

LBSR: 非対称リンクを含む MANET のためのルーティングプロトコル

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科

坂本 大樹 桧垣 博章

E-mail: {daiki,hig}@higlab.net

ネットワークを移動コンピュータのみで構成したアドホックネットワークは、アクセスポイントを介した無線ネットワークに比べ高い柔軟性と移動性を持つ。本論文では、モバイルコンピュータが送信する無線信号の到達範囲を同一であると仮定せず、アドホックネットワーク内に複数の片方向リンクが存在することを仮定した新たなオンデマンド型ルーティングプロトコル LBSR(Loop-Based Source Routing) プロトコルを提案する。また、LBSR が経路検出保証型プロトコルであることを示す。

LBSR: LoopBased Source Routing for MANET with Asymmetric Wireless Links

Daiki Sakamoto Hiroyuki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail:{daiki,hig}@higlab.net

In an ad-hoc network where only mobile computers are included, higher mobility and flexibility are supported than an infrastructured network with access point. In this paper, we propose LBSR(Loop-Based Source Routing) which is a novel on-demand routing protocol supporting asymmetric wireless communication links. For achieving a route from a source to destination, LBSR searches multiple loop routes. In addition, we prove that LBSR surely detecting a message transmission route if it exists.

1 背景と目的

近年、PDA やノート型 PC などの移動コンピュータの普及が進んでいる。また、IEEE802.11 [2] や HIPER-LAN [1] といった無線 LAN プロトコル技術の研究開発、利用が進み、移動コンピュータでのネットワーク利用が期待されている。従来のコンピュータネットワークは、有線ネットワークに接続されたルータのみがメッセージの配送を行なうインフラストラクチャネットワーク (Infrastructured Networks) であった。移動コンピュータは、有線ネットワークに接続されたアクセスポイントの無線信号到達範囲内に位置するときのみ、これを経由して他のコンピュータと通信することができる。しかし、インフラストラクチャネットワークを対象とした従来の構築、管理、運用手法を、災害救助活動やイベント会場などに利用されるコンピュータネットワークのように、移動性、緊急性、一時性を要求される用途に適用することは、その構築コストが大きいために困難である。そこで、ルータのみによってメッセージが配送される従来のネットワークに代わって、すべての移動コンピュータがメッセージの配送を行なう、すなわち、すべての移動コンピュータがルーティング機能を持つネットワークであるアドホックネットワーク (Ad-hoc Networks) への要求が高まっている。アドホックネットワークでは、すべてのコンピュータがメッセージ配送を行ない、かつ、これらのコンピュータが移動することから、既存の有線ネットワークを対象としたルーティングプロトコルとは異なるルーティングプロトコルが必要とされる。アドホックネットワークにおけるルーティングプロトコル

は、様々なものが提案されている [5-7,9,11,12,16]。これらの多くは、各移動コンピュータから送信される無線信号の到達範囲の大きさがすべて同一であり、移動コンピュータ間が双方向接続されていることを仮定している。しかし、無線通信では、無線信号の減衰、反射、回折により必ずしも双方向接続できるとは限らない。また、移動コンピュータの電源容量により、その送受信能力は一定ではない。さらに、アドホックネットワークは今後様々な無線通信メディアで構成されることが考えられるため、従来の双方向接続を仮定したルーティングプロトコルでは、片方向接続リンクが存在する場合に、経路の検出確率が低下する可能性がある。すなわち、アドホックネットワークの可用性 (アベイラビリティ) を高く保つために、片方向接続リンクをも用いたルーティングプロトコルの設計、仕様が求められている。これまでに提案された片方向接続リンクを用いるアドホックルーティングプロトコルとして DSR [5] や CBRP [7]、ULSR [16] などがある。しかし、経路探索時に 2 組のフラッディングを用いる、経路探索をするために大きなトラフィックが発生する、片方向接続リンクの割合が小さい場合のみ効率的な経路探索が可能となる、といった問題がある。そのため、本論文では、片方向接続リンクを持つアドホックネットワークにおいて、経路探索時に送信元から送信先を経由し送信元へと戻るループ経路を検出することにより、1 組のフラッディングと複数のユニキャストの組み合わせによって経路検出可能なルーティングプロトコルである LBSR(Loop-Based Source Routing) プロトコルを提案する。また、LBSR が経路

