

# 無線ノード移動による無線マルチホップネットワークの接続性改善手法

伊佐野 皓士<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、異なる無線マルチホップ配送経路に含まれる中継移動無線ノードによるデータメッセージ転送が衝突を発生させる経路間衝突による配送遅延の延長が問題となる。これを回避するために、異なる無線マルチホップ配送経路に含まれる中継移動無線ノードは互いに無線信号到達範囲に含まれない無線信号独立な経路を用いる方法が提案されている。しかし、既存の無線マルチホップ配送経路のいずれかの中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれる無線ノードをすべて新たな経路の中継移動無線ノードの候補から外す手法では、経路検出成功率の低下を招く問題がある。本論文では、このような無線ノードをすべての中継移動無線ノードの無線信号到達範囲外へと移動することによって、経路検出率の低下を回避する手法を提案する。また、移動による経路検出率改善効果の高い無線ノードを移動させる手法として、湾曲する無線マルチホップ配送経路の外側に位置する無線ノードを内側に位置する無線ノードよりも優先して移動させる手法を提案する。

## 1. はじめに

移動無線ノードから構成される無線マルチホップネットワークでは、送信元移動無線ノードから送信先移動無線ノードまでのデータメッセージ配送を中継無線ノードによる転送の列によって実現する。各中継無線ノードにおいては、IEEE802.11, Bluetooth, ZigBee といった無線 LAN プロトコルによって次ホップ隣接移動無線ノードへのデータメッセージ転送を実現する。ここで、無線通信が信号強度が送信無線ノードからの距離に対して減衰するブロードキャストを基礎とすることから、晒し端末問題、隠れ端末問題による衝突が発生し、データメッセージが紛失する可能性がある。そこで、受信確認メッセージによる応答と再送信機構および RTS/CTS などによって衝突からの回復や衝突回避の機能が実現されているが、配送遅延が延長する問題がある [1]。無線マルチホップネットワークにおいて、データメッセージの衝突を回避する手法として、ルーティングの工夫によって問題解決を試みるものが多数提案されている [2]。ここでは、複数の無線マルチホップ配送経路が互いに干渉しない、すなわち、各無線マルチホップ配送経路の中継移動無線ノードが他の無線マルチホップ配送経路の中継移動無線ノードを無線信号到達範囲に含まないようにすることによって、衝突および衝突回避による配送遅延延長の問題を解決している。ただし、複数無線マルチホップ配送経路が並行してデータメッセージ配送に用いられることによって、新たに開始される無線マルチホップ配送のための経路に中継移動無線ノードとして含むことのできる移動無線ノード数が減少することから、経路検出確率、すなわち、送信元無線ノードと送信先無線ノードを無線マルチホップ配送経路で接続できる確率が低下する問題がある。本論文では、この接続性低下を緩和する手法を提案する。

## 2. 関連研究

互いに無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノード間でデータメッセージを交換する無線ネットワークにおいては、送信無線ノードから受信無線ノードへとデータメッセージがブロードキャスト送信される無線信号によって伝達される。このため、送信無線ノードの無線信号到達範囲に含まれるすべての無線ノードにおいて受信データメッセージの衝突が発生する可能性がある。IEEE802.11, Bluetooth, ZigBee 等の無線 LAN プロトコルでは、受信無線ノードにおける衝突から回復するために、受信確認メッセージの返送とデータメッセージ再送信の機構を導入している。これによって、データメッセージの到達性は向上するが、再衝突の発生確率を低減するためのバックオフ時間の調整により、再送信されたデータメッセージの配送遅延が延長する。そこで、特に隠れ端末問題による受信データメッセージの衝突を回避あるいは削減する手法として RTS/CTS 制御が導入されているが、データメッセージ配送に先立つ制御メッセージ交換のオーバーヘッド、衝突回避のための送信待ち状態の導入による配送遅延の延長が避けられない。無線マルチホップネットワークにおいては、受信データメッセージの衝突を同一無線マルチホップ配送経路に含まれる移動無線ノードが送信したデータメッセージによって発生する経路内衝突と異なる無線マルチホップ配送経路に含まれる移動無線ノードが送信したデータメッセージによって発生する経路間衝突とに分類できる (図 1)。

経路内衝突においては、配送されるデータメッセージを各中継移動無線ノードが次ホップ中継移動無線ノードへと転送できるためには、次ホップ中継移動無線ノードを無線信号到達範囲に含むことが必要であることから、衝突および衝突回避による配送遅延を短縮する手法は、データメッセージの送信タイミングの制御とそれにとまなう制御メッセージ交換の削減が中心となる [3]。すなわち、無線マルチホップ配送経路  $R := \{N_0 \dots N_n\}$  において、次ホップ移

<sup>1</sup> 東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科  
<sup>a)</sup> isano@higlab.net  
<sup>b)</sup> hig@higlab.net

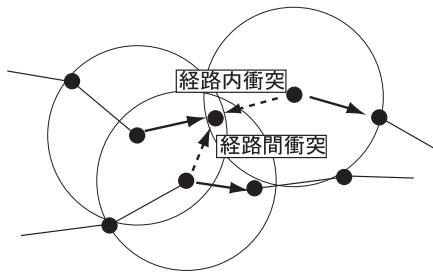


図 1 経路内衝突と経路間衝突.

