

無線ノードの故障検出機能を備えた無線マルチホップ配送

曾田 雄大^{1, a)} 梶垣 博章^{1, b)}

概要：無線マルチホップネットワークは、多数の無線ノードから構成されることから、無線ノードの故障への対処が求められる。無線ノードの停止故障モデルを前提として、故障検出時に配送経路を切替えるための複数経路探索プロトコルなどが提案されている。しかし、故障無線ノードがメッセージの送受信を行わないという制約条件は、その適用領域を厳しく制限する。本論文では、データメッセージ配送プロトコルに従わない誤メッセージの送受信を含むビザンチン故障を想定した無線マルチホップ配送手法を提案する。ここでは、故障無線ノードの検出と配送経路切替要求の通知が問題となる。本論文では、中継無線ノードの故障をその前ホップ無線ノードとこれらに隣接する監視無線ノードによる協調監視によって検出する。また、これらのノードが相互監視することによってその故障をも検出可能とすることで故障の誤検出と誤通知をも回避する。

1. はじめに

無線アドホックネットワーク、無線センサネットワーク等の無線マルチホップネットワークでは、データメッセージが送信元無線ノードから送信先無線ノードまで中継無線ノードが順次転送することによって配送される。一般に無線マルチホップネットワークでは、無線ノードが比較的高密度に配置される。これは、無線センサネットワークでは、センサにより観測対象領域を被覆することが求められるためであり、携帯端末ネットワークでは十分な接続性が保証されることが前提とされるためである。多数の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、構成要素である無線ノードの故障が考えられることから、耐故障性の向上が求められる。すなわち、故障無線ノードを検出し、無線マルチホップネットワークから除外する手法が求められる。耐故障分散システム実現技術においては、対象となる故障モデルに応じた故障検出、通知、復旧手法が提案されてきた。無線マルチホップネットワークにおいては、故障無線ノードがデータメッセージの送受信を停止する停止故障を対象とした諸手法が提案されているものの、故障無線ノードがプロトコルと整合しないメッセージの誤送信を行なうビザンチン故障に対する検討は十分になされていない。本論文では、無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードにおけるビザンチン故障を検出可能とするデータメッセージ配送手法を提案し、AODVを拡張した経路探索

プロトコル、データメッセージ配送プロトコルを設計する。

2. 関連研究

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^s から送信先無線ノード N^d までの無線マルチホップ配送経路 $\mathcal{R} := \{N_0 (= N^s) \dots N_n (= N^d)\}$ を用いたデータメッセージ配送について考える。ここで、中継無線ノード N_i が故障した場合には、この故障を検出し N_i を含まない新たな無線マルチホップ配送経路 \mathcal{R}' へと変更したデータメッセージ配送へと切替えることが求められる。無線マルチホップネットワークでは、配送経路探索に要する時間オーバーヘッドが大きいことから、あらかじめ複数の無線マルチホップ配送経路を検出しておくマルチパスルーティングプロトコルが研究開発されてきた [1, 4, 6]。ただし、多くのマルチパスルーティングプロトコルでは、故障無線ノードの検出が可能であることが前提とされており、複数の配送経路の探索と中継無線ノードの故障を検出した際の配送経路の切替え手法が議論されている。

無線ノードの故障モデルにはいくつかのものが考えられるが [9]、無線マルチホップネットワークを対象とした故障無線ノードの検出においては、多くの手法が以下の停止故障を前提としている。

[停止故障]

故障無線ノードは故障発生時点以降は停止する。データメッセージ、制御メッセージの送受信は一切行なわない。□ 停止故障はタイマを用いて検出するのが一般的である [3]。すなわち、無線ノード P の隣接無線ノード Q がタイマを設定し、このタイマが時間切れとなるまでに P が送信する

¹ 東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科

^{a)} sota@higlab.net

^{b)} hig@higlab.net

べきメッセージを Q が受信できないことによって Q が P の故障を検出する. 無線マルチホップ配送では, 各中継無線ノード N_i が故障していなければ, 前ホップ中継無線ノード N_{i-1} から受信したデータメッセージ m を N_i が次ホップ無線中継ノード N_{i+1} に一定時間内に転送する. そのため, この転送が行なわれないことを検出することによって N_i の停止故障が検出可能である. 図 1 に示すように, 各無線ノードの無線信号到達範囲がその無線ノードを中心とする同一半径の円の内部であるとするディスクモデル [7] に従うならば, N_i の停止故障は N_{i-1} によって検出可能である. すなわち, N_{i-1} が m を N_i へと転送した時点以降, 一定時間内に N_i が N_{i+1} へと転送する m を N_{i-1} が受信 (傍受) できない場合には, N_i が停止故障していることを N_{i-1} が検出する.

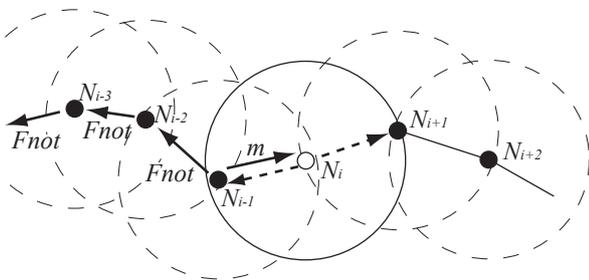


図 1 無線マルチホップ配送における停止故障検出.

3. 提案手法

3.1 ビザンチン故障無線ノード

無線マルチホップネットワークにおける無線ノードの故障モデルには, より一般的で対処が困難なビザンチン故障がある [9].