検出保証型プロトコルであることを示す。

2 アドホックルーティングプロトコル

アドホックネットワークにおいて、移動コンピュータが他の移動コンピュータと通信を行うためには、各移動コンピュータが経路情報を何らかの方法で取得する必要がある。その基本的な方法は、テーブルドリブン型とオンデマンド型の2つに分類することが可能である [10]。

[テーブルドリブン型]

有線ネットワークでは、距離ベクトルに基づく RIP (Routing Information Protocol) [6] やリンクステートに基づく OSPF (Open Shortest Path First) [9] といった、各ルータが定期的に経路情報を交換し、ネットワーク全体のトポロジを管理するプロアクティブ (Proactive) 型の手法が採られている。DSDV [11] は、この手法をアドホックネットワークに適用したルーティングプロトコルである。しかし、無線ネットワークでは通信帯域幅が十分ではないため、通信要求の有無に関わらず経路情報を交換するためのメッセージが必要となるこれらのルーティングプロトコルをアドホックネットワークに適用するのは困難である。□

[オンデマンド型]

各ルータのルーティングテーブルに格納された経路情報を定期的に交換し、自身のルーティングテーブルの経路情報を更新するのではなく、メッセージ配送を開始するときに送信元から送信先までの経路を探索する。各移動コンピュータは、検出した経路に関する情報のみを管理し、移動コンピュータ間の定期的な経路情報の交換は必要とされない。オンデマンド型のプロトコルとして、AODV [12]、DSR [5] などが提案されている。移動コンピュータの移動によってネットワークトポロジが経時的に変化するアドホックネットワークに対しては、通信を行おうとした時点から実際にデータが送信されるまでに経路探索のための遅延が生じるという問題がある。しかし、通信開始時のネットワーク構成に基づいた経路が検索される点が優れている。□

無線通信に用いられる無線信号には、光や電波などがある。このような無線信号を用いたネットワークでは、固定ネットワークのように隣接コンピュータ間が必ずしも双方向通信可能であるとは限らない。ところが、現在のアドホックネットワークにおけるルーティングプロトコルの多くは移動コンピュータ間が双方向接続されていることを仮定している。本論文では、アドホックネットワーク内に片方向接続リンクが多数存在するものと仮定したオンデマンド型ルーティングプロトコルを提案する。オンデマンド型を用いた場合の経路探索において、双方向接続を使用する場合の経路探索と片方向接続リンクも用いる場合の経路探索との相違を以下に示す。

[双方向接続リンクのみを用いるルーティング]

ネットワーク内のすべての移動コンピュータが送信する無線信号の到達距離は同一であると仮定する方法である。無線信号到達距離が等しいので、経路要求メッセージを送信元から送信先へ配送するだけで、送信元から送信先への経路と送信先から送信元への経路を検

出することが可能である。□

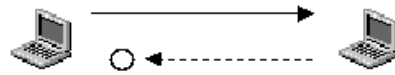


Figure 1: 双方向接続リンク

[片方向接続リンクも用いるルーティング]

移動コンピュータが送信する無線信号の到達距離は同一ではないと仮定する方法である。無線信号到達距離が同一ではないとすることで、無線信号の減衰、反射、回折や、移動コンピュータのバッテリー残量が異なるために無線信号出力電力が移動コンピュータごとに異なる環境、複数の無線通信メディアが混在するネットワーク環境に対応することが可能である。各モバイルコンピュータの無線信号到達距離は同一ではないとしているため、送信元からの経路要求メッセージによって得られる経路は送信元から送信先への経路のみである。よって、送信先から送信元への経路を検出するための手法が必要となる。□

