

電力制御を利用したアドホックネットワークルーティング

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科

梅島慎吾 桧垣 博章

{shin5,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

モバイルコンピュータは時間とともにその位置を変える。そのため、モバイルコンピュータによるネットワークの通信手段として無線が広く用いられつつある。IEEE802.11 や HIPERLAN などの無線 LAN プロトコルが標準化され、これらの利用が始まっている。無線通信媒体である電磁波は、送信元からの距離が長くなるにつれて減衰する特性がある。近傍のコンピュータとの通信に必要とされる送信電力は、遠方のコンピュータとの通信に比べて小さい。電磁波を通信媒体とするアドホックネットワークにおいては、近隣コンピュータとの間の距離に応じて送信電力を制御することによって、モバイルコンピュータの稼働時間を延長することができる。送信電力を制御することは、送信信号の到達範囲を制御することでもある。従来のアドホックネットワークルーティング手法は、各モバイルコンピュータの送信信号の到達範囲が一定であることを前提としている。これに対して、送信電力を制御することによって、送信範囲に着目したルーティングが可能となる。一般に、アドホックネットワークでは、送信電力を小さくすると、送信先コンピュータまでのパスのホップ数が増加する。これによって、エンド-エンドの通信遅延が大きくなり、スループットが低下する。しかし、ネットワーク内では、複数のコンピュータ対が同時に通信を行なう。そこで、送信信号の到達範囲を縮小することによって、競合の発生率を低減し、それぞれの通信におけるエンド-エンドの通信遅延を短縮することが可能である。本論文では、送信電力を制御することによって競合による通信遅延の短縮を実現する新しいアドホックルーティングプロトコルを提案する。

PowerControl Based Adhoc Routing Protocol

Shingo Umeshima Hiroaki Higaki

{shin5,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

A Mobile computer changes its location from time to time. Wireless communication protocols, e.g. IEEE802.11 and HIPERLAN, are widely available in mobile ad-hoc networks. By controlling signal transmission power in a mobile computer, transmission range of the signal is changed. By increasing the signal transmission power, the number of hops for transmitting a message between two mobile computers is reduced. On the other hand, by reducing the signal transmission power, the probability of contention and collision in signal transmission is also reduced. Hence, there is a trade off in controlling the signal transmission power in order to reduce an end-to-end message transmission delay. This paper proposes two algorithms for finding another path by controlling signal transmission power for achieving shorter message transmission delay. These algorithms are invoked locally in each mobile computer on a path, i.e. these are not centralized one in a mobile ad-hoc network.

1 背景と目的

近年、ノート型 PC や PDA、自律移動ロボットなどのモバイルコンピュータが広く利用されるようになってきた。これらのモバイルコンピュータは、移動中においてもアプリケーションを実行し、他のコンピュータとの間で通信を行なう。そのため、基地局の存在に依存せず、ネットワークアプリケーションの実行が可能なアドホックネットワーク [4] への要求が高まっている。アドホックネットワークでは、ネットワーク上のすべてのモバイルコンピュータがパケットのルーティング機能を持ち、エンド-エンドの通信路 (パス) を構築する。モバイルコンピュータ間の通信には、IEEE802.11 [1] や HIPERLAN [2] などの無線 LAN プロトコルが利用されている。無線通信媒体である電磁波には、送信元からの距離が長くなるほど減衰する特性がある。そのため、遠方のモバイルコンピュータとの通信と比較し、近隣のモバイルコンピュータとの通信に必要な送信電力は小さい。論文 [9, 10] で提案されている MAC プロトコルを用いることによって、通信に必要な最小送信電力を得ることができ、送信電力を制御した通信が可能となる。

送信電力を制御することは、無線信号の到達範囲を制御することでもある。図 1 のように、モバイルコンピュータの分布が密である場所に複数のパスが構築されている場合、従来のルーティングプロトコル [5, 6] では図 1 のように、これらのパスの信号到達範囲が重複するために、競合 (コンテンション) が発生する。この競合による送信待ちによって、エンド-エンドの通信遅延が大きくなる。そこで図 2 のように、モバイルコンピュータの送信信号の到達範囲を縮小することによって、信号到達範囲の重複を解消または削減し、エンド-エンドの通信遅延を短縮することができる。これはネットワークのスループットの向上にもつながる。

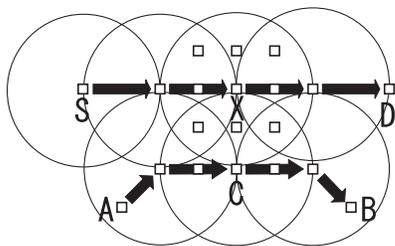


図 1: 隣接パスによる競合

通信に必要な最小送信電力を求めることができる MAC プロトコルを前提としたルーティング手法としては、パス上にあるノードの消費電力を考慮した [3, 8] のルーティングプロトコルがある。ここでは、ノード