動無線ノード  $N_{i+1}$  は中継無線ノード  $N_i$  の無線信号到達範囲に含まれることが必要であり、無線信号到達範囲の大きさがすべての中継移動無線ノードにおいて同一であるならば、前ホップ移動無線ノード  $N_{i-1}$  も  $N_i$  の無線信号到達範囲に含まれる。これによって、 $N_i$  においては、 $N_{i-1}$  が  $N_i$  へ送信するデータメッセージと  $N_{i+1}$  が  $N_{i+2}$  へ送信するデータメッセージとが  $N_i$  において衝突する可能性があり、この可能性を考慮した転送タイミングを設定することで配送遅延の短縮を目指している。なお、RH2SWL [6] においては、各中継移動無線ノードの無線信号到達範囲が調整可能であることを前提として、 $N_{i+1}$  が  $N_i$  の無線信号到達範囲に含まれる一方で  $N_{i-1}$  が  $N_i$  の無線信号到達範囲に含まれないような経路を探索、検出することによって隠れ端末問題による衝突を回避している。

一方、経路間衝突は、異なる経路に含まれる中継移動無線ノードが送信したデータメッセージによって発生する衝突である。無線マルチホップ配送経路  $\mathcal{R} := \{N_0 \dots N_n\}$  および  $\mathcal{R}' := \{N'_0 \dots N'_n\}$  において  $N_i \in \mathcal{R}$  と  $N'_i \in \mathcal{R}'$  とが互いに無線信号到達範囲に含まれるならば、 $N_i$  では  $N'_i$  が  $N'_{i+1}$  へと転送したデータメッセージと  $N_{i-1}$  が  $N_i$  へと転送したデータメッセージとが衝突する可能性があり、 $N'_i$  では  $N_i$  が  $N_{i+1}$  へと転送したデータメッセージと  $N'_{i-1}$  が  $N'_i$  へと転送したデータメッセージとが衝突する可能性がある。このような衝突およびこれを回避することによる配送遅延の延長の問題に対しては、無線マルチホップ配送経路が互いに無線信号独立 [5] とすることによって解決される。ここでは、AODV [7] や DSR [3] といったオンデマンド型のルーティングプロトコルが対象となる。すなわち、送信元移動無線ノードにおけるデータメッセージ配送要求に基づいて送信先移動無線ノードへの無線マルチホップ配送経路が探索、検出され、データメッセージ群がこの経路に沿って無線マルチホップ配送される。データメッセージ群のすべての配送が終了すると、この無線マルチホップ配送経路は不使用となる。新たに探索される無線マルチホップ配送経路は、現在データメッセージ群の配送に用いられている無線マルチホップ配送経路の中継移動無線ノードを無線信号到達範囲に含まない移動無線ノードのみによって構成されるものとする。これを実現するために [1] では、現在データメッセージ群の配送に用いられている無線マルチホップ配送経路のいずれかの中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれる移動無線ノードは経路探索プロトコルに参加せず、したがって、新たに探索される無線マルチホップ配送経路の中継移動無線ノードとはならないこととする。なお、[9] では、このような考慮をせずに新たな無線マルチホップ配送経路を探索、検出し、データ

メッセージ群の無線マルチホップ配送によって経路間衝突が頻繁に発生する場合においてのみ、互いに干渉する無線マルチホップ配送経路を中継移動無線ノードの変更、追加と無線信号到達範囲の調整によって互いに分離する手法を提案している。

各無線ノードは自律的に移動する、すなわち、アプリケーションの要求や環境要因によってのみ移動することを前提としてルーティング等を議論する場合が多い。しかし、無線マルチホップ配送経路の検出率の改善やデータメッセージ配送に用いられている無線マルチホップ配送経路の接続維持のために無線ノードの移動を活用する手法も提案されている。例えば、[10] では、隣接無線ノード間距離を引力斥力モデルによって調整するように各無線ノードが移動することによって、無線マルチホップネットワーク全体の接続性の向上、データメッセージ転送成功率と配送ホップ数とのトレードオフによる配送遅延の短縮を図っている。また、[ ] では、観測対象の移動にともなって移動するセンサノードの観測データを移動無線センサノードによる無線マルチホップ配送によって固定シンクノードへと配送する際に、観測データの品質 (観測 QoS) と配送遅延および配送成功率 (通信 QoS) とのトレードオフをとるように中継無線センサノードが移動する手法を提案している。

