

MR-AODV の接続性評価

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科

椎名 邦充 桧垣 博章

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

アドホックネットワークのためのルーティングプロトコルとして DSR(Dynamic Source Routing Protocol)、AODV(Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol) などが提案されている。これらのプロトコルでは、メッセージ配送を開始する直前に送信元から送信先までの経路構築を行ない、構築された経路情報のみを管理し、これを用いてメッセージ配送を行なうオンデマンド型のプロトコルである。また、構築される経路が 1 つのみである単一経路構築プロトコルである。しかし、アドホックネットワークでは、コンピュータの移動などによる無線信号の到達範囲の変動やコンピュータの電源断などによってリンクが頻繁に切断される。このため、単一の経路のみではなく、迂回経路となり得る複数の経路を構築する複数経路構築プロトコルが必要である。本論文では、AODV を拡張し、未接続状態のバックワードリンクを互いに接続することによって複数の経路を構築する MR-AODV(Multiple-Route Ad-hoc On-Demand Distance Vector) ルーティングプロトコルを提案する。また、提案する MR-AODV プロトコルによって従来の複数経路探索プロトコルと比較してより多数の経路を検出することにより、より高い接続性を実現していることを GloMoSim シミュレータ上で実験、検証する。

Connectivity Evaluation in MR-AODV Ad-hoc Routing Protocol

Kunimitsu Shiina and Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

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

Several routing protocols, e.g. DSR(Dynamic Source Routing Protocol) and AODV(Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol), have been proposed for routing data packets in ad-hoc networks. These are on-demand routing protocols. Only when a node requires to transmit data packets, it searches a route to a destination node. In addition, these are single-path protocols which detect only one route. However, in an ad-hoc network, due to mobility of nodes and instability of communication links, multiple-route protocols are required. In this paper, we propose a novel multiple-route protocol MR-AODV(Multiple-Route On-Demand Distance Vector Routing Protocol) where separated reverse path fragments are connected to achieve additional routes. According to simulation results, more additional routes are detected in our protocol than MNH protocol.

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 [1] や HIPER-LAN [2] 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。従来の移動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 (Infrastructure 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。有線ネットワークでは、距離ベクトルに基づく RIP (Routing Information Protocol) [4] 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ー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。

そこで注目されているのがリアクティブ (Reactive) 型あるいはオンデマンド (On-Demand) 型のルーティングプロトコルである。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構築を行なう。そして、各移動コンピュータは構築した経路のみを管理し、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、DSR [3]、LBSR [14]、C-LBSR [15]、

AODV [12] などが提案されている。

しかし、アドホックネットワークでは、コンピュータの移動やバッテリー切れによる電源断、電磁波ノイズなどによって移動コンピュータ間のリンクが頻繁に切断される。このため、単一経路構築のルーティングプロトコルでは、経路上のリンクが切断された場合、再度経路構築を行なわなければならない。そこで、経路構築時に迂回経路となり得る複数の経路を構築するプロトコルが必要である。本論文では、AODV を拡張し、未接続状態の枝経路 (ブランチルート) を互いに接続することで複数の経路を構築する MR-AODV (Multiple-Route Ad-hoc On-Demand Distance Vector) プロトコルを提案する。また、シミュレーションによって既存のルーティングプロトコルと性能を比較する。

2 従来手法

これまでに提案された多くのアドホックルーティングプロトコルは、Message Diffusion Protocol [8] を無線 LAN 環境に適用したフラッディングという手法を用いている。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。

AODV [12] では、送信元 S からルート要求メッセージ RREQ (Route Request) がフラッディングされると、中間移動コンピュータ M_i は最初に受信した RREQ を送信した移動コンピュータを上流移動コンピュータとした逆リンク (バックワードリンク) を設定し、RREQ を再ブロードキャストする。RREQ が送信先 D に到達すると、 D はルート応答メッセージ RREP (Route Reply) をバックワードリンクに沿ってユニキャストする。RREP を受信した中間移動コンピュータ M_i は、この RREP を送信した移動コンピュータを下流 (次ホップ) 移動コンピュータとした順リンク (フォワードリンク) をルーティングテーブルに登録し、設定したバックワードリンクに沿って RREP をユニキャストする。RREQ を受信したが RREP を受信しなかった中間移動コンピュータは、タイムアウトによって設定したリーバースリンクを解除する。RREP が S に到達すると、 S から D に至る経路 $R_{S \rightarrow D}$ が構築される (図 1)。すなわち、 S および経路 $R_{S \rightarrow D}$ 上にあるすべての中間移動コンピュータ M_i のルーティングテーブルにフォワードリンクが設定され、これに沿ってアプリケーションメッセージを転送するこ