[ビザンチン故障]

故障無線ノードの故障発生時点以降の動作には仮定を置かない. 故障無線ノードは, データメッセージ, 制御メッセージの送受信を継続するが, プロトコルに従った正しいメッセージを送信することも誤ったメッセージを送信することもある. □

ビザンチン故障した中継無線ノードは, 停止故障した中継無線ノードとは異なり, 前ホップ中継無線ノードから受信したデータメッセージとは異なるデータメッセージを次ホップ中継無線ノードへと転送したり, 前ホップ中継無線ノードから受信していないデータメッセージを次ホップ中継無線ノードへと送信することが考えられる. しかし, このような故障についても, 停止故障の場合と同様にディスクモデルに従うならば, 中継無線ノード N_i の転送するデー

タメッセージを前ホップ中継無線ノード N_{i-1} が受信 (傍受) することによって検出可能である. 図 2 に示すように, データメッセージ m を転送した N_{i-1} は, N_i が次ホップ中継無線ノード N_{i+1} へと転送するデータメッセージ m' を受信する. m と m' とが同一である場合には N_i はデータメッセージの転送を正しく行なっているが, m と m' が異なるならば N_i はビザンチン故障しており, これを N_{i-1} が検出することができる.

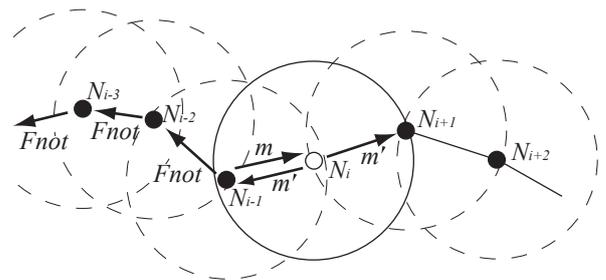


図 2 無線マルチホップ配送におけるビザンチン故障検出.

ただし, 図 3 に示すように隣接する中継無線ノード N_i , N_{i+1} がいずれもビザンチン故障した場合には N_{i-1} は故障を検出することができない. ここでは, N_i は N_{i-1} から受信した m を N_{i+1} へと転送しているが, ビザンチン故障している N_{i+1} は m とは異なる m' を N_{i+2} へと転送している. これを受信 (傍受) することによって N_i が N_{i+1} の故障を検出することが可能であるが, N_i が故障していることでこの検出に失敗する. 本論文では, 無線ノードにおける故障は 1-同時ビザンチン故障であることを仮定する. 一般に n -同時故障は以下のように定義される [8].

[n -同時故障]

同時に存在する故障無線ノード数は高々 n である. 故障した無線ノードは回復しないものとし, 故障した n ノードのいずれかがシステムから除外されるまで新たな故障無線ノードは発生しないものとする. □

N_i の故障を検出した N_{i-1} から送信元無線ノード $N^s = N_0$ まで故障通知メッセージ $Fnot$ を R を逆方向に沿って配送することによって N^s に N_i の故障を通知し, N^s は N_i を除去した新たな無線マルチホップ配送経路 R' を探索, 検出することで N^d へのデータメッセージの配送を再開する. ここで, N_{i-1} がビザンチン故障した場合には, N_i が故障していないにも関わらず $Fnot$ メッセージを前ホップ中継無線ノード N_{i-2} へと送信することが考えられる (図 4). この場合, N_{i-2} はこの $Fnot$ メッセージが N_{i-1} の誤動作によって送信されたものと判定することはできず, 前ホップ中継無線ノード N_{i-3} へと転送する. 以

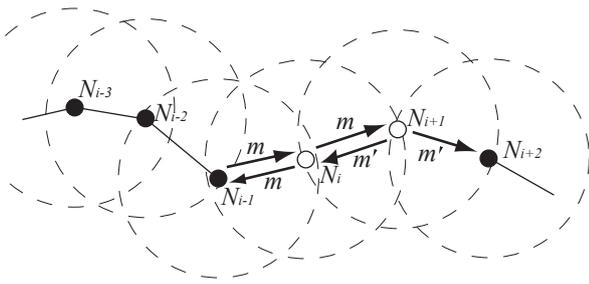


図3 無線マルチホップ配送における2-同時ビザンチン故障.

下、同様のことが繰返されることで故障していない N_i に関わる $Fnot$ メッセージが $N^s = N_0$ へと配送され、 N^s は故障していない N_i を除いた無線マルチホップ配送経路の再探索を行なうこととなる。さらに、新たに検出された無線マルチホップ配送経路には故障無線ノードである N_{i-1} を中継無線ノードとして含む可能性がある。

なお、この $Fnot$ メッセージが誤送信されたものであり、その送信元中継無線ノードである N_{i-1} が故障無線ノードであることを N_i は検出可能である。ただし、これを N_0 に通知する、すなわち N_{i-1} に関わる $Fnot$ メッセージを N_0 へと無線マルチホップ配送するためには、 N_{i-1} を含まない N_0 までの無線マルチホップ配送経路が必要となる。この方法を用いる場合、このような前ホップ中継無線ノードを含まない送信元無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路がすべての中継無線ノードについて必要となる点、 N_0 には N_{i-1} からの N_i に関わる $Fnot$ メッセージと N_i からの N_{i-1} に関わる $Fnot$ メッセージとの両方が配送される点が問題となる。

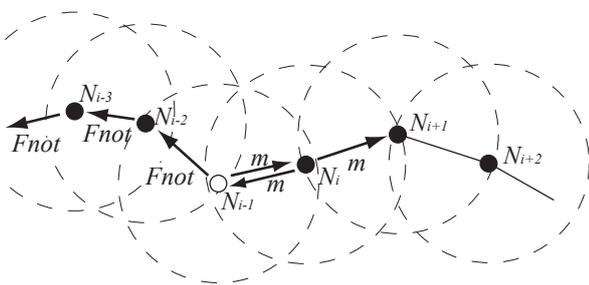


図4 ビザンチン故障検出の誤通知.

