

# 片方向リンクを考慮した フラッディング領域適応制御型アドホックルーチング

瀬崎 薫  
生産技術研究所

## 概要

本研究では、アドホックネットワークにおけるルーチングプロトコルについて研究を行っている。本年度は、片方向リンクを含むアドホックネットワークにおいて、経路探索時のトラヒック増加を抑制しながら接続性を向上させるルーチングプロトコルについて提案・検討を行った。

## 1 はじめに

近年、無線通信技術が発達、普及し、さまざまな端末に無線デバイスが搭載されるようになってきた。これに伴い、固定された基地局を利用せずに、無線端末同士が自律分散的にネットワークを構築するアドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークでは、通信を行う二つの無線端末が互いの通信範囲内に存在しない場合、他の無線端末を経由することで通信が可能となる。無線端末自体が中継機能をもつアドホックネットワークでは、経路制御を行うためのルーチングプロトコルが重要な課題である [1]。そのため、アドホックネットワークにおけるルーチングプロトコルが多く提案されている [2][3]。

従来のアドホックネットワークにおけるルーチングプロトコルは、二つの無線端末（以下、ノードと称す）が互いの通信範囲に存在し、双方向で通信が行える双方向リンクのみを伝送経路に利用している。しかし、実際のアドホックネットワークでは、無線インタフェースの違いや電波干渉などにより、ノードによって通信範囲が異なる。そのため、一方からの通信しか行えない片方向リンクが存在する。現在提案されている多くのルーチングプロトコルは、片方向リンクを伝送経路に利用していないため、これらのプロトコルを片方向リンクが存在するアドホックネットワークで利用すると、接続性が大きく低下してしまう。

アドホックネットワークでは、双方向リンクのみではなく、片方向リンクを積極的に利用することで、

接続性を高めることが可能であると考えられる。片方向リンクを利用したルーチングプロトコルとして、文献 [3][4] が提案されている。しかし、文献 [3] の方法は、ブロードキャストによる復路探索を行うため、制御トラヒックの増加が避けられない。文献 [4] の方法も、復路探索にブロードキャストを用いるが、その領域を制限することで制御トラヒックを削減している。しかし、ブロードキャスト領域が狭いため、片方向リンクが多く存在するネットワークでは、接続性が低下してしまう。

本稿では、片方向リンクを利用したルーチングを行うとともに復路探索時のフラッディング領域を適応的に制御することで、制御トラヒックの増加を抑制しながら接続性を維持するルーチングプロトコルについて検討する。

## 2 従来のアドホックルーチングプロトコル

### 2.1 双方向リンクを対象としたルーチングプロトコル

オンデマンド型に基づく代表的なルーチングプロトコルとして、AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector routing) [2] がある。AODV では、片方向リンクを含む経路を除外し、双方向に通信できるリンクのみで構成される経路を探索する。

AODV における経路探索方法を以下に示す。なお、AODV では利用した経路を保存しておく経路キャッシュを利用することでフラッディングを抑制している。以下では、経路キャッシュ内に経路情報が存在しない場合を想定し、新たに経路を探索する手順について述べる。送信元ノードから宛先ノードへの経路を探索する場合、まず送信元ノードから経路要求パケット (RREQ: Route REQuest) をブロードキャストする。宛先ノード以外のノードが RREQ を受信した場合には、ブロードキャスト転送を繰り返すことで経路探索を継続する。RREQ が宛先ノードに到

着した時点で、送信元ノードから宛先ノードへの経路、すなわち往路が確定する。

宛先ノードでは、確定した往路を送信元ノードに伝えるため、RREQ に付加された往路情報を用いて、経路応答パケット (RREP: Route REPLY) を往路の逆順に転送する。RREP が送信元ノードに到着することによって伝送経路が確定する。

AODV では、往路探索で発見した経路の逆順に RREP を転送するため、復路探索時のトラヒックが最小限に抑えられる。しかし、図 1 (a) に示すように、往路探索時に  $v_s \rightarrow v_1 \rightarrow v_d$  という往路が確立しても、 $v_1, v_d$  間が片方向リンクで  $v_d \rightarrow v_1$  の通信ができない場合、RREP の送信に失敗する。このような場合、伝送経路を確立することができない。

## 2.2 片方向リンクを考慮したルーティングプロトコル

AODV と同様に、オンデマンド型であるルーティングプロトコルとして DSR (Dynamic Source Routing) [3] がある。DSR は片方向リンクを考慮したルーティングプロトコルであるとされる。文献 [3] によると、AODV と同様に双方向リンクのみを利用した手法と、往路探索と同様に復路探索にもブロードキャストを用いる手法の 2 つの方式がある。本稿では、後者をフラッディング型 DSR と称する。

