_{p-1}^i$  の隣接無線ノードである。
- $N_{p+1}^i$  は  $N_p^{i'}$  の隣接無線ノードである。
- $N_p^{i'}$  は  $N_q^j$  の隣接無線ノードではない。

上記の条件を満足する無線ノードは、 $N_{p-1}^i$ 、 $N_{p+1}^i$ 、 $N_q^j$  の隣接無線ノード情報から決定することが可能である。そこで、これらに隣接する  $N_p^{i'}$  が隣接無線ノード情報を取得することによって、自身の代替中継無線ノードを探索する。

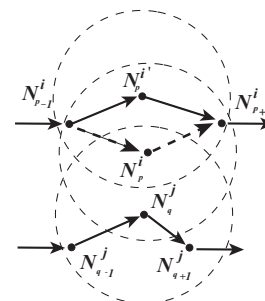


図 4  $N_p^i$  の変更による経路分離

#### [中継無線ノード変更による経路分離アルゴリズム]

- 1)  $N_p^i$  は、 $N_{p-1}^i$ 、 $N_{p+1}^i$ 、 $N_q^j$  へ隣接無線ノード要求メッセージ  $Neireq$  を送信する。

- 2)  $N_p^i$  から送信された  $Neireq$  メッセージを受信した  $N_{p-1}^i$  は、 $N_p^i$  以外のすべての次ホップ無線ノードへ無線信号が到達可能な最小送信電力 (次ホップ無線ノードが  $N_p^i$  のみの場合には最大送信電力) で無線信号が到達可能な隣接無線ノード情報を含む隣接無線ノード応答メッセージ  $Neirep$  を  $N_p^i$  へ送信する。
- 3)  $N_p^i$  から送信された  $Neireq$  メッセージを受信した  $N_{p+1}^i$  は、最大送信電力で無線信号が到達可能な隣接無線ノード情報を含む  $Neirep$  メッセージを  $N_p^i$  へ送信する。
- 4)  $N_p^i$  から送信された  $Neireq$  メッセージを受信した  $N_q^j$  は、現送信電力で無線信号が到達可能な隣接無線ノード情報を含む  $Neirep$  メッセージを  $N_p^i$  へ送信する。
- 5)  $N_{p-1}^i$ 、 $N_{p+1}^i$ 、 $N_q^j$  からの  $Neirep$  メッセージを受信した  $N_p^i$  は、 $N_{p-1}^i$  と  $N_{p+1}^i$  から受信した  $Neirep$  メッセージに含まれる隣接無線ノード情報に含まれ、 $N_q^j$  から受信した  $Neirep$  メッセージに含まれない隣接無線ノードを代替中継無線ノード候補とする。 $N_p^i$  は、いずれかの代替中継無線ノード候補から中継無線ノード代替肯定メッセージ  $Delack$  を受信するか、すべての代替中継無線ノード候補から中継無線ノード代替否定メッセージ  $Delnack$  を受信するまで各代替中継無線ノード候補  $N^c$  に対して以下を行なう。
  - 5-1)  $N_p^i$  は、 $N^c$  へ中継無線ノード代替要求メッセージ  $Delreq(N_{p-1}^i, N_{p+1}^i)$  を送信する。
  - 5-2)  $N_p^i$  から送信された  $Delreq$  メッセージを受信した  $N^c$  は、現送信電力で  $N_{p+1}^i$  へ無線信号が到達可能であるならば、 $Delack$  メッセージを  $N_p^i$  へ送信する。このとき、 $N^c$  は、 $N_{p-1}^i$  を前ホップ隣接無線ノード、 $N_{p+1}^i$  を次ホップ隣接無線ノードとしてルーティングテーブルに登録する。また、 $N^c$  が  $R^i$  のみの中継無線ノードである場合には、 $N_{p+1}^i$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力を現送信電力とする。なお、現送信電力で  $N_{p+1}^i$  へ無線信号が到達できない場合には、 $Delnack$  メッセージを  $N_p^i$  へ送信する。
- 6)  $N^c$  から送信された  $Delack$  メッセージを受信した  $N_p^i$  は、中継無線ノード代替通知メッセージ  $Delnot(N^c)$  を  $N_{p-1}^i$  と  $N_{p+1}^i$  へ送信する。
- 7)  $N_p^i$  から  $Delnot$  メッセージを受信した  $N_{p-1}^i$  と  $N_{p+1}^i$  は、それぞれの次ホップ隣接無線ノードと前ホップ隣接無線ノードを  $N_p^i$  から  $N^c$  へ変更する。□