3.2 隣接監視無線ノード

前節で示した問題、すなわち、1-同時ビザンチン故障の仮

定のもとで、中継無線ノード N_i に関わる故障通知メッセージ $Fnot$ を前ホップ中継無線ノード N_{i-1} が誤送信する問題を解決するために、本論文では、 N_{i-1} と N_i から送信されるすべてのメッセージを傍受可能な隣接監視無線ノード O_i が存在する場合にのみ無線通信リンク $|N_{i-1}N_i|$ を無線マルチホップ配送経路に含むことができるという制約を導入する(図5)。ここで、 O_i は N_{i-1} と N_i の無線信号到達範囲に共通に含まれる無線ノードのひとつ、すなわち、 N_{i-1} と N_i に共通の隣接無線ノードのひとつである。したがって、 O_i は N_i の N_{i-1} からの受信データメッセージと N_{i+1} への転送データメッセージとをいずれも受信(傍受)することができる。このため、 N_{i-1} と同様に N_i の故障を検出することが可能である。これに加え、 O_i は N_{i-1} がその前ホップ中継無線ノード N_{i-2} へ送信する $Fnot$ メッセージを受信(傍受)することができる。したがって、 N_i が故障していないにも関わらず N_{i-1} が誤って N_i に関わる $Fnot$ メッセージを N_{i-2} へと送信したならば、これが誤送信であることを O_i は検出することができる。

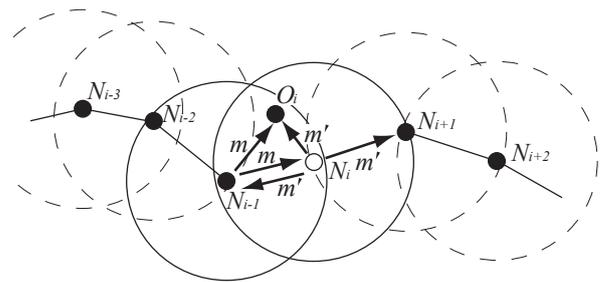


図5 隣接監視無線ノード.

O_i がこの誤送信を検出した場合、 N_{i-1} が送信した N_i に関わる $Fnot$ メッセージが N_0 に配送されないようにすることに加え、 N_{i-1} がビザンチン故障していることから N_{i-1} に関わる $Fnot$ メッセージを N_0 へと配送することが求められる。そこで、本論文では、 O_i が N_{i-1} に関わる $Fnot$ メッセージを N_{i-2} を経由して N_0 へと配送することとする。このとき、 N_{i-2} は O_i の隣接無線ノードであるとは限らない。また、図5のように、 N_{i-1} に関わる $Fnot$ メッセージの配送にはビザンチン故障している N_{i-1} を中継無線ノードに含まないことが求められる。後述する隣接無線ノード情報のみを用いた簡易な経路検出のために、本論文では、 O_i と N_{i-2} は隣接する、もしくは N_{i-1} の隣接無線ノードである監視中継無線ノード I_i を介した2-ホップ隣接する場合に限定する(図6)。 I_i は O_i の送信する $Fnot$ メッセージを N_{i-2} へと転送する役割のみを担う。

以下では、 N_{i-1} 、 N_i 、 O_i 、 I_i の処理手順について検証し、

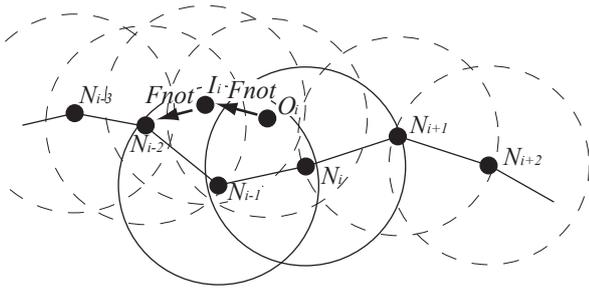


図 6 監視中継無線ノード.

これらの1同時ビザンチン故障が N_{i-2} によって検出されることを示す. なお, O_i からの故障通知メッセージ $Fnot$ が I_i によって中継され, N_{i-2} へと転送される場合について示すが, O_i と N_{i-2} が隣接ノードである場合にも同様の処理手順となる.

まず, これらのノードに故障がない場合, データメッセージ m は中継無線ノード N_i による転送が繰返されることで無線マルチホップ配送経路 \mathcal{R} に沿って配送される. 追加の制御メッセージが用いられることはない(図7).

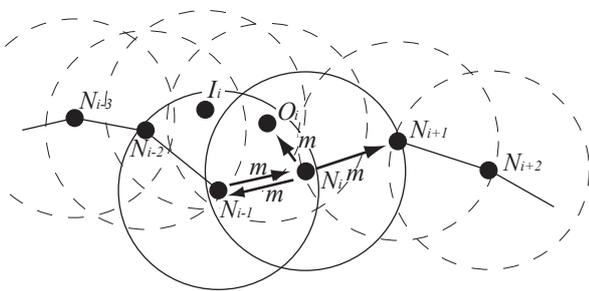


図 7 故障無線ノードのないデータメッセージ配送.

