

## アドホックネットワークにおけるループ型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

佐川 陽介 梶垣 博章

{sgw, hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

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より高い柔軟性と移動性を持つ。本論文では、移動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接続が存在することを仮定したオンデマンド型ルーティングプロトコル LBSR(Loop Based Source Routing) プロトコルについて述べ、経路探索に要する通信オーバーヘッドを削減した C-LBSR(Chained Loop Based Source Routing) を提案する。提案プロトコルでは、ネットワーク内に存在する複数のループ経路の結合として目的の経路を実現する方法を用いることにより、LBSR における制御メッセージのユニキャスト送信による効果に加え、さらに制御メッセージ数を削減することができる。経路探索に用いることにより、従来、我々が提案していた手法である LBSR に比べ、よりメッセージ数を削減するプロトコルとなっている。

## Loop-Based Source Routing Protocol for Ad-Hoc Networks

Yousuke Sagawa, Youhei Kanbayashi and Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University {sgw, kan, hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

In an ad-hoc network where only mobile computers are included, higher mobility and flexibility are achieved than an infrastructured network with access points. In this paper, we discuss LBSR (Loop-Based Source Routing) protocol which is an on-demand routing protocol supporting asymmetric wireless communication links. For achieving more efficient ad-hoc routing, this paper proposes C-LBSR(Chained Loop Based Source Routing) protocol where the target loop route is achieved as a sequence of smaller loop routes. Here, each detected loop routes is not informed of the source mobile computer but carried with control messages to reduce the number of them.

## 1 背景と目的

近年、コンピュータの小型化と高性能化により、ノート型パーソナルコンピュータや PDA といった携帯型の移動コンピュータが広く利用されるようになってきた。また、ネットワーク技術の発達と WWW をはじめとするネットワークアプリケーションの普及により、ネットワークに接続されるコンピュータの比率が急速に高まっている。このような背景から、移動コンピュータをネットワークに接続して利用するモバイルコンピューティングへの要求が高まっており、IEEE802.11 [1] や HIPERLAN [2] などの無線 LAN 技術が研究開発されている。現在、広く利用されている無線 LAN 環境では、直接通信できない移動コンピュータ間の通信は、各無線通信セルに配置されたアクセスポイントを介して行なわれる。しかし、このような方法では、災害現場やイベント会場などで一時的なネットワークを構築する場合、ネットワーク構築に要する時間的、金銭的コストが大きくなってしまふ。このような背景から、アクセスポイントの存在を仮定せず、直接通信できない移動コンピュータ間の通信を、他の移動コンピュータがルーティングを行なうことによって実現するアドホックネットワークの研究が進められている。ここでは、ネットワークに専用のルータは接続されおらず、移動コンピュータがメッセージのルーティングを行なう。これによって、移動コンピュータのみからなる、より柔軟性の高いコンピュータネットワークを構築することが可能となる。アドホックネットワークは、複数の移動ロボット群からなる協調型地雷除去システムのようなアクセスポイントの設置が困難な状況におけるネットワーク構築手段としても有効である。

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として、AODV [5] や DSDV [6] などが提案されている。これらのプロトコルでは、すべての移動コンピュータの無線信号到達範囲の大きさは同一かつ一定であると仮定している。すなわち、2 台の移動コンピュータ間の接続はすべて双方向であるという前提に基づいた設計がなされている。しかし、無線通信に用いられる電磁波は、反射、回折、透過を行なうため、無線信号到達範囲の大きさはすべての移動コンピュータで同一であるとは限らない。また、各移動コンピュータの無線信号到達範囲の大きさも一定とは言えず、時間とともに変化する。そのため、2 台の移動コンピュータの間に片方向接続が存在する場合がある。ネットワーク内に複数の片方向接続が存在する場合においても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って経路構築可能なルーティングプロトコル LBSR (Loop-Based Source Routing) [3, 4] が提案されている。ここでは、送信元を含むループ経路を再利用することにより、片方向接続を含むネットワークを対象としたルーティングプロトコルである DSR [7] に比べて、フラッディングのオーバーヘッドを削減している。しかし、プロトコル実行中に検出したすべてのループ経路の情報を送信元に集約しているため、経路探索時間、必要なメッセージ数ともに大きくなっている。本論文では、送信元を含まないループ経路を探索し、その接合として、送信元と送信先とともに含むループ経路を構築する新しいプロトコル C-LBSR (Chained Loop Based Source Routing) を提案する。