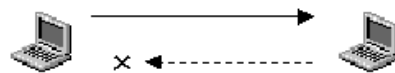


Figure 2: 片方向接続リンク

3 DSR

すべての移動コンピュータ間の接続が双方向であることを仮定しないオンデマンド型ルーティングプロトコルとして DSR (Dynamic Source Routing) [5] プロトコルがある。DSR では、送信元移動コンピュータ S から送信先移動コンピュータ D への経路を探索し、検出した経路 $R_{S \rightarrow D}$ を用いて S がメッセージをソースルーティングする。経路探索にはフラッディングが用いられる [4]。フラッディングとは、message diffusion protocol [8] を無線 LAN 環境に適用したものである。無線 LAN に利用される無線通信メディアの多くはブロードキャストベースであるため、ある移動コンピュータが送信した無線信号は、その到達範囲内にあるすべての移動コンピュータが受信することができる。ある移動コンピュータがメッセージ m をブロードキャストし、それを受信したすべての移動コンピュータが同様に m をブロードキャストする。これを繰り返すことによって、マルチホップで到達可能なすべての移動コンピュータに m を配送することが可能である。これがフラッディングである。DSR では、経路要求メッセージ RREQ をフラッディングによって S から D まで配送するとともに、 D で検出された $R_{S \rightarrow D}$ を S に伝えるために、 $R_{S \rightarrow D}$ を含む経路応答メッセージ RREP をフラッディングによって S まで配送する。以下に、DSR の経路探索プロトコルを示す。

[DSR プロトコル (図 7, 図 4)]

1. S は、 S のアドレスを格納した経路要求メッセージ RREQ (Route Request) を S の無線到達範囲内

- にあるすべての移動コンピュータ M_i へブロードキャストする。RREQには D があて先として指定される。
2. M_i が RREQ を受信する。このとき既に RREQ を受信していた場合、この RREQ を破棄する。初めて受信する RREQ である場合、受信した RREQ に自身のアドレスを加え、 M_i の無線信号到達範囲内にあるすべての移動コンピュータに RREQ をブロードキャストする。
 3. 2. を繰り返すことにより RREQ のうちの1つを D が受信する。このとき、RREQ には $R_{S \rightarrow D}$ 上にある移動コンピュータのアドレスのシーケンスが含まれる。 D は、 $R_{S \rightarrow D}$ を含む RREP を D の無線信号到達範囲内にあるすべての移動コンピュータ M_i に対してブロードキャストする。
 4. M_i が RREP を受信する。このとき既に RREP を受信していた場合は、この RREP を破棄する。初めて受信する RREP である場合、 M_i の無線信号到達範囲内にあるすべての移動コンピュータに RREP をブロードキャストする。
 5. 4. を繰り返すことにより RREP のうちの1つを S が受信する。これによって、 S は $R_{S \rightarrow D}$ を得ることができる。以降、データを含むメッセージを $R_{S \rightarrow D}$ を用いたソースルーティングにより配送する。□

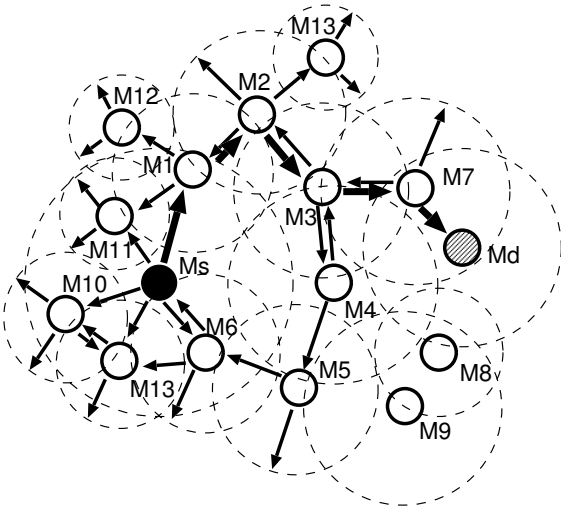


Figure 3: RREQ のフラッディング

4 LBSR

片方向接続を含むアドホックネットワークにおいて、送信元 S から送信先 D までの経路情報を S が取得するためには、 S から D への経路 $R_{S \rightarrow D}$ と D から S への経路 $R_{D \rightarrow S}$ が必要である。DSR では、これらの2つの経路は独立なフラッディングによって求められるのに対して、LBSR ではこれらを連結して得られるループ経路を探索する。特に、新しく検出したループ経路が既に検出されているループ経路の一部を含む場合、その共通部分においては制御メッセージをブロードキャストせず、ユニキャストで配送することによって通信オーバーヘッドを削減している。LBSR では、経路探索時に3種類の