とによって、 S から D までの配送が可能となる。

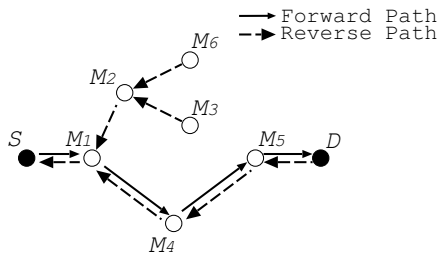


図 1: AODV

AODV [12]、DSR [3]、LBSR [14]、C-LBSR [15] は、いずれも単一経路構築のルーティングプロトコルである。構築された送信元 S から送信先 D への経路を用いてメッセージ配送を行なっているときに、その経路上にある中間移動コンピュータの移動やバッテリー容量切れによる電源断によって経路上にあるいずれかのリンクが切断された場合、再度経路構築を行なわなければならない。経路構築では、ルート要求メッセージをフラッディングするため、衝突、競合が発生する [13]。経路上にはない移動コンピュータもルート要求メッセージをブロードキャストするため、要する通信コストが大きい。そこで、複数経路構築ルーティングプロトコルへの要求が高まっている。これまで、複数経路構築プロトコルとして、MultipathDSR [10]、SMR [7]、AODV-BR [6]、MNH [5] などが提案されている。

MultipathDSR と SMR は、ソースルーティングを行なう DSR を拡張したプロトコルである。送信元 S からルート要求メッセージ RREQ がフラッディングされ、送信先 D に到達すると、 D は到達した複数の RREQ に格納された経路の中から重複部分のない経路を選別する。これらを格納したルート応答メッセージ RREP を S に送信することで、 D への複数の経路を S が得ることができる。

一方、AODV-BR、MNH では、テーブルベースルーティングを行なう AODV を拡張して複数の経路を構築する。AODV を複数経路構築プロトコルに拡張するために AODV-BR では、無線通信メディアがブロードキャストベースであることを利用する。ここで、AODV によって構築される経路をプライマリルートと呼ぶことにする。プライマリルートに含まれない移動コンピュータも RREP を受信する。リンクの切断を検出した中間移動コンピュータがルート変更要求メッセージを無線信号到達範囲内にブロードキャストし、このメッセージを RREP を受信した移動コンピュータが受信することによって、この移動コンピュータを中間移動コンピュータとして含む迂回経路への切替えを行なう。ただし、この方法では、プライマリルートから 1 ホップ外れた経路への切替えしか行なうことができない。

MNH は、RREQ のフラッディングを AODV と同様の方法で行なう。中間移動コンピュータは、2 回目以降に受信した RREQ に対して、1 回目と同様にバックワードリンクを設定する。ただし、RREQ をブロードキャストせずに破棄する。RREP は複数設定されたバックワードリンクに沿って配送される。また、中間移動コンピュータが複数回 RREP を受信する場合は、受信した RREP を送信した移動コンピュータへのフォワードリンクを設定し、2 回目以降に受信した RREP を破棄する。これにより複数の経路が構築される。しかし、MNH の手法では複数の経路を構築できるケースは稀である。図 1 において、 $S \rightarrow M_1 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \rightarrow D$ というプライマリルートに対して、 $S \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_5 \rightarrow D$ という迂回路を構築できるのは、 M_5 が M_4 からの RREQ を受信してから RREQ をブロードキャストする（これは M_3 によって受信される）までの間に M_3 が RREQ をブロードキャストする場合のみである¹。もし、 M_3 よりも先に M_5 が RREQ をブロードキャストするならば、バックワードリンクは図 2 のように設定され、複数の経路を構築することができない。

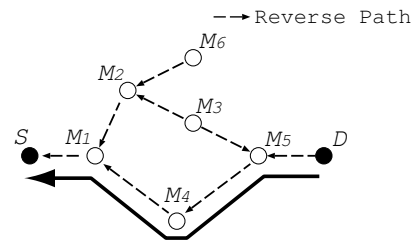


図 2: MNH における複数経路構築失敗例

以上のことから、本論文では図 2 のような状況でも複数の経路を構築することが可能な MR-AODV (Multiple Route Ad-hoc On-Demand Distance Vector) ルーティングプロトコルを提案する。