## 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なうためには、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、以下の 2 つに分類される。

### [プロアクティブ型]

通信要求の有無に関わらず、各移動コンピュータが他のすべての移動コンピュータへ至る経路の次ホップをルーティングテーブルに保持する方法であり、DSDV [6] がこれにあたる。この方法では、経路情報が常時最新に維持されているため、通信開始時に時間オーバーヘッドを必要としない。しかし、ネットワークトポロジの変化をただちにすべての移動コンピュータのルーティングテーブルに反映させる必要があるため、多数の制御メッセージを交換しなければならない。□

### [リアクティブ型]

移動コンピュータの位置が経時的に変化するアドホックネットワークにおいては、ネットワークトポロジの変化を常時ルーティングテーブルに反映させる通信オーバーヘッドが大きい。そこで、通信開始時に送信元から送信先までの通信経路を探索し、検出された経路を用いてメッセージをルーティングする方法がリアクティブ型 (オンデマンド型) である。通信要求が発生してからデータの配送が開始されるまでの遅延が大きいという問題点があるが、AODV [5] や DSR [7] をはじめとして、現在までに研究開発された多くのプロトコルが本手法を用いている。□

一方、無線信号には光や電波といった電磁波が用いられる。無線信号を用いたアドホックネット

ワークでは、多くの有線ネットワークのように各移動コンピュータ間の接続が必ずしも双方向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ることを仮定している。そこで、本論文では、アドホックネットワーク内に片方向接続が複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について議論する。双方向接続のみでなく、片方向接続もメッセージの配送経路に用いることによって、経路検出の成功率を高めることができる。なお、本論文では、検出した配送経路を送信元が獲得し、その経路をデータメッセージのヘッダに格納し、各移動コンピュータがこれを用いてメッセージ配送するソースルーティングを対象とする。オンデマンド型経路探索における、片方向接続を用いないルーティングプロトコルと片方向接続も用いるルーティングプロトコルとの相違は、以下の通りである。

#### [片方向接続を用いないルーティング (図 1)]

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から、経路要求メッセージを用いて、送信元から送信先への経路  $R_{S \rightarrow D}$  を送信先が検出すると、この経路を反転して得られる送信先から送信元への経路を用いて、 $R_{S \rightarrow D}$  を送信元へ伝えることが可能である。しかし、片方向接続を用いるプロトコルに比べ、経路検出の成功率が低い。□

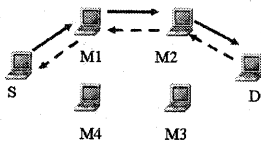


図 1: 片方向接続を用いないルーティング

#### [片方向接続を用いるルーティング (図 2)]

それぞれの移動コンピュータが送信する無線信号の到達範囲は同一でなく、また一定でもないと仮定する方法である。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  $R_{S \rightarrow D}$  のみである。 $R_{S \rightarrow D}$  は送信先で検出されるため、これを用いてメッセージをソースルーティングするためには、 $R_{S \rightarrow D}$  を送信元に伝えるための送信先から送信元までの経路を検出することが必要である。□

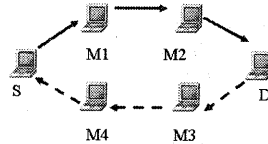


図 2: 片方向接続を用いるルーティング

### 3 従来手法

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) [7] 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。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 の経路探索アルゴリズムを示す。