### 3. 提案手法

#### 3.1 ノード移動による接続性改善

前章で述べたように、無線マルチホップネットワークにおいて、経路間衝突および衝突回避のための競合によるデータメッセージ配送遅延の延長を回避するためには、異なる経路に含まれる中継無線ノードが互いに隣接無線ノードとはならないようにすることが考えられる。ただし、このためには、無線マルチホップ配送経路  $\mathcal{R} := \{N_0 \dots N_n\}$  に含まれるすべての無線ノード  $N_i$  の隣接無線ノード  $N \in Neighbor(N_i)$  を除いた他の無線ノードのみによって他の無線マルチホップ配送経路を構成しなければならない。一般に、無線マルチホップ配送経路による送信元無線ノードと送信先無線ノードとの接続性は、無線ノード分布密度が高いほど高く、低いほど低い [8]。また、無線ノード分布密度が閾値以下となると極端に接続性が低下する問題がある。このため、上記の経路間衝突回避手法では、無線マルチホップ配送経路によって複数の送信元無線ノードと送信先無線ノードの対について高い接続性を得ることは困難である。

この問題を解決する方法として、無線マルチホップ配送経路の構築によって無線ノード分布密度が低下することを回避することが考えられる。そこで、本論文では、データメッセージが配送されている無線マルチホップ配送経路を構成するいずれかの無線ノードの無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードがこの無線信号到達範囲外へと移動することにより、他の無線マルチホップ配送経路を構成する無線ノードとなっても衝突を発生することがなくなり、そのために経路間衝突を回避する手法を提案する。例えば、図 2(a) に示すように無線マルチホップ配送経路  $\mathcal{R}$  が検出され、これに沿ってデータメッセージが配送されるならば、 $\mathcal{R}$  を構成する無線ノード  $N_i$  の隣接無線ノードは、図 2(b) に示すように  $\mathcal{R}$  を構成するすべての無線ノードの無線信号到達範囲外へと移動する。経路間衝突を回避するためには、他の無線マルチホップ配送経路は  $N_i$  とは隣接しない無線ノードのみで構成されなければならないことから、 $N_i$  の隣接無線ノードが  $N_i$  の無線信号到達範囲外へと移動するこ



とによってこの配送経路を構成する無線ノードの候補数が増加し、経路検出確率が改善されることが見込まれる。

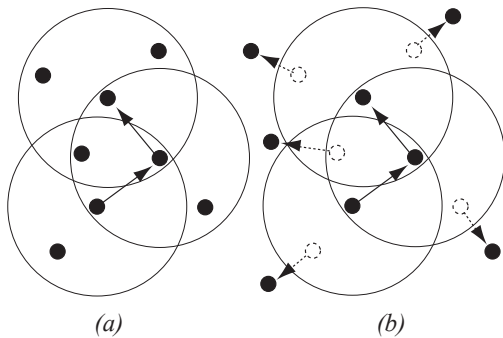


図 2 無線信号到達範囲外への無線ノード移動。

この提案手法を無線ノードの分布密度の観点で考えると、無線マルチホップネットワークを構成する  $\#N$  台の無線ノードの分布領域全体の面積を  $S$ 、 $\mathcal{R}$  の隣接無線ノードの分布領域、すなわち、 $N_i$  の隣接無線ノードの分布領域全体の面積を  $S^-$  とすると、従来手法では平均的には  $\#NS^-/S$  台の無線ノードが  $\mathcal{R}$  以外の無線マルチホップ配送経路を構成することができず、 $\#N - \#NS^-/S$  台の無線ノードの一部によって配送経路を構築しなければならない。このとき、配送経路に含むことが可能な無線ノードの分布密度は  $\#N/S$  である。一方、提案手法においては、 $\mathcal{R}$  を構成する  $n+1$  台の無線ノード以外の  $\#N - (n+1)$  台のすべての無線ノードが他の無線マルチホップ配送経路を構成する無線ノードの候補となる。したがって、その分布密度は  $(\#N - (n+1))/(S - S^-) > \#N/S$  となり、経路検出率の向上、すなわち、送信元無線ノードと送信先無線ノードとの対の接続性を改善することが期待できる。