N_i がビザンチン故障した場合には, N_{i-1} から N_i へ転送されたデータメッセージ m が N_i によって N_{i+1} へと転送されない, N_i によって m と異なるデータメッセージ m' が N_{i+1} へと転送される, N_{i-1} がデータメッセージを N_i へ転送していないにも関わらず N_i が N_{i+1} へデータメッセージを転送する, のいずれかが N_{i-1} と O_i によって検出される(図8). このとき, N_i に関わる $Fnot$ メッセージが N_{i-1} から N_{i-2} へ送信されるとともに, O_i から I_i へ送信された $Fnot$ メッセージが I_i から N_{i-2} へと転送される. したがって, N_{i-2} は N_i に関わる2つの $Fnot$ メッセージを受信する.

N_i が故障していないにも関わらず N_{i-1} がビザンチン故

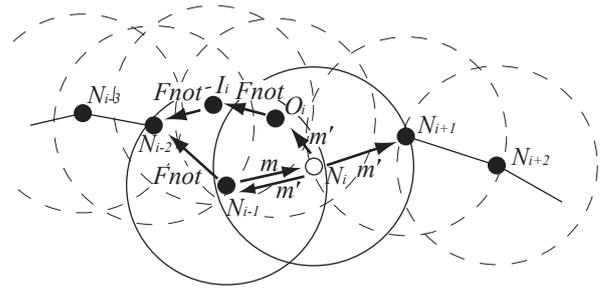


図 8 N_i の故障検出と通知.

障することによって N_i に関わる $Fnot$ メッセージを N_{i-2} が N_{i-1} から受信することが考えられる(図9). このとき, 1同時ビザンチン故障の仮定から N_i は故障していない. N_i が故障していないにも関わらず N_{i-1} が N_i に関わる $Fnot$ メッセージを送信していることは, これを受信(傍受)する O_i によって検出される. そこで, O_i は N_{i-1} に関わる $Fnot$ メッセージを I_i を経由して N_{i-2} へと配送する. したがって, N_{i-2} は N_i に関わる $Fnot$ メッセージと N_{i-1} に関わる $Fnot$ メッセージとを受信する.

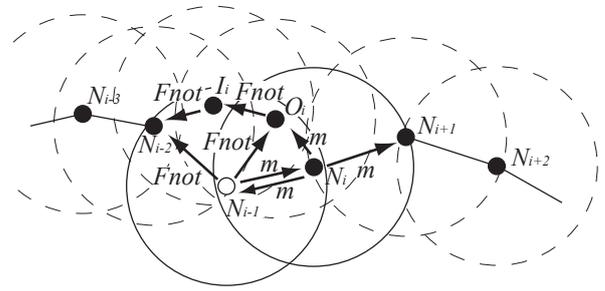


図 9 N_{i-1} の故障検出と通知.

同様に, N_i が故障していないにも関わらず O_i がビザンチン故障することによって N_i に関わる $Fnot$ メッセージを N_{i-2} が I_i を経由して O_i から受信することが考えられる(図10). このとき, 1同時ビザンチン故障の仮定から N_{i-1} は故障していない. N_i が故障していないにも関わらず O_i が N_i に関わる $Fnot$ メッセージを送信していることは, これを受信(傍受)する N_{i-1} によって検出される. そこで, N_{i-1} は O_i に関わる $Fnot$ メッセージを N_{i-2} へと送信する. したがって, N_{i-2} は N_i に関わる $Fnot$ メッセージと O_i に関わる $Fnot$ メッセージとを受信する.

最後に, N_i が故障していないにも関わらず O_i もしくは N_{i-1} のいずれかがビザンチン故障し, 他方に関わる $Fnot$

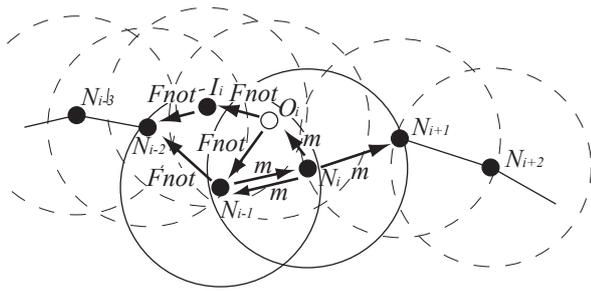


図 10 O_i の故障検出と通知.

メッセージを N_{i-2} へと送信することが考えられる (図 11). この場合, O_i と N_{i-1} は互いが誤送信した $Fnot$ メッセージを受信 (傍受) することができることから, この故障検出に対応する $Fnot$ メッセージを N_{i-2} へと送信することとなる. 結果として, N_{i-2} は N_{i-1} と O_i に関わる $Fnot$ メッセージを受信する.

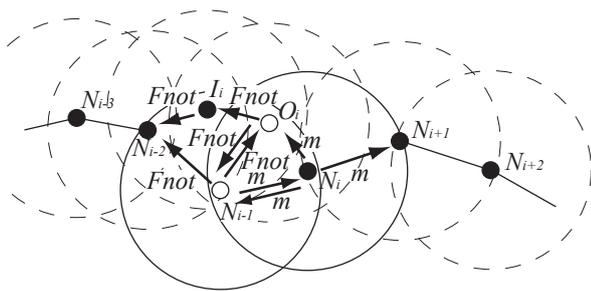


図 11 O_i もしくは N_{i-1} の故障検出と通知.