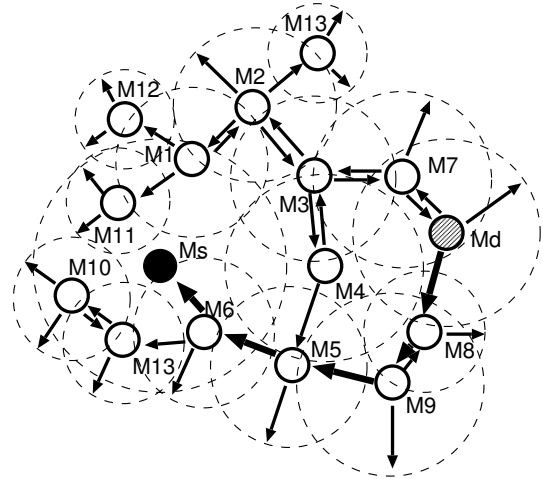


Figure 4: RREP のフラッディング

メッセージ $Lreq$ と $Lconf$ 、 $Lstop$ を用いる。 $Lreq$ は、 S から S へ戻るループ経路を探索するためのメッセージであり、経路上にある移動コンピュータのアドレスシーケンスが含まれている。 $Lconf$ には、 S から S へ戻るループ上のアドレスシーケンスが含まれている。 $Lconf$ は、このループ上をユニキャストで配送される。 $Lconf$ を受信した各移動コンピュータ M_i は、 $Lconf$ のアドレスシーケンスの情報から自分の1ホップ先に存在する移動コンピュータのアドレスを獲得し、以後 $Lreq$ メッセージを受信した場合、獲得した移動コンピュータにユニキャストで送信する。 $Lstop$ は、既に送信元 S が $R_{S \rightarrow D}$ を保持している場合、 $Lreq$ を受信するとそのループ経路に含まれる移動コンピュータに対して $Lstop$ を送信する。 $Lstop$ を受信した M_i は、以後受信した $Lreq$ メッセージを破棄する。これにより、 D を含むループ経路が検出された後に、経路探索のために交換される制御メッセージを削減することできる。

[LBSR プロトコル (図 5, 図 6)]

1. 送信元 S は $Lreq$ メッセージのアドレスシーケンスに自身を加え、無線信号到達範囲内に存在する移動コンピュータ M_i にブロードキャストする。
2. 送信元 S ではない移動コンピュータ M_i が $Lreq$ メッセージを受信した場合、以下の手順でメッセージを処理する。
 - $stop_flag_i = true$ の場合、 $Lreq$ メッセージを破棄する。
 - 自身が送信先 D であり、かつ、 $req_flag_i = true$ であるならば、 $Lreq$ メッセージを破棄する。
 - $req_flag_i = true$ であり、 $stop_flag_i = false$ である場合
 - $next_i = null$ の場合、 M_i は $Lconf$ メッセージを受信し、 $next_i$ が設定されるまで、経路情報を保持し待機する。
 - $next_i \neq null$ の場合、設定されている送信先に対し、 $Lreq$ メッセージのアドレスシーケンスの末尾に自身のアドレスを追加し、ユニキャストで送信する。
 - $req_flag_i = false$ の場合、 $Lreq$ メッセージのアドレス

シーケンスの末尾に自身のアドレスを追加し、無線信号到達範囲内にあるすべての移動コンピュータへブロードキャストする。このとき、 $req_flag_i = true$ とする。