### 3.2 ノード移動

無線マルチホップ配送経路  $\mathcal{R}$  の中継無線ノード  $N_i$  の無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノード  $N$  が  $N_i$  の無線信号到達範囲外へと移動するための移動方向は、半直線  $N_iN$  の  $N_i$  とは反対の方向である (図 3)。この半直線に沿った移動によって最短時間で  $N_i$  の無線信号到達範囲外へと移動することができる。ただし、 $N_i$  は  $\mathcal{R}$  の中継無線ノードであることから前後ホップ中継無線ノード  $N_{i-1}$  および  $N_{i+1}$  の無線信号到達範囲に含まれる。このため、図 4(a) のように  $N$  が複数の中継無線ノードの隣接ノードとなっていることが考えられる。また、無線マルチホップ配送経路を構成する中継無線ノードは必ずしも直線上に分布するのではないことから、図 4(b) のように  $N_{i-1}$  と  $N_i$  に隣接していた  $N$  が移動によってさらに  $N_{i+1}$  とも隣接することが考えられる。

このような状況を考慮して、移動無線ノード  $N$  が無線マルチホップ配送経路  $\mathcal{R}$  のすべての中継無線ノード  $N_i$  の無線信号到達範囲外へと移動する手法を考える。ここで、各移動無線ノードの位置情報を以下のように取得できることを想定する。

- 各移動無線ノードは GPS 受信機等の位置情報取得デバイスにより自身の現在位置を取得可能とする。
- 経路探索プロトコルは AODV を基礎とし、 $\mathcal{R}$  のすべての中継無線ノードは、経路探索応答メッセージ *Rrep* に自身の現在の位置情報をピギーバックする。

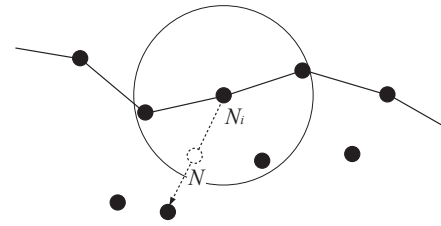


図 3 無線信号到達範囲外への移動 (1)。

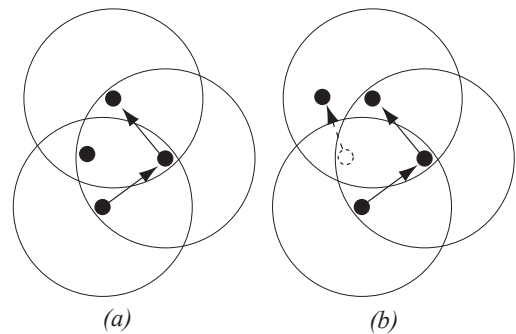


図 4 重複する無線信号到達範囲。

- $\mathcal{R}$  に沿って配送されるデータメッセージには、その転送中継移動無線ノードが自身の現在の位置情報をピギーバックする。

これらにより  $N$  は、 $\mathcal{R}$  のいずれかの中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれている限り、 $N$  を無線信号到達範囲に含む中継移動無線ノードの現在位置を取得できることとなる。この情報を用いた  $N$  の移動手法を以下に示す。

#### (1) 最適移動手法

$N$  の現在位置から  $N$  を無線信号到達範囲に含む  $\mathcal{R}$  のすべての中継移動無線ノードの無線信号到達範囲外の最も近い位置へ直進移動する (図 5)。この移動目標位置は、以下の方法で計算できる。

- 1)  $N$  を無線信号到達範囲に含む  $\mathcal{R}$  の各中継移動無線ノードの無線信号到達範囲境界の交点を算出する。
- 2) 1) で求めた交点のうち、他の中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれない位置のみを選択する。
- 3) 2) で選択された位置のうち  $N$  の現在位置からの距離が最短であるものを移動目標位置とする。

この手法では、図 4(b) に示すように、無線ノード移動とともにそれを無線信号到達範囲に含む  $\mathcal{R}$  の中継移動無線ノードが変化することが考えられることから、必ずしも最短距離の移動とはならないが、移動距離を短縮するという観点では  $N$  が得ている情報に基づく最適な判断がなされている。ただし、図 5 に示すように、複数の移動無線ノードが同一の移動目標位置へと移動することから、移動後の無線マルチホップ接続性向上という目標に対して好ましい方法とは考えにくい。

#### (2) 最長優先手法

$N$  が  $\mathcal{R}$  に含まれる複数の中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれている場合、 $N$  はこれらのすべ

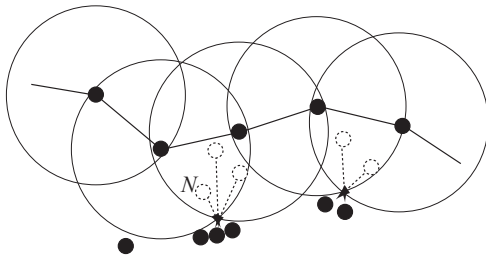


図 5 最適移動手法.