#### [DSR による経路探索 (図 3, 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。

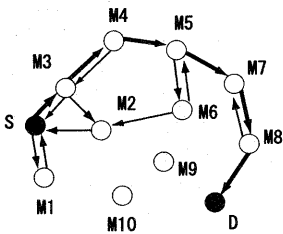


図 3:  $R_{S \rightarrow D}$  の探索

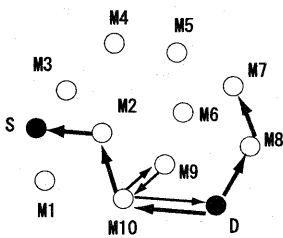


図 4:  $R_{D \rightarrow S}$  の探索

## 4 提案プロトコル

### 4.1 LBSR(図 5, 図 6)

移動コンピュータ間のすべての接続が双方向であるアドホックネットワークにおいては、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  $D$  までの経路  $R_{S \rightarrow D}$  を検出すれば、同時に経路  $R_{D \rightarrow S}$  を検出したことになる。 $R_{S \rightarrow D}$  を反転させた  $R_{D \rightarrow S}$  を用いることで、 $D$  で検出された  $R_{S \rightarrow D}$  を  $S$  が得ることができる。しかし、片方向接続を含むアドホッ

クネットワークにおいては、 $R_{D \rightarrow S}$  は  $R_{S \rightarrow D}$  の反転とはなっていない。 $S$  から  $D$  までの経路  $R_{S \rightarrow D}$  を  $S$  が得るためには、 $S$  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、これらを 2 つの独立なフラッディング [8] によって検出している。これに対して、LBSR では、 $R_{S \rightarrow D}$  と  $R_{D \rightarrow S}$  を連結して得られるループ経路を探索している。特に、求める経路である  $S$  から  $D$  を通り  $S$  に戻るループ経路を探索する途中で検出される  $S$  から  $D$  を通らずに  $S$  に戻るループ経路をユニキャストで利用することにより、マルチキャストの利用を削減し、経路探索に要するプロトコルオーバーヘッドを低減している。

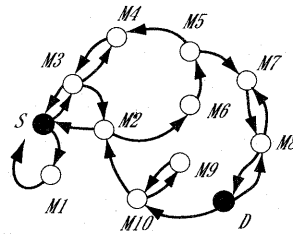


図 5: LBSR におけるループ経路探索

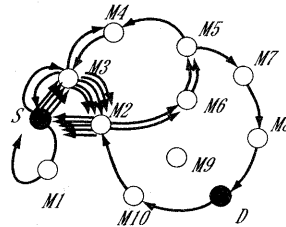


図 6: LBSR におけるループ経路構築

LBSR では、経路探索時に 2 種類のメッセージ LREQ と LOOP 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のシーケンスが格納されている。LOOP には、 $S$  から  $S$  に戻るループ経路上のアドレスのシーケンスが含まれている。LOOP は、このループ経路上をユニキャストで配送され、受信した移動コンピュータに  $S$  へ至る経路を通知する。また、各移動コンピュータ  $M_i$  は、2 種類の経路キャッシュを持つ。LREQ キャッシュには、送信元  $S$  から  $M_i$  までの経路(アドレスのシーケンス)が格納される。また、LOOP キャッシュには、 $M_i$  から  $S$  までの経路が格納される。LREQ キャッシュ、LOOP キャッシュへの経路

追加は、それぞれ LREQ メッセージ、LOOP メッセージの受信時になされる。LOOP メッセージは、LOOP キャッシュの経路情報を用いてユニキャストされる。