3. 送信元 S ではない移動コンピュータ M_i が $Lconf$ メッセージを受信した場合、以下の手順でメッセージを処理する。

- $next_i = null$ の場合、 M_i は、 $Lconf$ メッセージのアドレスシーケンスにおける M_i の次のアドレスを $next_i$ に、 S までのホップカウントを示す $addr_num$ の値を hop_count_i にそれぞれ格納する。このとき、 $Lconf$ メッセージのアドレスシーケンスから自身のアドレスを削除し、 $addr_num$ をデクリメントした後に、この $Lconf$ メッセージを $next_i$ にユニキャストで送信する。
- $next_i \neq null$ の場合
 - hop_count_i の値が、 $Lconf$ メッセージの $addr_num$ よりも大きい場合、受信した $Lconf$ メッセージのアドレスシーケンスにおける M_i の次のアドレスを $next_i$ に、 $addr_num$ の値を hop_count_i にそれぞれ格納する。 $Lconf$ メッセージのアドレスシーケンスから自身のアドレスを削除し、 $addr_num$ をデクリメントした後にこの $Lconf$ メッセージを $next_i$ にユニキャストで送信する。
 - hop_count_i の値が、 $Lconf$ メッセージの $addr_num$ よりも小さい場合、受信した $Lconf$ メッセージのアドレスシーケンスから自身のアドレスを削除し、 $addr_num$ をデクリメントした後に、この $Lconf$ メッセージをアドレスシーケンスの先頭にある移動コンピュータにユニキャストで送信する。

4. $Lstop$ メッセージを受信した移動コンピュータ M_i は、 $stop_flag_i$ を $true$ にし、 $Lstop$ メッセージをアドレスシーケンスに格納されている次のノードに送信する。

5. $Lreq$ メッセージを受信した送信元 S は、以下の手順でメッセージを処理する。

- $detect_flag = false$ の場合
 - 受信した $Lreq$ メッセージのアドレスシーケンスに送信先 D が存在する場合、 S は $detect_flag$ を $true$ とし、 $Lreq$ メッセージのアドレスシーケンスを $Lconf$ メッセージに格納する。アドレスシーケンスから自身のアドレスを削除し、このシーケンスに含まれるアドレスの数を $addr_num$ に格納した後に、アドレスシーケンスの先頭にある移動コンピュータにこの $Lconf$ メッセージをユニキャスト送信する。
 - 受信した $Lreq$ メッセージのアドレスシーケンスに送信先 D が含まれない場合、 $Lreq$ メッセージのアドレスシーケンスを $Lconf$ メッセージに格納する。アドレスシーケンスから自身のアドレスを削除し、このシーケンスに含まれるアドレスの数を $addr_num$ に格納した後に、アドレスシーケンスの先頭にある移動コンピュータにこの $Lconf$ メッセージをユニキャスト送信する。
- $detect_flag = true$ の場合、 $Lreq$ メッセージのアドレ

スシーケンスを $Lstop$ メッセージに格納する。アドレスシーケンスから自身のアドレスを削除し、このシーケンスに含まれるアドレスの数を $addr_num$ に格納した後に、アドレスシーケンスの先頭にある移動コンピュータにこの $Lstop$ メッセージをユニキャスト送信する。