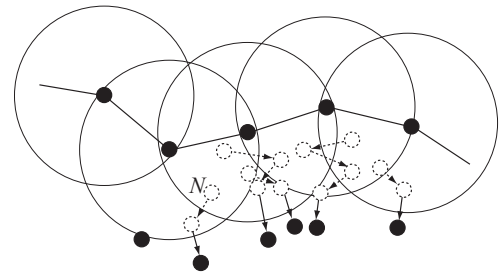


図 7 最短優先手法.

での無線信号到達範囲外へと移動しなければならない。そこで、 $N$  は無線信号到達範囲外への移動に最長時間を要する中継移動無線ノード、すなわち  $N$  に最も近い中継移動無線ノードの無線信号到達範囲外への移動を優先する手法が考えられる (図 6)。本手法では、一般に (1) に比べて移動時間が延長するものの、各無線ノードの移動目標位置は (1) に比べて重複しにくくなるため、接続性の改善に寄与することが期待される。なお、実際の無線ノードの移動においては、隣接中継移動無線ノードの位置情報に基づいて移動目標位置を計算し、計算された移動目標位置に向けて直進移動することで移動時間を短縮することは可能である。

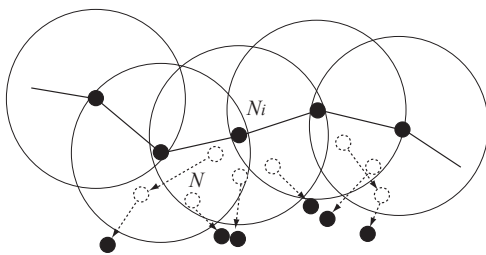


図 6 最長優先手法.

(3) 最短優先手法

(2) と同様、隣接中継移動無線ノードの無線信号到達範囲外へと逐次移動する手法であるが、無線信号到達範囲外への移動の要する時間が最短である中継移動無線ノードの無線信号到達範囲外への移動を優先する手法である (図 7)。

(2) と (3) においては、(1) と同様に移動にともなって  $R$  に含まれる別の中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれることが考えられる。ここでは、この新たな中継無線ノードの無線信号到達範囲外への移動を直ちに考慮する手法と現在の移動を終えてから考慮する手法が考えられるが、前者と (3) とは互いに整合しない ( $N$  が停止する)。また、図 8 に示すように  $N_{i-1}$ ,  $N_i$ ,  $N_{i+1}$  が直線上にある場合、 $N$  は  $XY$  間を往復移動することになり、無線信号到達範囲外へ移動できないことがある。しかし、本論文における無線ノードの移動は、無線マルチホップ配送経路の接続性向上が目的であり、すべての無線ノードを  $R$  の中継移動無線ノードの無線信号到達範囲外へ移動することが目的で

はない。そこで、一定時間だけ移動を継続して無線信号到達範囲外へと移動できない場合には、 $N$  はその位置に留まることとする<sup>\*1</sup>。

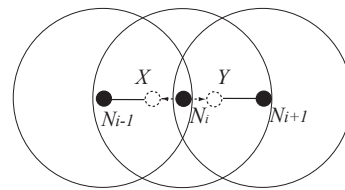


図 8 移動不能無線ノード.

3.3 移動基準

本章で提案した無線ノードの移動手法により、従来手法では新たな無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードとなることができなかった無線ノードが中継無線ノードの候補となることにより、無線マルチホップ配送経路の接続性が向上することが期待できる。しかし、提案手法の実現には無線ノードの移動がともない、一般的には動力発生のためのエネルギー消費を要する。この移動コストと接続性の改善にはトレードオフがあると考えられるため、 $R$  の中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれるすべての無線ノードを無線信号到達範囲外へと移動させるのではなく、接続性の改善により大きく寄与することが期待できる無線ノードを優先的に移動させることが考えられる。

無線マルチホップネットワークを対象としたオンデマンド型ルーティングプロトコルには、本論文で対象とする AODV や DSR のように、経路探索要求メッセージ  $Rreq$  のフラッディングによって限定された全域情報を用いることで配送経路長 (ホップ数) の短い経路を選択する手法と、GEDIR [4] や FACE [2] のように、制御メッセージのフラッディングを用いず隣接移動無線ノードの位置情報という局所情報のみを用いて次ホップ隣接移動無線ノードを選択してデータメッセージを転送する手法とがある。前者においては、配送経路長を短縮するという観点から、凸状の分

\*1 後述するように、すべての移動無線ノードが無線信号到達範囲外へと移動しないことが好ましい。この  $N$  のような無線信号到達範囲内に留まる移動無線ノードは必要である。

布領域にある移動無線ノードは無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードにはなりにくく、凹状の分布領域にある移動無線ノードが中継無線ノードになりやすいと考えられる(図9).