なお、無線ネットワークでは、電波の回折、干渉などによる無線信号の到達範囲の変動が起こるため、有線ネットワークのように通信が常に双方向で行なわれるとは限らない。一方からのみ送信可能な、片方向通信が行なわれる場合がある。DSR、LBSR、C-LBSR は片方向通信路を経路として利用可能であるルーティングプロトコルである。本論文では、すべての通信路は双方向であると仮定する。

3 MR-AODV ルーティングプロトコル

3.1 AODV の複数経路構築への拡張

AODV は、送信元移動コンピュータ S から RREQ をフラッディングすることによって、 S を最上流として

¹RTS/CTS を用いて排他的にブロードキャストが行なわれているものと仮定する。

中間移動コンピュータの上流、下流の関係を暫定的に決定する。このとき、各中間移動コンピュータは唯一の上流移動コンピュータを持ち、この上流移動コンピュータに対してバックワードリンクを設定する。つまり、 S を根 (ルート) とし、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対して張る木 (Spanning Tree) が構築される。このとき、バックワードリンクのうち、連続した1組のバックワードリンク列だけが S から送信先コンピュータ D に到達する。すなわち、 D から S までの1つのバックワードルート (プライマリバックワードルート) と、プライマリバックワードルートに接続し、途中で延びた複数の枝経路 (ブランチバックワードルート) が構築される (図1)。

D から S までのプライマリバックワードルートに沿って RREP を配送し、中間移動コンピュータがルーティングテーブルに D を送信先とするメッセージの転送先が RREP の送信移動コンピュータであることを設定することによって、フォワードリンクを作成する。このとき、RREP を受信しない移動コンピュータは、タイムアウトによって自身が設定したバックワードリンクを削除する。AODV が単一経路構築プロトコルであるのは、作成したバックワードルートのうち、1つのみが送信先 D に接続するためである。そこで、ブランチバックワードルートを互いに接続することで複数経路構築プロトコルへ拡張することが可能である。

しかし、ブランチバックワードルートを相互接続するときには、上流、下流の区別を壊すことなく接続しなければならない。図3のように異なるブランチバックワードルートに含まれる移動コンピュータ間 (M_2, M_3) を接続する場合、送信元から遠いバックワードリンク $M_3 \rightarrow M_5$ は $S \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_5 \rightarrow D$ という迂回経路を構築するために、上流、下流の関係を反転させなければならない。

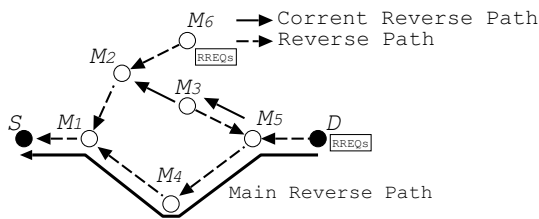


図 3: バックワードリンクの接続と反転

そこで、ブランチバックワードルート $M_6 \rightarrow M_2 \rightarrow M_1$ 、 $M_3 \rightarrow M_5$ は、それぞれプライマリバックワードルート上の1つの移動コンピュータに接続していることに着目する。プライマリバックワードルートは、上流、下流の関係が確定したリンク列であり、それに接続する $M_6 \rightarrow M_2 \rightarrow M_1$ 、 $M_3 \rightarrow M_5$ のようなプライマリバックワードリンクの枝経路となるブランチバックワード

ルートは、接続点となる移動コンピュータ (M_1 と M_5) の S からのホップ数 (枝番号) を基準として上流、下流の区別がなされると考えられる。そこで、MR-AODV では確定されたリンクとの接続点を求め、それぞれの枝番号を比較することでリンクの接続を行なう。

3.2 枝番号による上流、下流の判別

MR-AODV では、RREP をプライマリバックワードルートのみでなく、ブランチバックワードルートにも配送する。構築済みのプライマリバックワードルートとの接続点となる移動コンピュータの S からのホップ数を枝番号とするため、MR-AODV では RREP をプライマリバックワードルートに沿って配送する際に枝番号を割り当てる。

RREQ のフラッディングの際にホップ数をカウントすることにより、 S から D までのプライマリバックワードルートに沿った経路のホップ数を知ることができる。これを RREP に付加し、プライマリバックワードルートに沿って配送しながら (図3)1 ずつデクリメントすることで、プライマリバックワードルートに含まれる移動コンピュータを接点とするブランチバックワードルートの枝番号が与えられる。プライマリバックワードルートに含まれる移動コンピュータは RREP を必ず下流移動コンピュータのうちの1つから受信し、それを唯一の上流移動コンピュータと他の下流移動コンピュータに送信する。この下流移動コンピュータはブランチバックワードルートに含まれる。このように、ブランチバックワードルートに含まれる移動コンピュータは上流移動コンピュータから RREP を受け取ることを利用して、自身がプライマリバックワードルートではなくブランチバックワードルートに含まれることを認識する。RREP を上流移動コンピュータから受信した移動コンピュータは、RREP に格納されたホップ数を自身から分岐するブランチバックワードルートの枝番号として保存する。