6. $Lstop$ メッセージを受信した送信元 S は、このメッセージを破棄する。

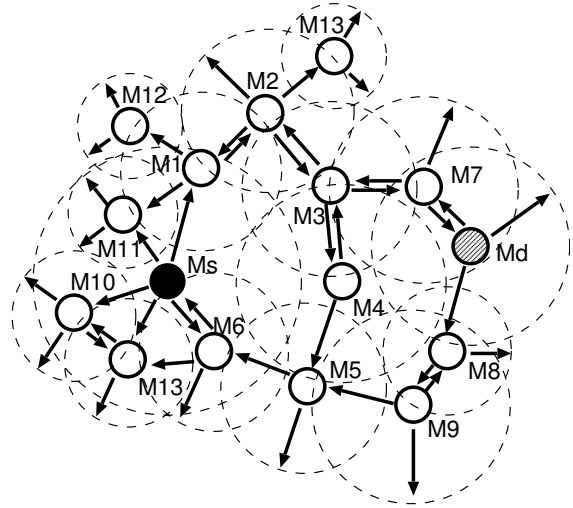


Figure 5: $Lreq$ のフラッディング

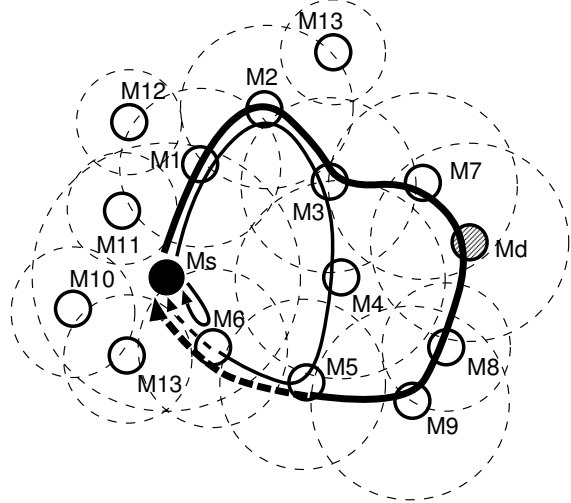


Figure 6: $Lconf$ のユニキャスト

5 LBSR の経路検出保証

本章では、LBSR が経路検出保証型プロトコルであること、すなわち送信元移動コンピュータ M_S から送信先移動コンピュータ M_D を経て M_S へと戻るループ経路が存在するならば、その 1 つを必ず M_S が検出することを証明する。

[性質 1]

M_S から M_D への経路が存在するならば、 $Lreq$ メッセージは、 M_S から M_D へ配送される。

(証明)

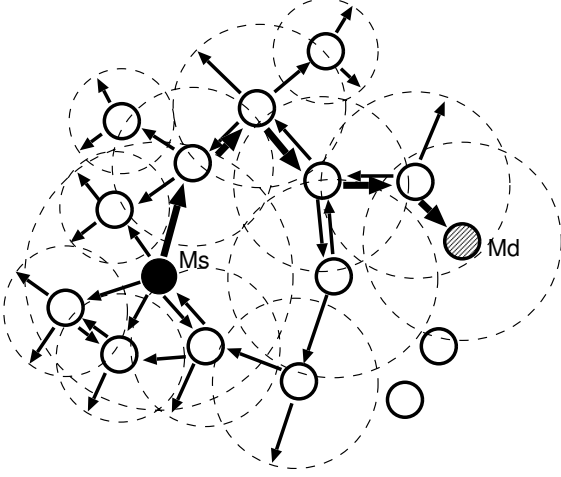


Figure 7: LBSR の性質 1

$Lreq$ メッセージはアドホックネットワーク内でフラッディングされる。したがって、 M_S からマルチホップ配送によってメッセージが到達可能なすべての移動コンピュータへ $Lreq$ は配送される。そのため、 M_S から M_D までの経路が存在するならば、 $Lreq$ メッセージは必ず M_D へ配送される。

[性質 2]

M_d から M_s への経路 $R' = \langle M_d(=M'_0), M'_1, \dots, M'_{n-1}, M_s(=M'_n) \rangle$ が存在するならば、この経路上の移動コンピュータ M'_i がブロードキャスト送信した $Lreq$ メッセージを M'_{i+1} が受信する。

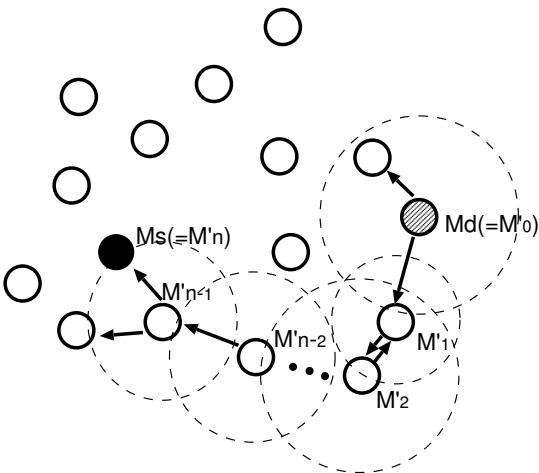


Figure 8: LBSR の性質 2

(証明)