$N_p^i$  の変更による  $R^i$  と  $R^j$  の分離が失敗した場合、すなわち、 $N_p^i$  がすべての代替中継無線ノード候補から  $Delnack$  メッセージを受信した場合には、 $N_q^j$  の変更による  $R^i$  と  $R^j$  の分離を試みる (図 5)。このため  $N_p^i$  は  $N_q^j$  へ経路分離要求メッセージ  $RTSepreq$  を送信する。これを受信した  $N_q^j$  は上記のアルゴリズムを適用する。本アルゴリズムは、

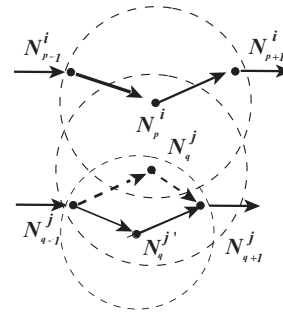


図 5  $N_q^j$  の変更による経路分離

$R^i$  と  $R^j$  が並行配送経路であり、代替中継無線ノードとなる無線ノードが適切な位置に存在する場合に配送経路長を延長することなく、配送経路を分離することができる。

### 3.3 中継無線ノード追加による経路分離

前節で述べた中継ノード変更による経路分離が  $N_q^j$  においても失敗した場合には、 $N_q^j$  と  $N_{q+1}^j$  との間に  $R^j$  の中継無線ノード  $N_q^{j'}$  を追加する。 $N_q^j$  から  $N_q^{j'}$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力が  $N_p^i$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力よりも小さいならば  $R^i$  と  $R^j$  は分離され、 $N_p^i$  における  $N_q^j$  との衝突、競合は回避される (図 6)。このとき、 $N_q^{j'}$  は以下の条件を満足しなければならない。

- $N_p^i$  は  $N_q^j$  の隣接無線ノードではない。
- $N_q^{j'}$  は  $N_q^j$  の隣接無線ノードである。
- $N_{q+1}^j$  は  $N_q^{j'}$  の隣接無線ノードである。
- $N_p^i$  は  $N_q^{j'}$  の隣接無線ノードではない。

最初の 2 つの条件から、 $N_q^j$  から  $N_q^{j'}$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力は  $N_p^i$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力よりも小さくなければならない。また、最後の 2 つの条件から、 $N_q^{j'}$  から  $N_{q+1}^j$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力は  $N_p^i$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力よりも小さくなければならない。したがって、すべての条件を満足する  $N_q^{j'}$  は、 $N_q^j$  の隣接無線ノード情報および  $N_{q+1}^j$  の候補となる  $N_q^j$  の隣接無線ノードの隣接無線ノード情報から決定する。

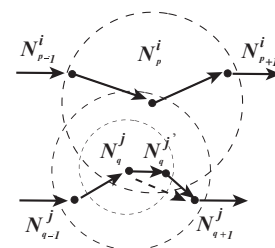


図 6  $N_q^{j'}$  の追加による経路分離

[中継無線ノード追加による経路分離アルゴリズム]

1)  $N_q^j$  は、無線信号が到達可能な最小送信電力が  $N_p^i$  よりも小さい隣接無線ノードを追加中継無線ノード候補とする。 $N_q^j$  は、いずれかの追加中継無線ノード候補から中継無線ノード追加肯定メッセージ *Joinack* を受信するか、すべての追加中継無線ノード候補から中継無線ノード追加否定メッセージ *Joinnack* を受信するまで、各追加中継無線ノード候補  $N^c$  に対して以下を行なう。

1-1)  $N_q^j$  は、 $N^c$  へ中継無線ノード追加要求メッセージ *Joinreq*( $N_p^i, N_{q+1}^j$ ) を送信する。

1-2)  $N_q^j$  から送信された *Joinreq* メッセージを受信した  $N^c$  は、自身の隣接無線ノード情報から以下のいずれかを行なう。

1-2-1)  $N_{q+1}^j$  が隣接無線ノードでないならば、 $N_q^j$  へ *Joinnack* メッセージを送信する。

1-2-2)  $N_{q+1}^j$  が隣接無線ノードであり、 $N_p^i$  が隣接無線ノードでないならば、 $N_q^j$  を前ホップ隣接無線ノード、 $N_{q+1}^j$  を次ホップ隣接無線ノードとしてルーティングテーブルに登録し、 $N_{q+1}^j$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力を現送信電力とする。そして、 $N_q^j$  へ *Joinack* メッセージを送信する。