例えば図4の場合、プライマリバックワードルート $D \rightarrow M_4 \rightarrow M_3 \rightarrow M_2 \rightarrow M_1 \rightarrow D$ に対し、移動コンピュータ M_4 で接続しているバックワードルート $M_9 \rightarrow M_4$ 上の移動コンピュータには枝番号4、移動コンピュータ M_1 で接続しているバックワードリンク $M_8 \rightarrow M_6 \rightarrow M_5 \rightarrow M_1$ 、 $M_7 \rightarrow M_5 \rightarrow M_1$ 上の移動コンピュータは枝番号1を持つ。

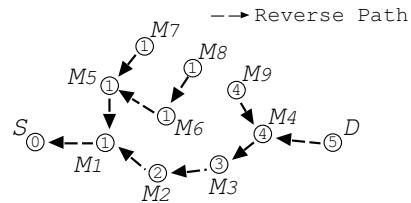
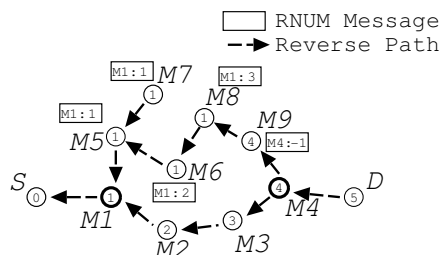


図 4: 同一枝番号をもつバックワードルート

一方、 M_7 、 M_8 に注目すると、これらも互いに直接通信可能であるが、枝番号が共に 1 であり、上流、下流の区別ができない。しかし、 $S \rightarrow M_1 \rightarrow M_5 \rightarrow M_7 \rightarrow M_8 \rightarrow M_9 \rightarrow M_4 \rightarrow D$ という迂回経路を構築することが可能であることから M_7 と M_8 を接続することが望ましい。 M_8 と M_9 の接続により上流、下流の区別がされた $M_8 \rightarrow M_6 \rightarrow M_5 \rightarrow M_1$ と $M_9 \rightarrow M_4$ を接続することで新しく構築されたルートに含まれる移動コンピュータでは、新たに上流、下流関係が定められる。新しく構築された経路 $S \rightarrow M_1 \rightarrow M_5 \rightarrow M_6 \rightarrow M_8 \rightarrow M_9 \rightarrow M_4 \rightarrow D$ は移動コンピュータ M_1 、 M_4 を接続点としてプライマリバックワードルートに接することから、 M_1 、 M_4 から再番号割り当てメッセージ RNUM を送信することで M_5 、 M_6 、 M_8 、 M_9 のホップ数とこれらに接続する枝 (ブランチバックワードルート) の枝番号を割り当てる (図 5)。



再番号割り当てを行なうことで、接続できなかったブランチバックワードルートは新しく構築された経路に含まれる1つの移動コンピュータに接続するブランチバックワードルートとなる。これらのブランチバックワードルートのいくつかは、新しい枝番号を用いてプライマリバックワードルートに直接接続するブランチバックワードルートと同じように上流、下流の区別をすることが可能となり、互いに接続される。この手続きを再帰的に適用することにより多数の迂回経路を構築することができる。

無線通信メディアがブロードキャストベースであることから、RREQ、RREP など経路構築に用いる制御メッセージは、無線信号到達範囲内にあるすべての移動

自身との関係は、制御メッセージに含まれる上流移動コンピュータアドレスを用いて決定することができる。自身と同じ経路に含まれている場合は、送信元に近い方が「上流」、遠い方が「下流」である。「並行」とは、自身が含まれているものとは異なる他のブランチルートに含まれていることを示す。これらのいずれでもない場合は「未定」とする。

図 6 に経路探索開始からの時間に対する有効経路数の変化の一例を示す。ここで、有効経路数とは、ルーティングプロトコルによって検出され、コンピュータの移動によって切断されていない経路の数であり、データパケットの配送に利用可能な経路の総数である。この経路数が 0 になったとき、ルーティングプロトコルによ