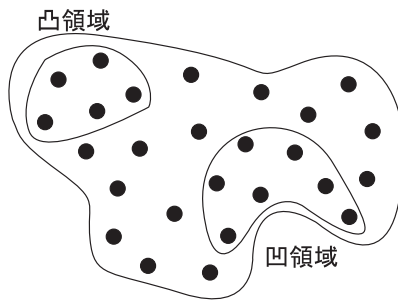


図9 凸状分布領域と凹状分布領域.

一般に無線マルチホップ配送経路は、送信元無線ノードから送信先無線ノードまで必ずしも直線状の経路で構成されるわけではなく、無線ノードの分布状態に依存し、特に提案手法においては、現在データメッセージ群の配送に用いられている無線マルチホップ配送経路の分布に強く依存することとなる。そこで、図10のように曲線部を含む無線マルチホップ配送経路においては、曲線経路の内側に含まれる移動無線ノードを無線信号到達範囲外へと移動させても別の無線マルチホップ配送経路に対して中継移動無線ノードとして寄与する機会が少なく、極性経路の外側に含まれる移動無線ノードを無線信号到達範囲外へと移動させれば別の無線マルチホップ配送経路に対して中継移動無線ノードとして寄与する機会が多いと考えられる。

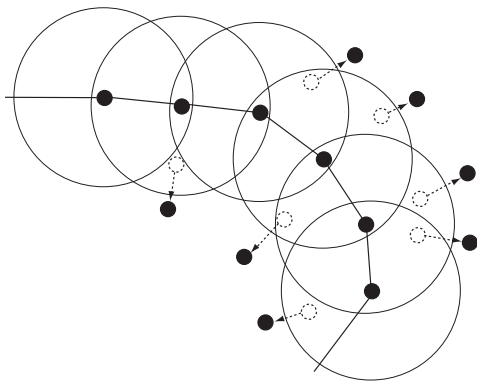


図10 「内側」と「外側」からの移動.

この「内側」「外側」の判定を行なうためには、各中継無線ノードが自身の位置情報に加えて、前後ホップ隣接移動無線ノードの位置情報を広告することとする。無線マルチホップ配送経路  $R$  の中継移動無線ノード  $N_i$  は、経路探索応答メッセージ  $Rrep$  に自身の位置情報をピギーバックする。  $N_i$  は  $N_{i+1}$  からの  $Rrep$  メッセージを受信することから  $N_{i+1}$  の位置情報を取得可能である。また、  $N_i$  は  $N_{i-1}$  が  $N_{i-2}$  へと転送する  $Rrep$  メッセージを傍受 (overhear) することが可能であることから  $N_{i-1}$  の位置情報も取得可能である。そこで、これらの位置情報をピギーバックした移動要求メッセージ  $Mreq$  を  $N_i$  が自身の無線信号到達範囲内にブロードキャスト送信する。これを受信した隣接無

線ノード  $N$  は、以下の条件に基づいて移動の要否を判断する(図11).

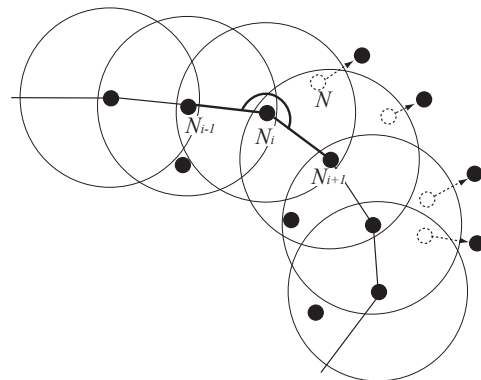


図11 移動基準の導入.