R' が存在することと性質 1 より M'_i は M_s からマルチ

ホップ配送によってメッセージが到達可能である。したがって、 M'_i は $Lreq$ メッセージをブロードキャストする。また、 R' が存在することから無線リンク $|M'_i, M'_{i+1}|$ が存在する。したがって、この $Lreq$ メッセージを M'_{i+1} は受信する。

[性質 3]

M_D から M_S への経路 $R' = \langle M_d(=M'_0), M'_1, \dots, M'_{n-1}, M_s(=M'_n) \rangle$ が存在するならば、この経路上の移動コンピュータ M'_i は $Lconf$ メッセージを M'_{i+1} に送信する。

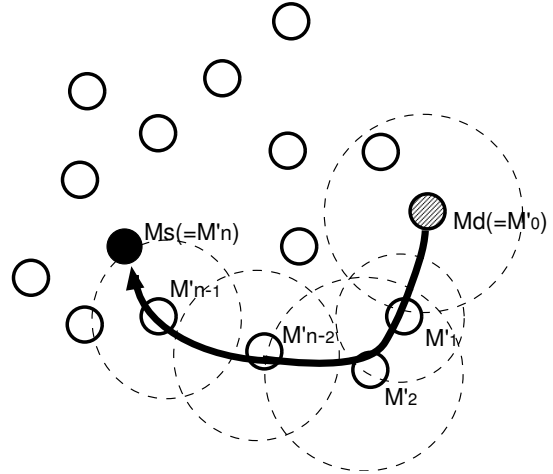


Figure 9: LBSR の性質 3

(証明)

R' が存在することから、無線リンク $|M'_{n-1}, M_s|$ が存在し、 M'_{n-1} がブロードキャスト送信した $Lreq$ メッセージを M_s が受信する。これによって $|M'_{n-1}, M_s|$ を含む M_s から M_s へと戻るループ経路が M_s によって検出され、これに沿って $Lconf$ メッセージが配送される。したがって、 M'_{n-1} は $Lconf$ メッセージを M_s に送信する。一方、 $M'_i (1 \leq i \leq n-1)$ が $Lconf$ メッセージを M'_{i+1} に送信したとする。この送信は無線リンク $|M'_i, M'_{i+1}|$ が存在し、かつこれを含む M_s から M_s へと戻るループ経路が M_s によって検出され、これに沿って $Lconf$ メッセージが配送されるときのみである。したがって、このとき M_s は M'_i から M'_{i+1} を通るマルチホップ配送によってメッセージが到達可能である。そのため、性質 2 によって M'_i が M'_{i-1} から受信した $Lreq$ メッセージは、 M'_i のブロードキャスト送信か検出済み経路に沿ったユニキャスト送信のいずれかを経て M_s へ到達する。したがって、 M'_{i-1} は $Lconf$ メッセージを M'_i に必ず送信する。以上により、すべての $M'_i (1 \leq i \leq n-1)$ は $Lconf$ メッセージを M'_{i+1} に送信する。

[性質 4]

M_D から M_S への経路 $R' = \langle M_d(=M'_0), M'_1, \dots, M'_{n-1}, M_s(=M'_n) \rangle$ が存在するならば、 M_s が送信した $Lreq$ メッセージの少なくとも 1 つは LBSR プロトコルによって M_d を経て M_s へと到達する。

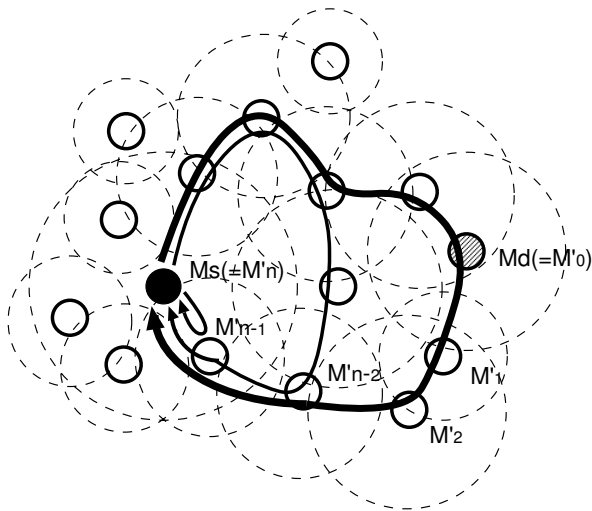


Figure 10: LBSR の性質 4

(証明)