以上をまとめると, N_{i-1} , N_i , O_i のいずれかに故障が発生した場合, N_{i-2} は N_{i-1} と O_i から送信された故障通知メッセージを表 1 のように受信することとなる. 送信元無線ノード N_0 には, N_{i-2} から無線マルチホップ配送経路 \mathcal{R} に沿って $Fnot$ メッセージを逆方向に N_0 へ配送することで検出した故障を通知する.

表 1 N_{i-2} が受信する故障通知メッセージ.

N_{i-1} からの $Fnot$ が示す故障ノード	O_i からの $Fnot$ が示す故障ノード	故障ノード
N_i	N_i	N_i
N_i	N_{i-1}	N_{i-1}
O_i	N_i	O_i
O_i	N_{i-1}	N_{i-1} または O_i

ここで, ビザンチン故障した中継無線無線ノード N_i が

N_j ($j > i + 1$) に関わる $Fnot$ メッセージの N_0 への配送を開始する場合が考えられる (図 12).

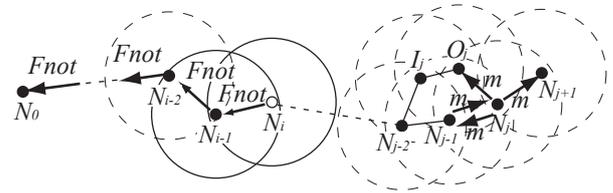


図 12 誤故障通知メッセージ.

本来, N_{j-1} および O_j が検出した N_j の故障は N_{j-1} から N_0 へと配送される. ただし, 上に示したように N_j に関わる $Fnot$ メッセージが N_i から N_{i-1} へと転送されるのは N_j の故障が N_{j-2} において確認された場合であることから, 1-同時ビザンチン故障の仮定により N_{i-1} は受信した $Fnot$ メッセージを無条件に N_{i-2} へと転送して問題がないはずである. ただし, ここで問題とした N_i が故障してこのような $Fnot$ メッセージの配送を開始する場合には, これを転送する N_k ($0 < k < i$) は N_i の故障を検出することができないため, N_j に関わる $Fnot$ メッセージが N_0 へと誤配送されることとなる. この誤りは, N_i と N_{i+1} の隣接無線ノードである O_i によって検出可能である. N_i は, N_{i+1} から転送された N_j に関わる $Fnot$ メッセージを転送しなければならないにも関わらず, N_{i+1} から送信されていないまま N_i が N_{i-1} へと送信することを検出できるからである. これを検出した O_i は N_{i-2} へその $Fnot$ メッセージが誤りであることを通知可能である. しかし, これを通知する手法を導入すると $Fnot$ メッセージの配送を 1 ホップずつ正当であることを確認しながら行なうこととなり, その配送遅延が拡大する. 本論文では, $Fnot$ メッセージにはその送信元無線ノードの識別子を含み, さらにそのデジタル署名を付与することにより, 中継無線ノードは無条件に $Fnot$ メッセージを転送し, N_0 によって $Fnot$ メッセージの正当性を確認することで問題が解決される.

なお, O_i によって検出された N_{i-1} の故障と N_{i-1} によって検出された O_i の故障に関わる $Fnot$ メッセージの \mathcal{R} に沿った配送についても同様のデジタル署名の付与することとする. これによって, 故障した I_i が O_i による隣接無線ノードの故障に関わる $Fnot$ メッセージを誤送信することも検出可能となり, I_i の故障が N_{i-2} によって検出されることになる.

3.3 監視可能経路

前節で述べたように、1-同時ビザンチン故障を検出可能な無線マルチホップ配送を実現するためには、送信元無線ノード $N^s = N_0$ から送信先無線ノード $N^d = N_n$ までの無線マルチホップ配送経路 $\mathcal{R} := \{N_0 \dots N_n\}$ を構成するすべての無線リンク $|N_i N_{i+1}\rangle$ が監視可能でなければならない。ここで、 $|N_i N_{i+1}\rangle$ が監視可能であるのは、以下の条件を満たす場合である。

[監視可能無線リンク]

$|N_i N_{i+1}\rangle$ が監視可能無線リンクであるのは、以下の条件を満たす N_{i-1} の隣接無線ノード O_{i+1} が存在する場合である (図 13)。

- O_{i+1} は N_{i+1} の隣接無線ノードである。
- O_{i+1} は N_{i-1} の隣接無線ノードであるか、 N_{i-1} , N_i , O_{i+1} に隣接する無線ノード I_{i+1} が存在する。□

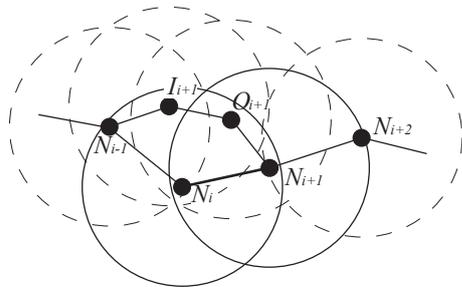


図 13 監視可能無線リンク。

このように、 $|N_i N_{i+1}\rangle$ が監視可能リンクであるか否かの判定には N_{i-1} との隣接関係が影響する。すなわち、前ホップ無線リンク $|N_{i-1} N_i\rangle$ に対して、 N_i からその隣接無線ノードへの監視可能リンクが定まることとなる。このためには、 N_i のすべての隣接ノードの隣接ノード集合、すなわち N_i がその 2-hop 隣接無線ノード関係を取得すればよい。これには一般的に以下のふたつの方法が考えられる。