[移動要否決定手法]

- 1)  $N$  から最も近い中継移動無線ノード  $N_i$  を決定する.
- 2) 角  $N_{i-1}N_iN_{i+1}$  の  $N$  を含む側の大きさを評価値とする.
- 3) 2) の評価値が閾値よりも大きい場合には  $N$  は無線信号到達範囲外へと移動し、閾値よりも小さい場合には  $N$  は移動せずに現在位置に留まる。□

閾値の決定については今後の課題とする。

このように、無線ノードの移動基準を設けることによって  $R$  の中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に留まり、  $R$  におけるデータメッセージ配送のための無線マルチホップ配送経路には中継無線ノードとして加わることができない無線ノードとなるものが発生する。しかし、この無線ノードは  $R$  によるデータメッセージ配送の終了を移動した無線ノードに通知し、移動無線ノードの分布の偏りを是正することに寄与することができる。提案手法による無線ノードの移動により、  $R$  の中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれるすべての無線ノードが無線信号到達範囲外へと移動した場合、  $R$  の中継移動無線ノードは無線マルチホップネットワークを構成する他の移動無線ノードから孤立することになる。すなわち、他の移動無線ノードと無線マルチホップ配送経路で接続されないこととなる。このため、これらの中継移動無線ノードから他の移動無線ノードへのデータメッセージ配送要求、もしくは、他の移動無線ノードからこれらの中継移動無線ノードへのデータメッセージ配送要求が発生しても、これらを接続する無線マルチホップ配送経路を検出することができない(図12).

ここで、中継移動無線ノードの隣接移動無線ノードの一部が隣接関係を維持したまま移動せずに留まることによって、他の移動無線ノードとの接続を維持することが可能である。さらに、  $R$  に沿ったデータメッセージ群の配送が終了した場合には、無線信号到達範囲外へと移動した無線ノードを無線信号到達範囲内へと移動することによって、移動無線ノードの分布の偏りを是正することも可能である。

4. 評価

本章では、本論文で提案した無線ノードの無線信号到達範囲外への移動による接続性の改善、すなわち、新たな無線マルチホップ配送経路の検出成功率の向上についてシミュレーション実験により評価する。また、3.3節で考案した無線ノードの移動の要否を決定する移動基準の妥当性につい



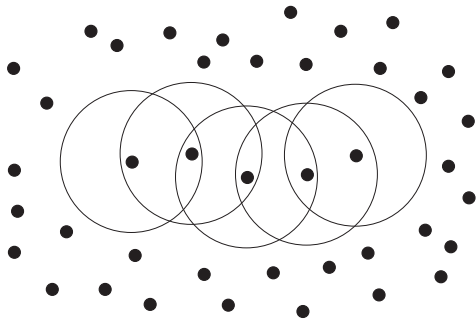


図 12 孤立無線ノード群.

でもシミュレーション実験評価する.

シミュレーション領域は  $1,000\text{m} \times 1,000\text{m}$  の正方形領域であり, 各移動無線ノードの無線信号到達距離は  $75\text{m}$  であるとする. また,  $200\sim 1,000$  台の移動無線ノードを一様分布乱数を用いてランダムに配置し, 各移動無線ノードは自律的には移動しないものとする. 無線マルチホップ配送経路  $R$  の送信元無線ノードと送信先無線ノードの対をランダムに選択し, 無線マルチホップ配送経路を AODV を用いて探索する. 無線マルチホップ配送経路が検出される無線ノード対のみを対象とし, 再度, 送信元無線ノードと送信先無線ノードの対をランダムに選択する. ここで, 無線ノードを移動させることなく無線マルチホップ配送経路を探索する場合と, 提案手法にしたがって無線ノードを移動させた後に無線マルチホップ配送経路を探索する場合について, 経路検出成功率を評価する. 無線ノードの移動には, 最長優先手法と最短優先手法を用いた. 実験結果を図 13 に示す.

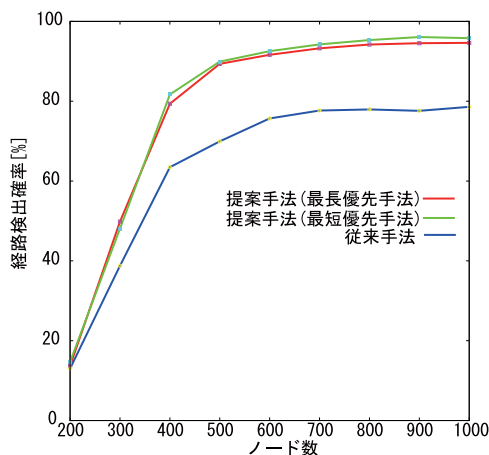


図 13 経路検出成功率.

移動無線ノード数が少ない場合には, いずれの手法においても新たな無線マルチホップ配送経路の検出成功率は  $20\%$  程度である. 移動無線ノード数の増加とともに, いずれの手法においても経路検出成功率は上昇するが, 一貫して提案手法が高い成功率となる. 移動無線ノード数が  $600$  台以上においては, 経路検出成功率はほぼ一定となる. このとき, 従来手法では  $75\%$  程度である経路検出成功率は, 提案手法では  $93\%$  程度となり  $18$  ポイントほど経路検出成功率が改善されている.