フラッディング型 DSR における経路探索方法を以下に示す。新たに経路を探索する場合、AODV と同様に送信元ノードは RREQ をブロードキャストする。宛先以外のノードが RREQ を受信した場合、ブロードキャスト転送を繰り返すことで経路探索を継続する。宛先ノードに到着した場合、往路探索と同様に RREP をブロードキャストすることで復路探索が行われる。このことにより、片方向リンクを含むアドホックネットワークでは、往路と復路でそれぞれ別の経路を探索することができる。図 1 (b) の例では、往路として  $v_s \rightarrow v_1 \rightarrow v_d$ 、復路として  $v_d \rightarrow v_2 \rightarrow v_s$  が発見され、双方向の通信が可能となる。しかし、往路探索と同様に復路探索にもブロードキャストを行うため、制御トラヒックの増加が避けられない。

筆者らは、復路探索時のトラヒック増加を抑制するため、フラッディング領域制限型ルーティング [4] を提案している。フラッディング領域制限型ルーティングの具体的な手法を以下に示す。往路の経路探索は、AODV や DSR などと同様に、送信元ノードが RREQ をブロードキャストする。宛先以外のノードが RREQ を受信した場合、中継を行うノードは送信

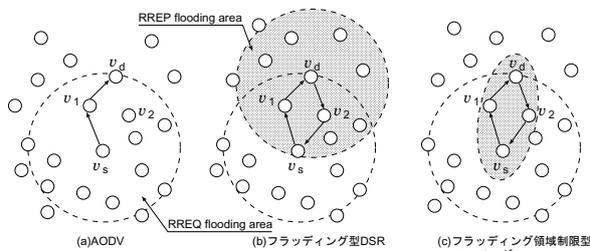


図 1: RREQ, RREP のフラッディング領域

元ノードからのホップ数を記憶する。RREQ を受信した宛先ノードは、復路の経路探索を開始し、送信元ノードからのホップ数を付加した RREP をブロードキャストする。送信元以外のノードが RREP を受信した場合、RREP に記されたホップ数と自身が記憶している送信元ノードからのホップ数を比較し、次の三つの場合に分けて処理を行う。(a) RREP に記されたホップ数のほうが大きい場合には、パケットの中継転送を継続する。(b) 小さい場合は、パケットを破棄する。(c) 等しい場合には、一定時間待機し、待機中に他のノードから RREP を受信しなければ中継を継続する。それ以外はパケットを破棄する。中継を行う際には、RREP に記されたホップ数を自身のホップ数に書き換える。以上の処理を繰り返し行うことで送信元ノードを発見して復路を確立することができる。また、送信元ノードからのホップ数でブロードキャスト領域を制限することで、図 1 (c) に示すように、復路探索時のトラヒックを削減することができる。

## 3 片方向リンクを考慮したフラッディング領域適応制御型アドホックルーティング

### 3.1 フラッディング領域制限型ルーティングの問題点

フラッディング領域制限型ルーティングは、図 2 (a) に示すように、各ノードが往路探索時に送信元ノードからのホップ数を記憶している。この情報と RREP に付加されたホップ数を比較し、往路から遠ざかる場合に RREP を破棄することで復路探索時の制御トラヒックを削減している。しかし、迂回経路を通る場合は、往路よりも経路長が長くなるため、遠ざかる方向へ中継される RREP を破棄してしまうと、片方向リンクを避けた復路が発見されにくくなる問題がある。

図 2 (b) に示す復路探索例の場合、 $v_s, v_3$  間が片方向リンクとなっており、 $v_3 \rightarrow v_s$  の通信はできな

い. この場合,  $v_3 \rightarrow v_2 \rightarrow v_1 \rightarrow v_s$  の経路を発見できれば, 復路を構築できる.  $v_2$  では,  $v_3$  から転送される RREP を受信できるが, RREP に付加されたホップ数が 1,  $v_2$  が保存している送信元ノードからのホップ数が 2 であるため, RREP は中継されずに破棄される. そのため, 復路を発見することができない.  $v_2$  が RREP の転送を実施した場合には,  $v_2 \rightarrow v_1 \rightarrow v_s$  の迂回経路を発見することができる. このように, 復路探索のフラッディング領域を制限することは探索の可能性を減少させることになるため, 制御トラヒックと接続性はトレードオフの関係にある. そこで, ネットワークの状況によりパケット中継の条件を適応的に変化させることで, 復路の接続性を向上させる手法を提案する.

### 3.2 提案手法

本稿では, フラッディング領域制限型ルーチングを改良し, 片方向リンクを考慮するとともに復路探索時のフラッディング領域を適応的に制限する手法を提案する. 以下に, 具体的な提案手法の手順を示す.