て再経路探索を行なうことになる。有効経路数の最大を比較すると、MNH で 1.98×10^3 となっているのに対して、MR-AODV では 2.56×10^5 と大幅に拡大している。その結果、有効経路数が 0 になるまでの時間、すなわち、再経路探索までの時間は拡大している。AODV、AODV-BR、MNH で、それぞれ 6.76×10^2 ms、 6.08×10^3 ms、 6.15×10^4 ms であるのに対して、MR-AODV では 1.83×10^5 ms となっている。図 7 は、移動コンピュータ数を変化させた場合の接続時間の測定結果である。MR-AODV は、得に移動コンピュータ密度が高い場合に有効に機能し、接続時間を AODV、MNH に対してそれぞれ 79.1%、72.4% 延長している。

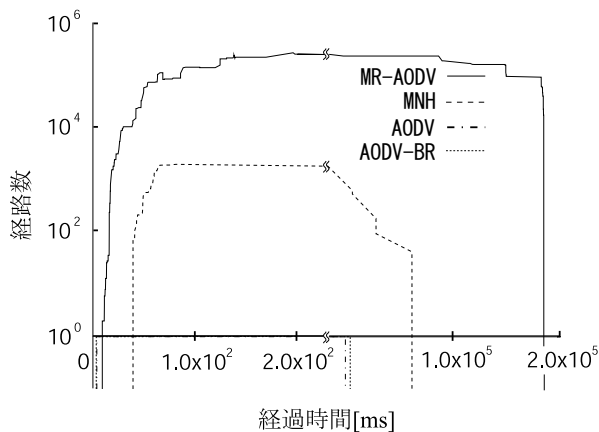


図 6: 有効経路数の時間変化

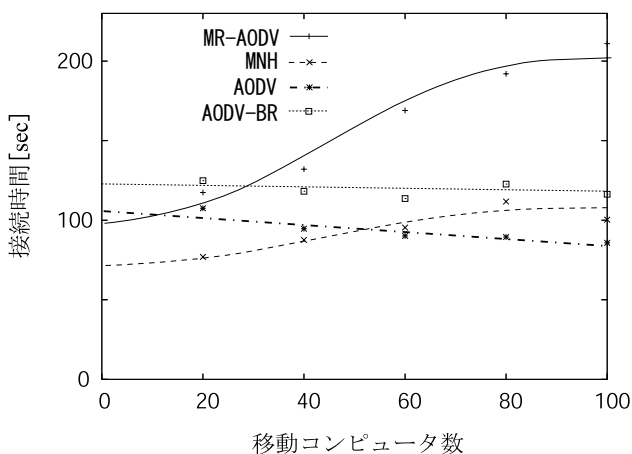


図 7: 経路再探索までの接続時間

5 まとめ

本論文では、AODV を拡張し、ブランチバックワードルートを相互接続することにより、複数の経路を構築する MR-AODV を提案した。MR-AODV では RREQ、RREP などの制御メッセージから上流、下流の関係を

保存した近隣テーブルを作成し、接続可能なコンピュータが順次、再接続処理を行なうことで複数の経路を構築する。今後は、本プロトコルを非同期プロトコルへ拡張し、経路探索経過時間と構築経路数の関係の評価を行ない、有効性を示す。

参考文献

- [1] "Wireless LAN Medium Access control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications," Standard IEEE 802.11 (1997).
- [2] "Radio Equipment and Systems(RES); HIPERLAN," ETSI Functional Specifications (1995).
- [3] 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-04.txt (2000).
- [4] Hedrick, C., "Routing Information Protocol," RFC 1058 (1988).
- [5] Jiang, M.H. and Jan, R.H., "An Efficient Multiple Paths Routing Protocol for Ad-hoc Networks," Proc. of the 15th International Conference on Information Networking, pp. 544-549 (2001).
- [6] Lee, S.J. and Gerla, M., "AODV-BR: Backup Routing in Ad hoc Networks," Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1311-1316 (2000).
- [7] Lee, S.J. and Gerla, M., "Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks," Proc. of IEEE International Conference on Communications, pp. 3201-3205 (2001).
- [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] Nasipuri, A. and Das, D.S., "On-Demand Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks," Proc. of IEEE 8th International Conference on Computer Communications and Networks, pp. 64-70 (1999).
- [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] Tseng, Y., Ni, S. and Shih, E., "Adaptive Approaches to Relieving Broadcast Storms in a Wireless Multihop Mobile Ad Hoc Network," Proceedings on the 21st International Conference on Distributed Computing Systems, pp. 481-488 (2001).
- [14] 佐川, 桧垣, "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回マルチメディアと分散処理ワークショップ論文集, pp. 157-162 (2001).
- [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).