4 章でも述べた通り経路検出成功率の改善と無線ノードの移動コストとはトレードオフの関係にあり, 提案手法の

適用においてはより改善効果の高い無線ノードを優先して移動することが求められる. そこで, 湾曲する経路の「内側」に含まれる移動無線ノードと「外側」に含まれる移動無線ノードが移動後に新たな無線マルチホップ配送経路の中継移動無線ノードとなる確率をシミュレーション実験評価する. なお, 移動基準である角  $N_{i-1}N_iN_{i+1}$  は, 本実験では  $\pi$  とした. 図 14 に実験結果を示す.

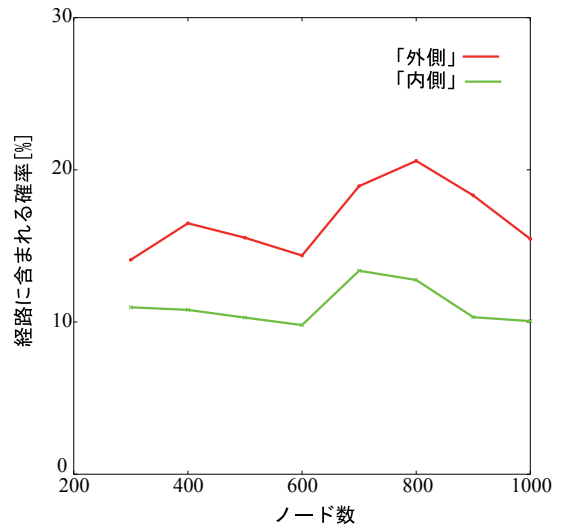


図 14 無線ノード位置による追加経路への寄与の違い.

移動無線ノード数に大きく依存することなく一貫して「内側」の移動無線ノードが追加経路の中継移動無線ノードとなる確率は  $12\%$  程度, 「外側」の移動無線ノードが追加経路の中継移動無線ノードとなる確率は  $18\%$  程度となっている. 閾値角を  $\pi$  としているために最も確率に差が生じにくい条件ではあるものの,  $6$  ポイント程度の差が認められた. 閾値をより低下させることによって, 移動しない無線ノードが増加し (移動する無線ノードが減少し) 移動コストが上昇する一方で経路検出の成功確率を改善することができる.

## 5. まとめ

本論文では, AODV によって検出された無線マルチホップ配送経路の中継移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれる他の移動無線ノードを無線信号到達範囲外へと移動することにより, この経路との経路間衝突を回避した他の無線マルチホップ配送経路の中継移動無線ノードの候補数を増加し, 経路検出率を向上させる手法を提案した. シミュレーション実験の結果, 移動により経路検出率が向上すること, すなわち, 無線マルチホップネットワークの接続性が改善することが示された. 提案手法では, 無線ノードの移動がともなうことから, 移動によるコストと向上する接続性とのトレードオフが必要となる. 接続性の向上には湾曲する無線マルチホップ配送経路の外側への移動が効果的であることをシミュレーション実験によって確認した. 今後は, 移動基準となる無線マルチホップ配送経路の方向変化角の閾値について検討, 実験を行なう.

## 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] 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] Johnson, D. B., “Routing in Ad Hoc Networks of Mobile Hosts,” *Mobile Computing Systems and Applications*, 1994. WMCSA 1994. First Workshop on , pp. 158–163 (1994).
  - [4] Lin, X. and Stojmenovic, I., “Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Net,” *Technical Report in University Ottawa*, TR-98-10 (1998).
  - [5] Maimour, M., “Maximally Radio-Disjoint Multipath Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks,” *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Wireless Multimedia Networking and Performance Modeling*, pp. 26–31 (2008).
  - [6] Matsumura, S. and Higaki, H., “Extension of RH2SWL for Collision-Free Data Message Transmissions by Subsidiary Channel in Wide-Area Wireless Multihop Networks,” *Proceedings of the 11th IEEE International Wireless Communications and Networking Conference* (2010).
  - [7] Perkins, C.E. and Royer, E.M., “Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing,” RFC 3561 (2003).
  - [8] Seyama, T. and Higaki, H., “G-AODV+PCMTAG: Routing in MANET with Low Overhead Flooding and Route-Shortening,” *Proceedings of the 7th International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks*, pp. 103–110 (2008).
  - [9] 埴, 桧垣, “送信電力変更をともなう無線マルチホップ配送経路変更による経路間競合解消手法,” *信学技報*, Vol. 112, No. 405, pp. 127–132 (2013).
  - [10] 村瀬, 西尾, 徳田, “引力・斥力モデルに基づいたセンサノードの動的配置手法,” *情報処理学会研究報告*, Vol. 2003, No. 19, pp. 31–38 (2003).