#### (1) 往路探索

往路探索は, AODV など従来のオンデマンド型ルーチングプロトコルと全く同様に, 送信元ノード  $v_s$  から宛先ノード  $v_d$  へ RREQ をブロードキャストすることにより行われる. RREQ を受信したノード  $v_i$  は,  $v_s$  からのホップ数  $H_f(v_i)$  を記憶する.  $v_i \neq v_d$  の場合,  $v_i$  は中継ノードとして, RREQ をブロードキャスト転送することでフラッディングを継続する.  $v_i = v_d$  の場合, 中継ノードと同様にホップ数  $H_f(v_d)$  の記憶は行いが, RREQ の中継は行わない.

#### (2) 復路探索

宛先ノード  $v_d$  は,  $v_s$  からの RREQ を受信すると,  $v_s$  を宛先とした RREP をブロードキャストする. ただし, 往路探索時に記憶しておいた送信元ノードからのホップ数  $H_f(v_d)$  をメトリック  $H_b$  として RREP に付加する.

RREP を受信したノード  $v_i$  が  $v_s$  以外の場合には, ブロードキャストによる RREP の中継転送を行う必要がある. 提案手法では, 以下のルールに基づき RREP の転送を行う. まず, 受信した RREP に記述されているメトリック  $H_b$  を参照する.  $v_i$  で記憶している往路探索時のホップ数  $H_f(v_i)$  と  $H_b$  の比較を行い, 次の三つの場合に分けて処理を行う. なお,  $N$  はフラッディング領域を適応的に制御するためのパラメータで整数値である.

#### (a) $H_b > H_f(v_i)$ の場合

受信された RREP を送信, あるいは転送したノ

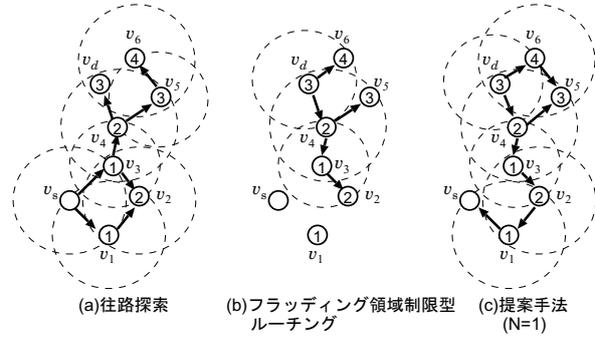


図 2: 領域制限フラッディングの方法

ドを  $v_p$  とすると,  $v_p$  では  $H_f(v_p)$  をメトリック  $H_b$  として RREP に付加したので  $H_f(v_p) > H_f(v_i)$  となる. すなわち, 往路探索の結果から  $v_i$  の方が  $v_p$  よりも送信元ノード  $v_s$  に近いことがわかる. そこで,  $H_b > H_f(v_i)$  の場合には, 受信された RREP が送信元ノード  $v_s$  に近づく方向に転送していると判断し, 即座に中継転送を行う. ブロードキャスト転送を行う際, RREP に記憶されたメトリック  $H_b$  の値を,  $v_i$  で記憶している往路探索時のホップ数  $H_f(v_i)$  で上書きする.

#### (b) $H_b < H_f(v_i) - N$ の場合

$H_b < H_f(v_i) - N$  の場合には,  $v_p$  の方が  $v_i$  よりも  $(N+1)$  ホップ以上送信元ノード  $v_s$  に近いことがわかる. すなわち, 送信元ノード  $v_s$  から極端に遠ざかる方向に RREP を転送していると考えられる. そこで, このような場合には中継転送を行わず RREP を破棄する.

#### (c) $H_f(v_i) - N \leq H_b \leq H_f(v_i)$ の場合

$H_f(v_i) - N \leq H_b \leq H_f(v_i)$  の場合には, 送信元ノードに近づいているわけではないが, 極端に遠ざかっているわけでもない. すなわち, 往路に対しておおよそ垂直か, やや遠ざかる方向に RREP を中継転送していると考えられる. 往路に片方向リンクが含まれる場合には, 往路と垂直の方向に RREP を中継することによって, 片方向リンクを避けた復路を探索できると考えられる. そこで,  $H_f(v_i) - N \leq H_b \leq H_f(v_i)$  が成立する場合には, 一定時間待機した後に RREP の中継転送を行う. ただし, 待機時間中に  $v_p$  以外のノードが送信した RREP を受信した場合には, 中継転送を中止して RREP を破棄する. 往路探索時の RREQ を受信していないノードで RREP を受信した場合には, 復路探索 (c) により復路探索を継続させることとする.  $N$  の値を大きくすると, フラッディング領域制限型ルーチングと比べて RREP を破棄する領域が狭くなり, フラッディング領域を拡大