性質 1 より、 M_s が送信した $Lreq$ メッセージを M_d は受信し、これをブロードキャスト送信する。また、 R' が存在することから、無線リンク $[M_d, M'_1]$ が存在する。以上により、 M_s が送信した $Lreq$ を M'_1 が受信する。一方、性質 3 より、 M'_1 は $Lconf$ メッセージを必ず送信することから、 M'_1 が受信したすべての $Lreq$ メッセージは M_s へ配送される。以上により、 M_s が送信した $Lreq$ メッセージの少なくとも 1 つは LBSR プロトコルによって M_d を経て M_s へと到達する。□

6 まとめと今後の課題

本論文では、片方向リンクを含むアドホックネットワークにおいて、送信元移動コンピュータを含む経路を検出するルーティングプロトコルである LBSR が、送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまで到達可能である場合、検出された経路の 1 つには送信先移動コンピュータが含まれることを証明し、LBSR が検出保証型ルーティングプロトコルであることを示した。今後は、片方向リンクもメッセージ配送経路として使用するアドホックルーティングプロトコルである DSR との比較を以下の評価により行なう。比較方法はシミュレーションを用いる。

- ノード台数と接続性の関係
- ノード台数、双方向リンクの割合、経路探索回数と制御メッセージ数、経路探索時間の関係
- ノード台数、双方向リンクの割合、各移動コンピュータの移動速度とキャッシュの有効数の関係

References

- [1] “Radio Equipment and Systems (RES); HIPER-LAN,” ETSI Functional Specifications (1995).
- [2] “Wireless LAN Medium Access control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” Standard IEEE 802.11 (1997).
- [3] Online Manual “socket,” Red Hat Linux.
- [4] Corson, M.S. and Ephremides, A., “A Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks,” ACM Journal of Wireless Networks, vol. 1, No. 1, pp. 61–81 (1995).
- [5] David, B., David, A., Hu, Y.C., Jorjeta, G. and Jetcheva, “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks,” Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-10.txt (2005).
- [6] Hedrick, C., “Routing Information Protocol,” RFC 1058 (1988).
- [7] Jiang, M., Li, J. and Tay, Y.C., “Cluster Based Routing Protocol(CBRP) Functional Specification,” Internet Draft, draft-ietf-manet-cbrp-00.txt (1999).
- [8] Moses, Y. and Roth, G., “On reliable message diffusion,” Proc. of the 8th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, pp. 119–128 (1989).
- [9] Moy, J., “Open Shortest Path First specification,” RFC 1131 (1989).
- [10] Perkins, C.E., “Ad Hoc Networking,” Addison-Wesley (2001).
- [11] Perkins, C.E. and Bhagwat, P., “Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers,” ACM SIGCOMM' 94, pp. 234–244 (1994).
- [12] Perkins, C.E. and Royer, E.M., “Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing,” Proc. of IEEE 2nd Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 90–100 (1999).
- [13] Sagawa, Y., Asano, T. and Higaki, H., “Loop-Based Source Routing Protocol for Mobile Ad-hoc Networks,” Proc. of the 17th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2003), pp. 834–837 (2002).
- [14] 卯木, 桧垣, “LBSR プロトコルのメッセージ数削減手法,” 情報処理学会研究報告, (to appear).
- [15] 佐川, 桧垣, “ループ経路接合によるアドホックルーティングプロトコル (C-LBSR),” 情報処理学会第 64 回全国大会論文集, No. 3, pp. 317–318 (2002).
- [16] 西澤, 萩野, 原, 塚本, 西尾, “アドホックネットワークにおける片方向リンクを考慮したルーティング方式,” 情報処理学会論文誌, vol. 41, No. 3, pp. 783–791 (2000).