#### [LBSR プロトコル]

1.  $S$  は、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 LREQ をブロードキャストする。
2.  $M_i$  または  $D$  が、LREQ を受信したならば、以下のいずれかの処理を行ってから、LREQ に含まれる経路を LREQ キャッシュに保存する。
  - 2-1. LREQ キャッシュが空であるならば、ただちに、LREQ を自身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ブロードキャストする。ただし、LREQ をブロードキャストする前に自身のアドレスを LREQ に含まれるアドレスシーケンスの末尾に加える。
  - 2-2.  $M_i$  の LREQ キャッシュが空でないならば、LOOP キャッシュに含まれる経路に沿ってユニキャストで LREQ を送信する。 $M_i$  は LREQ をユニキャストする前に自身のアドレスを LREQ に含まれるアドレスシーケンスの末尾に加える。LOOP キャッシュが空である場合には、LOOP を受信して LOOP キャッシュに経路が格納されるまで待つ。このとき、LREQ は LOOP にピギーバックされる。
  - 2-3.  $D$  の LREQ キャッシュが空でないならば、この LREQ を破棄する。
3.  $S$  が  $D$  をアドレスシーケンスに含まない LREQ を受信したならば、LREQ に含まれるアドレスシーケンスを用いてソースルーティングされる LOOP をユニキャストで送信する。
4.  $M_i$  が LOOP を受信したならば、これに含まれるアドレスシーケンスから  $S$  への経路を取得し、これを LOOP キャッシュに保存する。そして、LOOP に含まれるアドレスシーケンスを用いて、LOOP をユニキャストで送信する。
5.  $S$  が  $D$  のアドレスをシーケンスに含む LREQ を受信することで  $R_{S \rightarrow D} + R_{D \rightarrow S}$  が得られる。以降、 $S$  は LREQ を受信しても LOOP を送信しない。□

#### 4.2 C-LBSR(図7, 図8)

LBSR では、 $S$  から  $D$  を通らずに  $S$  に戻る経路を検出すると、その情報を  $S$  に伝達し、LOOP によってループ経路上の移動コンピュータにこの経路

を伝える。このため、経路探索に要する時間とメッセージ数のオーバーヘッドが大きい。検出済みのループ経路  $L$  上にある移動コンピュータ  $M$  が LREQ を受信するとき、新たに検出されたループ経路  $L'$  との関係には次の2つの場合がある。

- (A)  $L$  に含まれるが  $L'$  に含まれない移動コンピュータが存在する。
- (B)  $L$  に含まれる移動コンピュータはすべて  $L'$  に含まれる。

ここで、 $L' - L$  は、自身を含むループ経路がはじめて検出された移動コンピュータの集合である。 $S$  から  $D$  への経路を検出するためには、 $L' - L$  に含まれる移動コンピュータに検出したループ経路を伝えなければならない。(A) の場合、 $L' - L$  に含まれる移動コンピュータに検出したループ経路を伝えるためには  $S$  を経由しなければならない。しかし、(B) の場合、 $M$  から  $S$  を経由せずに  $L' - L$  に含まれるすべての移動コンピュータを通り  $M$  に戻るループ経路が存在する。このループ経路は、 $L$  に接合する新しいループ経路である。本論文では、この新しいループ経路に沿って LOOP を配送する C-LBSR プロトコルを提案する。C-LBSR プロトコルでは、 $S$  から  $D$  までの経路は  $S$  ではなく  $D$  で検出される。そこで、この経路を  $S$  に伝えるためのメッセージ LREP を導入する。