1-2-3)  $N_{q+1}^j$  と  $N_p^i$  がともに隣接無線ノードであり、 $N_{q+1}^j$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力が  $N_p^i$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力よりも小さい場合には、 $N_q^j$  を前ホップ隣接無線ノード、 $N_{q+1}^j$  を次ホップ隣接無線ノードとしてルーティングテーブルに登録し、 $N_{q+1}^j$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力を現送信電力とするとともに  $N_q^j$  へ *Joinack* メッセージを送信する。

1-2-4)  $N_{q+1}^j$  と  $N_p^i$  がともに隣接無線ノードであり、 $N_{q+1}^j$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力が  $N_p^i$  へ無線信号が到達可能な最小送信電力よりも大きい場合には、 $N_q^j$  へ *Joinnack* メッセージを送信する。

2)  $N^c$  から *Joinack* メッセージを受信した  $N_q^j$  は、次ホップ隣接無線ノードを  $N^c$  とし、中継無線ノード追加通知メッセージ *Joinnot*( $N^c$ ) を  $N_{q+1}^j$  へ送信する。

3)  $N_q^j$  から *Joinnot* メッセージを受信した  $N_{q+1}^j$  は、 $N^c$  を前ホップ隣接無線ノードとしてルーティングテーブルに登録する。□

本アルゴリズムは、 $R^i$  と  $R^j$  が並行配送経路であり、追加中継無線ノードとなる無線ノードが適切な位置に存在する場合に、配送経路長を1ホップ延長して配送経路を分離することができる。

### 3.4 経路合流とネットワークコーディング

前節のアルゴリズムを適用しても代替中継無線ノードおよび追加中継無線ノードを検出することができない並行配

送経路の場合、および、配送経路が交差している場合には、経路分離による衝突、競合回避を実現することはできない。このとき、競合によって  $N_p^i$  と  $N_q^j$  が同時に次ホップ隣接無線ノードへデータメッセージを転送することはできない。さらに、 $N_p^i$  が  $N_{q-1}^j$  の無線信号到達範囲に含まれるか、もしくは、 $N_q^j$  が  $N_{p-1}^i$  の無線信号到達範囲に含まれるならば、 $N_p^i$  と  $N_q^j$  は同時に前ホップ隣接無線ノードが転送するデータメッセージを受信することができない。このとき、 $N_p^i$  と  $N_q^j$  で近接する2つの配送経路  $R^i$  と  $R^j$  をひとつの中継無線ノード  $X$  で合流させても衝突、競合発生観点からは性能は低下しない(図7)。

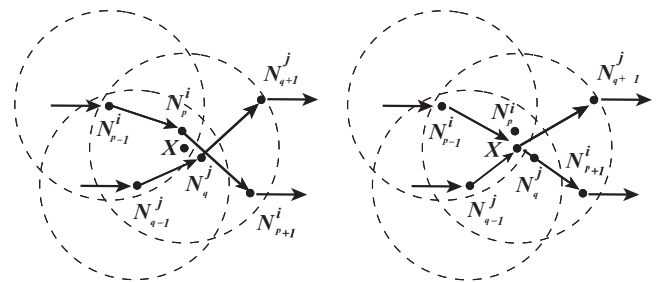


図7 Xにおける経路の合流

ここで、 $N_{p-1}^i$  と  $N_{q+1}^j$  が同一無線ノードであり、 $N_{p+1}^i$  と  $N_{q-1}^j$  が同一無線ノードであるならば、ネットワークコーディングによって配送遅延を短縮することができる[8](図8)。 $X$  へデータメッセージ  $m^i$  と  $m^j$  を転送する  $N_{p-1}^i$  と  $N_{q-1}^j$  は、これらのメッセージの複製を保持する。 $m^i$  と  $m^j$  を受信した  $X$  は、エンコーダ  $E$  によって得られたデータメッセージ  $m' := E(m^i, m^j)$  をブロードキャスト送信する。 $m'$  を受信した  $N_{p+1}^i$  と  $N_{q+1}^j$  は、受信した  $m'$  とそれぞれが保持していた  $m^j$ 、 $m^i$  からデコーダ  $D$  によって  $m^i = D(m', m^j)$ 、 $m^j = D(m', m^i)$  を得る。 $X$  から次ホップ隣接無線ノードへの転送をひとつのブロードキャスト送信で行なうことによって、 $m^i$  と  $m^j$  の配送遅延を短縮することができる。