することができる。なお、 $N = 0$ とした場合には、従来のフラッディング領域制限型ルーチングと同じ動作となる。

提案するフラッディング領域適応制限型ルーチングでは、図2(c)に示すように、適応制御パラメータ  $N$  を設けることにより、迂回経路を探索することができる。つまり、復路探索時のフラッディング領域を適応的に制御することで、接続性を高めることが可能となる。

## 4 性能評価

### 4.1 シミュレーション環境

本稿では、コンピュータシミュレーションを用いて、AODV、フラッディング型 DSR、提案手法の比較を行う。シミュレーションの条件は以下のとおりである。500m 四方の領域に 120 ノードをランダムに配置する。全ノードの中から送信元ノードと宛先ノードの 10,000 組をランダムに選択し、経路探索を行う。ノードの電波到達範囲は半径 100m と 50m の 2 種類とし、前者を大電力ノード、後者を小電力ノードと称する。小電力ノードの割合を 0% から 50% まで変化させて、シミュレーションを行う。小電力ノードの割合が 0% のとき、片方向リンクは存在しない。なお、提案手法における適応制御パラメータ  $N$  を 0, 1, 2 とする。評価指標として、接続成功確率、経路探索あたりの RREP 送信回数を用いる。接続成功確率は、往路と復路の両方の経路が確立された確率で、値が大きいくほどそのプロトコルの接続性が高いことを示す。平均 RREP 送信回数は、ネットワーク内のノードが復路探索の制御パケットである RREP を送信した回数で、トラヒックの目安となる。

### 4.2 評価結果

シミュレーション結果として、接続成功確率、平均 RREP 送信回数をそれぞれ図3から図4に示す。図3より、片方向リンクをサポートしていない AODV は、小電力ノードの増加に伴い接続性が大きく低下している。提案手法は、AODV と比べて大幅に接続性が向上していることがわかる。更に提案手法のパラメータ  $N$  が 1, 2 の場合、フラッディング型 DSR と同等の高い接続性を維持していることがわかる。このことから、提案手法は経路確立に必要なフラッディング領域を適応的に制御できていることがわかる。一方、図4より、提案手法のパラメータ  $N$  が 0 の場合、平均 RREP 送信回数は AODV と同程度に抑えられている。提案手法のパラメータ  $N$  が 1, 2 の場合、パラメータ  $N$  が 0 のときと比べてトラヒック

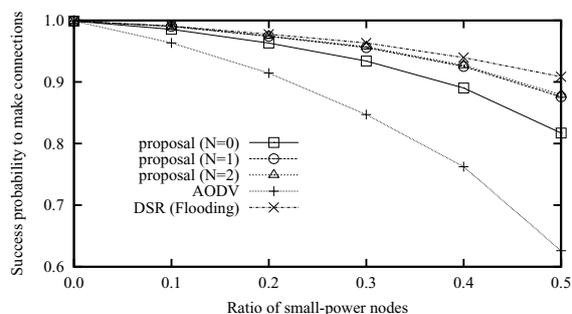


図3: 接続成功確率

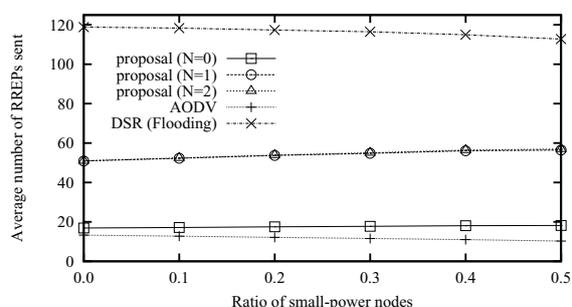


図4: 平均 RREP 送信回数

は増加しているが、フラッディング型 DSR の半分程度にトラヒックを抑えることができている。図3, 4より、接続性と制御トラヒックがトレードオフの関係になっていることがわかる。以上のことから、提案手法では、制御パケットの増加を抑えたうえで、高い接続性を達成できることがわかる。

## 5 むすび

本稿では、片方向リンクを考慮したフラッディング領域適応制御型アドホックルーチングを提案し、性能評価を行った。その結果、提案手法により接続性が向上し、かつ復路探索時のトラヒックを適応的に制御することができることがわかった。

## 参考文献

- [1] S. Corson and J. Macker, "Mobile ad hoc networking (MANET) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations," IETF, RFC 2501, Jan. 1999.
- [2] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing," IETF, RFC 3561, July 2003.
- [3] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and Y.-C. Hu, "The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-10.txt, July 2004.
- [4] 寺田真介, 久光浩司, 三好匠, 森野博章, 小川将克, "片方向リンクを考慮したフラッディング領域制限型アドホックルーチングプロトコル," 信学技報, NS2004-26, May 2004.