[無線ノードの位置情報を用いる手法]

各無線ノードが自身の位置情報を GPS レシーバ等により取得可能であるならば、各無線ノードが取得した位置情報を含む制御メッセージを隣接無線ノードへブロードキャスト送信する。これによって、 N_i は自身の隣接無線ノードとそれらの隣接関係を得ることが可能となり、前ホップ中継無線ノード N_i に対して、監視可能リンクで接続された次ホップ無線ノード候補を決定することができる。□

[無線ノードの位置情報を用いない手法]

各無線ノードは、自身と隣接無線ノードの識別子を含む制御メッセージを隣接無線ノードへブロードキャスト送信する。これによって、 N_i は自身の隣接無線ノードとそれらの

隣接関係を得ることが可能となり、前ホップ中継無線ノード N_i に対して、監視可能リンクで接続された次ホップ無線ノード候補を決定することができる。□

これを用いた経路探索プロトコルを次節で示す。

3.4 提案プロトコル

3.4.1 経路探索プロトコル

3.3 節で述べた監視可能無線リンク条件およびその判定に必要な 2-ホップ隣接関係取得によって、各中継無線ノードは、前ホップ無線ノードに対する次ホップ無線ノード候補を定めることができる。これをさまざまなアドホックルーティングプロトコル [2] に適用することが可能であるが、本論文では AODV [5] に適用する場合について示す。

AODV では、送信元無線ノード N^s から経路探索要求メッセージ $Rreq$ のフラッディングを行ない、 $Rreq$ メッセージのひとつが送信先無線ノード N^d へ到達することにより、この $Rreq$ メッセージが配送された経路をデータメッセージの無線マルチホップ配送経路 \mathcal{R} として検出する。そして、検出した配送経路の中継無線ノードの経路表を更新するために、経路探索応答メッセージ $Rrep$ を \mathcal{R} に沿って N^d から N^s へと配送する。 $Rreq$ メッセージのフラッディングでは、各無線ノードが最初に隣接無線ノードから $Rreq$ メッセージを受信した際にすべての隣接無線ノードへと $Rreq$ メッセージをブロードキャスト送信する。これは、以下の経路探索規則に基づくものである。

- 各無線ノード N の前ホップ無線ノード候補は、最初に受信した $Rreq$ メッセージを送信した隣接無線ノード N^p である。
- N の次ホップ無線ノード候補は、 N^p を除くすべての隣接無線ノードである。

3.2 節で提案した監視可能無線マルチホップ経路を探索する場合には、 N のすべての隣接無線ノードが次ホップ無線ノード候補となるのではなく、 N^p を前ホップ無線ノードとするときに無線リンク $|N N^n\rangle$ が監視可能無線リンクとなる隣接無線ノード N^n のみが次ホップ無線ノード候補となる。3.3 節で示したように、 N は $Rreq$ を受信した時点で取得済みの 2-ホップ隣接関係から次ホップ無線ノード候補を定めることができる。これらに $Rreq$ メッセージをユニキャスト送信することは配送遅延を延長することから $Rreq$ メッセージに次ホップ無線ノード候補の識別子の集合をピギーバックしてブロードキャスト送信することとする。

[送信元無線ノード N^s]

- すべての隣接無線ノードの識別子からなる次ホップ無線ノード候補集合をピギーバックした $Rreq$ メッセージをブロードキャスト送信する。□

[無線ノード N]

- ピギーバックされた次ホップ無線ノード候補集合に N

の識別子が含まれている最初の $Rreq$ メッセージを隣接無線ノード N^p から受信したならば、 N^p を前ホップ無線ノードとする場合の次ホップ無線ノード候補集合をピギーバックした $Rreq$ メッセージをすべての隣接無線ノードにブロードキャスト送信する。

- 隣接無線ノード N^n から $Rrep$ メッセージを受信したならば、 N^d へのデータメッセージ配送における次ホップ無線ノードが N^n となるようにルーティングテーブルを更新することで中継無線ノードとなる。 N^p を前ホップ無線ノード、 N^n を次ホップ無線ノードとする場合の無線リンク $|NN^n\rangle$ の監視無線ノード O と監視中継無線ノード I との識別子をピギーバックした $Rrep$ メッセージを N^p へ送信する。
- N の識別子をピギーバックした $Rrep$ を受信 (傍受) したならば、無線リンク $|NN^n\rangle$ の監視無線ノード O 、もしくは、監視中継無線ノード I となる。□

[送信先無線ノード N^d]

- 最初の $Rreq$ メッセージを隣接無線ノード N から受信したならば、 $Rrep$ メッセージを N へ返送する。□

3.4.2 データメッセージ配送/故障検知プロトコル

3.2 節で述べた 1-同時ビザンチン故障を検出可能なデータメッセージの無線マルチホップ配送プロトコルを示す。ここで、無線ノードの故障検出時に配送される故障通知メッセージ $Fnot$ には故障検出無線ノードと故障無線ノードの識別子を付与する。

[中継無線ノード N_i]