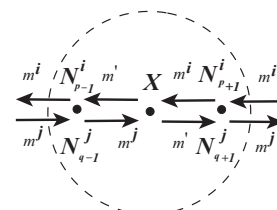


図8 Xにおけるネットワークコーディング(1)

一方、無線通信がブロードキャストを基礎としていることから  $N_{p-1}^i$  と  $N_{q+1}^j$  および  $N_{p+1}^i$  と  $N_{q-1}^j$  が同一無線ノードでなく、互いに隣接無線ノードである場合においてもネットワークコーディングによって配送遅延を短縮することができる(図9)。ここでは、 $N_{p-1}^i$  と  $N_{q-1}^j$  が  $X$  へ転送したデータメッセージ  $m^i$  と  $m^j$  は、隣接無線ノードである  $N_{q+1}^j$  と  $N_{p+1}^i$  へもそれぞれ到達する。そこで、 $N_{p+1}^i$  と  $N_{q+1}^j$  は、受信した  $m^j$  と  $m^i$  をそれぞれ保持する。 $m^i$  と  $m^j$  を受信した  $X$  は、エンコーダ  $E$  によって得られたデータメッセージ  $m' := E(m^i, m^j)$  をブロードキャスト送信する。 $m'$  を受信した  $N_{p+1}^i$  と  $N_{q+1}^j$  は、受信した  $m'$  とそれぞれが保持していた  $m^j$ 、 $m^i$  からデコーダ  $D$  によって  $m^i = D(m', m^j)$ 、 $m^j = D(m', m^i)$  を得る。ここでも  $X$  から次ホップ隣接無線ノードへの転送をひとつのブロードキャスト送信で行なうことによって、 $m^i$  と  $m^j$  の配送遅延を短縮することができる。特に、 $R^i$  と  $R^j$  が交差する場合には本手法の適用条件を充足する可能性が比較的高く、配送経路間の衝突、競合による性能低下を低減する効果が期待できる。

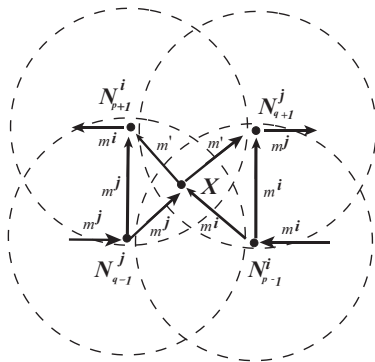


図9 Xにおけるネットワークコーディング(2)

#### 4. 評価

本章では、互いに交差する無線マルチホップ配送経路間において、3章で提案したネットワークコーディング手法が適用可能となる場合がどれだけ存在するかをシミュレーション実験によって評価する。1,000m × 1,000mの領域に無線信号到達距離が100mである無線ノード50-500台を一樣分布乱数を用いてランダムに配置する。ここで、ランダムに選択された10-50対の送信元無線ノードと送信先無線ノードに対して、無線マルチホップ配送経路をAODVにより探索する。このとき、互いに交差する無線マルチホップ配送経路対に対して、論文[8]によるネットワークコーディングが適用可能である確率、合流交差経路に前章で提案したネットワークコーディングが適用可能である確率、合流しない交差経路を合流させる手法をも適用する場合におけるネットワークコーディングが適用可能である確