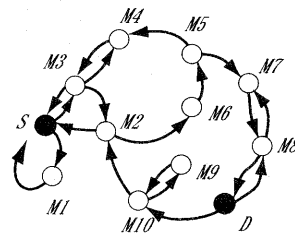


図7: C-LBSR におけるループ経路探索

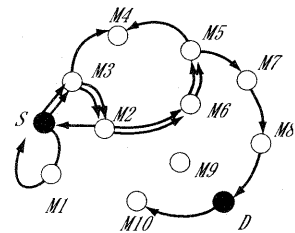


図8: C-LBSR におけるループ経路構築

#### [C-LBSR プロトコル]

1.  $S$  は、LREQ を  $S$  の信号到達範囲内にあるすべての移動コンピュータにブロードキャストする。
2.  $M_i$  または  $D$  が、LREQ を受信したならば、以下の処理を行ってから、LREQ に含まれる経路を LREQ キャッシュに保存する。
  - 2-1. LREQ キャッシュが空であるならば、ただちに、LREQ を自身の信号到達範囲内にあるすべての移動コンピュータにブロードキャストする。ただし、LREQ をブロードキャストする前に自身のアドレスを LREQ に含まれるアドレスシーケンスの末尾に加える。
  - 2-2.  $M_i$  の LREQ キャッシュが空でないならば、LREQ に含まれる経路と LOOP キャッシュに含まれる経路の接合によって作られるループ経路を含む LOOP を作成する。このループ経路から、 $M_i$  を含む最小のループ経路を作成し、この経路を用いたソースルーティングによって LOOP をユニキャスト配送する。LOOP キャッシュが空である場合には、LOOP を受信するまで待つ。
  - 2-3.  $D$  の LREQ キャッシュが空でないならば、この LREQ を破棄する。
3.  $S$  が  $D$  をアドレスシーケンスに含まない LREQ を受信したならば、LREQ に含まれるアドレスシーケンスを用いてソースルーティングされる LOOP をユニキャストで送信する。
4.  $S$  または  $M_i$  が LOOP を受信したならば以下の処理を行ってから、ソースルーティングによりこの LOOP をユニキャスト送信する。
  - 4-1. もし、LOOP キャッシュが空ならば、LOOP に含まれるループ経路を用いて  $S$  への経路を取得し、LOOP キャッシュに保存する。
5.  $D$  が LOOP を受信したならば、これに含まれるループ経路を用いて  $S$  への経路を取得する。この経路を用いたソースルーティングにより、LREQ キャッシュに含まれる経路を含む LREQ を  $S$  へユニキャスト配送する。
6. LREQ の受信により、 $S$  は  $D$  への経路を得る。

## 5 評価

LBSR と C-LBSR について経路探索に要するメッセージ数を比較評価する。シミュレーション環境は表 1 の通りである。

表 1:シミュレーション環境

無線 LAN プロトコル	IEEE802.11
実験領域	500m×500m
移動コンピュータ数	20~100

シミュレーション結果を図に示す。LBSR と比較して C-LBSR では必要メッセージ数が削減されていることが分かる。

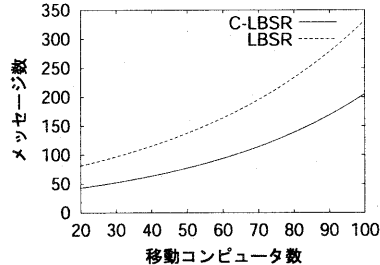


図 9: シミュレーション結果

## 6 まとめと今後の課題

本論文では、検出したループ経路情報を送信元に集約しないループ探索に基づく新しい経路探索プロトコル C-LBSR を提案し、その有効性をシミュレーションにより明らかにした。今後はマルチキャストプロトコルへの拡張を行なう。

## 参考文献

- [1] "Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications," Standard IEEE802.11 (1997).
- [2] "Radio Equipment and Systems(RES); HIPER-LAN," ETSI Functional Specifications (1995).
- [3] 佐川, 松垣, "アドホックネットワークにおけるループ型ルーティングプロトコル," 第 9 回情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 359-360 (2001).
- [4] 神林, 佐川, 松垣, "ループ探索に基づいたアドホックルーティングプロトコルの実装," 情報研報, Vol.2002, No.12, pp. 19-24 (2001).
- [5] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," Proc. of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 99-100 (1999).
- [6] Perkins, C.E. and Bhagwat, P., "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," ACM SIGCOMM' 94, pp. 234-244 (1994).
- [7] David, B., David, A., Hu, Y.C., Jorjeta, G., Jetcheva, "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-04.txt (2000).
- [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).