- (1) 前ホップ中継無線ノード N_{i-1} からデータメッセージ m を受信した中継無線ノード N_i は、次ホップ中継無線ノード N_{i+1} へ m を転送する。
- (1-1) $N_{i+1} = N^d$ である、すなわち次ホップ無線ノードが送信先無線ノードであるならば、 N_i は m の転送手続きを終了する。
- (1-2) $N_{i+1} \neq N^d$ であるならば、 N_i はタイマ TN_i をセットして N_{i+1} が転送するデータメッセージを受信待機する。
- (2) TN_i が時間切れとなる以前に N_{i+1} が転送するデータメッセージ m' を受信したならば、 N_i は m と m' とを比較する。
- (2-1) $m = m'$ であるならば、 N_i は m の転送手続きを終了する。
- (2-2) $m \neq m'$ であるならば、 N_i は故障通知メッセージ $Fnot(N_i, N_{i+1})$ を N_{i-1} へ送信する。
- (3) N_{i+1} が転送するデータメッセージを受信しないまま TN_i が時間切れとなるならば、 N_i は故障通知メッセージ $Fnot(N_i, N_{i+1})$ を N_{i-1} へ送信する。□

[隣接監視無線ノード O_i]

- (1) 中継無線ノード N_i と N_{i+1} のいずれにも隣接する隣接監視無線ノード O_i は、 N_i が N_{i+1} へと転送した

データメッセージ m を受信すると、タイマ TO_i をセットして N_{i+1} が転送するデータメッセージを受信待機する。

- (2) TO_i が時間切れとなる以前に N_{i+1} が転送するデータメッセージ m' を受信したならば、 O_i は m と m' とを比較する。
- (2-1) $m = m'$ であるならば、 O_i は m の転送監視手続きを終了する。
- (2-2) $m \neq m'$ であるならば、 O_i は故障通知メッセージ $Fnot(O_i, N_{i+1})$ を隣接する中継無線ノード N_{i-1} または監視中継無線ノード I_i へ転送する。
- (3) N_{i+1} が転送するデータメッセージを受信しないまま TO_i が時間切れとなるならば、 O_i は故障通知メッセージ $Fnot(O_i, N_{i+1})$ を隣接する中継無線ノード N_{i-1} または監視中継無線ノード I_i へ転送する。□

[監視中継無線ノード I_i]

- 監視中継無線ノード I_i は、監視無線ノード O_i から故障通知メッセージ $Fnot(O_i, N_{i+1})$ を受信するとこれを N_{i-1} へ転送する。□

[中継無線ノード N_i]

- 次ホップ無線ノード N_{i+1} の故障を検出していない中継無線ノード N_i は、監視無線ノード O_i が送信する故障通知メッセージ $Fnot(O_i, N_{i+1})$ を受信したならば、前ホップ無線ノード N_{i-1} へ故障通知メッセージ $Fnot(N_i, O_i)$ を送信する。
- N_{i+1} の故障を検出していない N_i は、監視無線ノード O_i が送信する故障通知メッセージ $Fnot(O_i, N_{i+1})$ を受信していないにも関わらず、監視中継無線ノード I_i が送信する $Fnot(O_i, N_{i+1})$ を受信したならば、前ホップ無線ノード N_{i-1} へ故障通知メッセージ $Fnot(I_i, O_i)$ を送信する。□

[監視無線ノード O_i]

- 中継無線ノード N_i の次ホップ無線ノード N_{i+1} の故障を検出していない監視無線ノード O_i は、 N_i が送信する故障通知メッセージ $Fnot(N_i, N_{i+1})$ を受信したならば、監視中継無線ノード I_i へ故障通知メッセージ $Fnot(O_i, N_i)$ を送信する。□

[監視中継無線ノード I_i]

- 監視中継無線ノード I_i は、監視無線ノード O_i から故障通知メッセージ $Fnot(O_i, N_i)$ を受信するとこれを N_{i-1} へ転送する。□

4. 評価

3 章で提案したプロトコルにより、データメッセージの無線マルチホップ配送時に発生する無線ノードのビザンチン故障を検出し、送信元無線ノードへ通知することができる。ここで、監視可能無線リンクのみから構成される無線マルチホップ配送経路の探索には、通常の AODV における

経路探索要求メッセージ $Rreq$ のフラッディングと経路探索応答メッセージ $Rrep$ の検出配送経路 \mathcal{R} に沿ったユニキャスト配送のみが用いられており、追加の制御メッセージ交換や同期による時間オーバーヘッドは要さない。ただし、隣接無線ノードが監視可能無線リンクで接続された次ホップ無線ノード候補であるか否かを定めるためには2ホップ隣接関係を得ることが必要であるため、3.3節で述べたように、各無線ノードが自身の位置情報もしくは隣接無線ノード識別子を含む制御メッセージを経路探索要求とは独立にブロードキャスト送信することが求められる。一方、提案プロトコルでは、無線ノードの故障が検出されない場合には、データメッセージが \mathcal{R} に沿って配送されるのみであり、追加の制御メッセージを要さない。すなわち、無線ノード故障が検出されるまでは、提案手法では追加制御メッセージの交換や同期による遅延などのオーバーヘッドは要さない。

制御メッセージの配送が必要となるのは、中継無線ノード N_{i-1} および監視無線ノード O_i から N_{i-2} までの故障通知メッセージ $Fnot$ の配送と送信元無線ノード N_0 までのこのメッセージの転送のみである。ふたつの $Fnot$ メッセージ配送は N_{i-2} で同期されるため、その時間オーバーヘッドが追加となる。