率を評価する。評価結果を図10に示す。

従来のネットワークコーディング適用手法では、交差経路  $R^i = |N_0^i \dots N_n^i|$  と  $R^j = |N_0^j \dots N_m^j|$  について、 $N_{s-1}^i = N_{t+1}^j$ 、 $N_s^i = N_t^j$ 、 $N_{s+1}^i = N_{t-1}^j$  を満足する無線ノード列が存在する場合にのみネットワークコーディングが適用可能である。このため、適用可能確率は極めて低い値となっている。これに対して、無線信号のブロードキャスト性に注目した提案手法では、 $N_s^i = N_t^j$  なる合流中継無線ノードが存在すれば、 $N_{s-1}^i$  および  $N_{t-1}^j$  の無線信号到達範囲内に  $N_{t+1}^j$  および  $N_{s+1}^i$  がそれぞれ含まれればネットワークコーディングが適用可能である。このため、図10に示すように10-30%という従来手法に比べて高い適用率が得られている。この適用確率は、経路数には依存しない一方、無線ノードの配置密度に対して大きく変動する。無線ノード配置密度が低い場合には、合流中継無線ノードが存在する場合であっても交差経路の前後ホップ無線ノードが無線信号到達範囲に含まれないことが多いために適用確率が低くなっている。一方、高密度に無線ノードが配置されている場合には、交差経路が合流する機会が減少するためにネットワークコーディングが適用できない。この結果、無線ノード数150台のときに最大の適用確率が得られる結果となっている。このため、合流しない交差経路を合流中継ノードを含むように経路修正した後にネットワークコーディングを適用する提案手法の効果は、無線ノードが高密度に分布する場合に大きく現れている。この結果、無線ノード数が100台以上の場合には、ほぼ一定で25-30%の確率でネットワークコーディングが適用可能となった。なお、無線ノード数50台の場合には、合流させることによって前後ホップ無線ノードの隣接関係を改善することができないために、適用確率がほぼ同等という結果となっている。

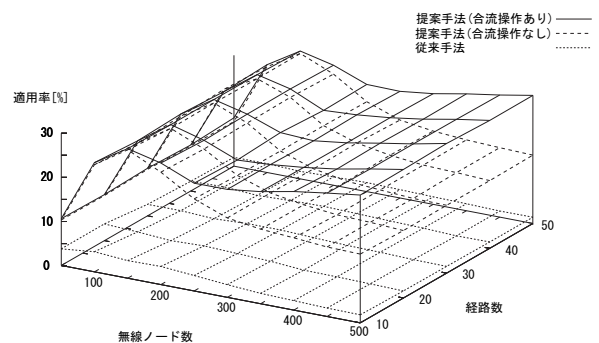


図10 ネットワークコーディング適用確率

#### 5. まとめ

本論文では、無線マルチホップネットワークにおける異なる配送経路間で発生する衝突、競合による配送遅延の延長の問題を局所的な経路変更による経路分離とネットワー

クコーディングの適用によって解消、低減する手法を提案した。配送経路間に発生する衝突、競合は、データメッセージ配送要求発生頻度に依存することから、あらかじめ衝突、競合を回避する経路を探索する従来手法に対して、衝突、競合の発生頻度に基づいて動的に経路を変更する提案手法は、配送経路長短縮の観点から優位であることが見込まれる。近接配送経路の関係には、並行と交差があることを示し、並行経路を分離することで経路間衝突、競合を回避する2つのアルゴリズムを提案した。また、局所的な経路変更では分離できない交差経路については、経路を合流させてネットワークコーディングを適用することによって配送遅延の延長を低減する手法を提案した。合流中継無線ノードへ転送されるデータメッセージを傍受する手法によって、従来手法では極めて低い適用可能確率を25%程度まで改善することをシミュレーション実験によって示した。今後は、合流のための経路修正手順を構成し、提案手法の適用によるデータメッセージ配送性能の改善効果を実験評価する。

#### 参考文献

- [1] Abolhasan, M., Lipman, J. and Wysocki, T.A., "Load-Balanced Route Discovery for Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the 3rd International Workshop on the Internet, Telecommunications and Signal Processing (2004).
- [2] Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley (2000).
- [3] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC 3561 (2003).
- [4] Hassanein, H. and Zhou, A., "Routing with Load Balancing in Wireless Ad Hoc Networks," Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, pp. 89-96 (2001).
- [5] Higaki, H., "Ad-Hoc Routing with Transmission Power Control for Avoidance of Hidden Terminal Problem," Proceedings of the 7th IEEE International Information and Telecommunication Technologies Symposium, pp. 73-80 (2008).
- [6] Toh, C.K., Vassiliou, V., Guichal, G. and Shih, C.H., "MARCH: A Medium Access Control Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks," Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, pp. 512-516 (2000).
- [7] 高島, 趙, 柳原, 福井, 福永, 原, 北山, "センサネットワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定," 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-B, No. 5, pp. 742-750 (2006).
- [8] 原田, 宮本, 三瓶, "マルチホップ無線ネットワークにおける双方向トラヒックのネットワークコーディング適用による伝送特性の改善効果に関する検討," 信学技報, Vol. 106, No. 420, pp. 7-12 (2006).