提案手法では、データメッセージ配送に用いられる無線マルチホップ配送経路が監視可能無線リンクのみで構成されることが必要である。無線マルチホップネットワークのすべての無線リンクを経路の一部として含むことができないことから、経路検出率が低下することが考えられる。そこで、シミュレーション実験により、監視可能無線リンク条件による制約が経路検出率にどれだけの影響を与えるか評価する。300m × 300m の正方形領域に無線信号到達距離10mの無線ノード1,000–3,000台を一様分布乱数に基づいてランダムに配置する図14に示す固定位置に送信先無線ノードと送信元無線ノードを配置する。無線ノードの1,000通りの異なる配置について、無線マルチホップ配送経路検出の可否を調べ経路検出率を測定する。

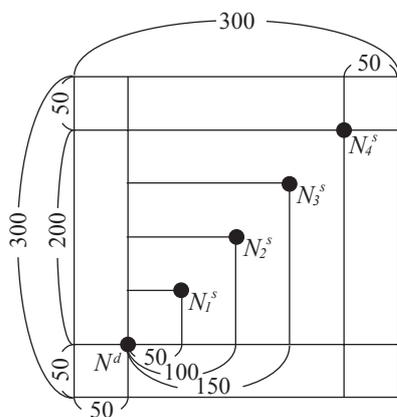


図14 シミュレーション実験領域.

実験結果を図15に示す。ここでは、X軸を無線ノード数、Y軸を送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの距離、Z軸を経路検出率としている。提案手法における経路検出率は、比較のために測定したAODVによる経路検出率と同様、ノード密度が高く、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの距離が短いほど高くなっている。無線ノード数が2,500台以上(平均隣接無線ノード数4.91台)の場合には、経路検出率に大きな差異はないものの、2,000–2,500台ではその差が次第に顕著になる。2,000台以下では、無線ノード密度そのものが低すぎるためAODVでも経路検出が困難である。送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの距離に対する経路検出率の低下の度合も、無線ノード数2,500台以上においてはほぼ同等の変化であるものの、2,500台以下では距離の増加に対する経路検出率の低下の度合がAODVと比べて顕著に大きくなるのが分かる。このように、無線ノードが低密度に分布する環境では監視無線ノードの配置が困難な場合が増加し、十分な経路検出率が得られないという問題はあるものの、中高密度分布においては、追加制御メッセージの交換等の通信オーバーヘッドを要することなくビザンチン故障を検出できる提案手法の有効性の高さを享受するに足る経路検出率が得られていると考えられる。

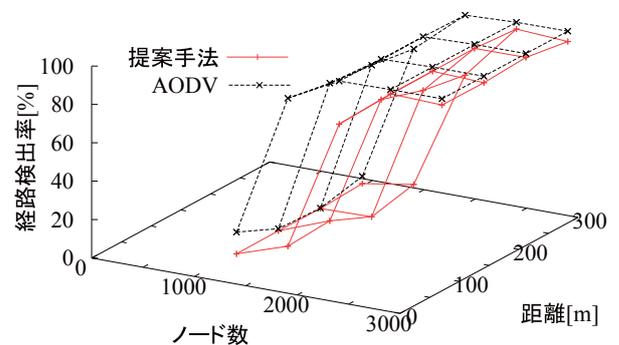


図15 無線マルチホップ配送経路検出率.

5. まとめ

本論文では、無線ノードのビザンチン故障を検出可能な無線マルチホップ通信手法を提案した。無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードの故障検出をその前ホップ無線ノードとこれらに隣接する監視無線ノードとによる協調監視する方法を示した。また、これらの監視無線ノードの故障検出をこれらが相互監視することによって実現した。また、このような監視を実現するルーティングプロトコルと故障検出、通知プロトコルを構成した。提案手法は、経路探索とデータメッセージ配送において追加の制御メッセージ交換を要することなく実現される。シミュレーション実験の結果、各無線ノードの平均隣接無線ノード数が5台程度

以上の環境では、提案手法の導入によって有意に経路検出率が低下することはないことが示された。これ以下の無線ノード分布密度における適用性の向上に資する拡張を行なうことが今後の課題である。

参考文献

- [1] Adibi, S. and Erfani, S., “A Multipath Routing Survey for Mobile Ad-Hoc Networks,” Proceedings of the 2nd Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference, pp. 984–988 (2005).
- [2] Boukerche, A., Turgut, B., Aydin, N., Ahmad, M.Z., Boloni, L. and Turgut D., “Routing Protocols in Ad Hoc Networks: A Survey,” Computer Networks, Elsevier, vol. 55, no. 13, pp. 3032–3080 (2011).
- [3] Cho, Y., Qu, G. and Wu, Y., “Insider Threats against Trust Mechanism with Watchdog and Defending Approaches in Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy Workshop, pp. 134–141 (2012).
- [4] Kaur, R., Mahajan, R. and Singh, A., “A Survey on Multipath Routing Protocols for MANETs,” International Journal of Emerging Trends and Technology in Computer Science, vol. 2, no. 2, pp. 42–45 (2013).
- [5] Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S., “Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing,” RFC 3561 (2003).
- [6] Perlyasamy, P. and Kathikeyan, E., “Survey of Current Multipath Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks,” International Journal of Computer Network and Information Security, vol. 5, no. 12, pp. 68–79 (2013).
- [7] Urrutia, J., “Two Problems on Discrete and Computational Geometry,” Proceedings of Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, pp. 42–52 (1999).
- [8] 亀田, 山下, “分散アルゴリズム,” 近代科学社, p. 136 (1994).
- [9] 増澤, 山下, “適応的分散アルゴリズム,” 共立出版, p. 33 (2010).