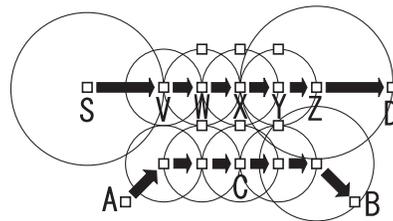


図 2: 電力制御による競合の回避

のバッテリー残量と送信電力をメトリックとして評価し、ネットワーク全体の接続性を高く維持できるパスを選択する。しかし、パス上にあるノードの消費電力を小さくすると、パス上には多数のノードが存在することになり、ホップ数が大きくなることでエンド-エンドの通信遅延が大きくなる。さらに、パスの構築にも長時間を要する。そこで、ホップ数が大きくなることで通信遅延が大きくなることを防ぐために、[7] では、パス探索は最大電力で到達可能なパスを発見する。パス探索後、リンク状態情報の交換やリンク切れ、片方向リンクの発見などのネットワークトポロジが変化するイベントが発生したならば、リンク切れや片方向リンクとなったノードに対する送信電力を大きくする。また、リンク状態とノードとの距離に基づいて送信電力を必要最小限の電力とする。この手法では、定期的なパス更新が行なわれなければ、パスは最大電力で探索した状態のままである。一方、パスの更新が頻繁に生じるならば、構築されるパスが安定しない。

以上から、本論文では、電力制御を利用した新しいアドホックネットワークルーティング手法 [11] を提案する。各モバイルコンピュータが、複数のパスの無線信号到達範囲が重複していることを検出し、パス分離アルゴリズム、パス縮小アルゴリズムを局所的に適用する。パス縮小アルゴリズムは、新しいモバイルコンピュータをパスに追加し、モバイルコンピュータ間の距離を短縮することで、送信信号到達範囲を縮小する。また、パス分離アルゴリズムは、複数のパスが同一のモバイルコンピュータを含む状態 (合流) を解消する。これらによって、競合の発生を回避し、スループットの向上を実現する。なお、本論文では、データパケットのルーティングには、DSR [5] や LBSR [12]、C-LBSR [13] 等によって得られたソースルートを用いることとする。

2 送信電力制御 MAC プロトコル

2 つのノード $A-B$ 間の電磁波による通信において、 A の送信電力 P_t と、 B の受信電力 P_r との間には以下

の関係が成り立つ。

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n g_t g_r \quad (1)$$

ここで、 λ は送信電波波長、 d は A - B 間の距離、 n は空間係数 (一般に $2 \sim 6$)、 g_t 、 g_r はそれぞれ A 、 B のアンテナゲインである。よって、 A - B 間の通信に必要な最小限の送信電力を求めるには、相手が送信したパケットの送信電力がわかればよい。そこで、送信電力をパケットに格納する。パケットを受信したノードは、式 (1) を用いて送信元ノードへ送信するために必要な最小の送信電力を算出する。そして、送信元ノード ID と最小送信電力の組を近隣ノードリストに記録する。送信する際には、近隣ノードリストに記録された最小送信電力でパケットを送信する。したがって、実際の無線信号到達範囲は、送信元ノードを中心として、送信先ノードとの距離を半径とした円内となる。

[9, 10] では、既存の無線 LAN プロトコルと同様に、媒体アクセス方式として CSMA/CA + Ack を採用している。有線 LAN プロトコルで用いられる CSMA/CD では、通信媒体を常に監視し、信号を送信したノードが信号の乱れを観測することによって衝突発生を検出することができる。しかし、無線 LAN では、電波強度の強い信号によって電波強度の弱い信号が検出できなくなるため、信号を送信したノードが衝突を検出することはできない。そこで、各ノードは、信号を送信する前にあらかじめランダムパルスを送信する。このとき、他のノードが送信するランダムパルスの有無を確認することによって衝突を回避する。また、CSMA/CA のみでは、無線信号の到達範囲外に送信先ノードが存在する場合や、電磁波の回折、障害物による遮蔽などによるパケット未到達を検出することができない。そこで、送信先ノードは、パケットを受信したならば、直ちに受信確認パケット Ack を送信元ノードへ返送する。

送信電力の制御のため、各ノードは送信電力をパケットに格納する。パケットを受信したノードは、式 (1) を用いて送信元ノードへ送信するために必要な最小の電力を算出する。そして、送信元ノード ID と最小送信電力の組を近隣ノードリストに記録する。各ノードがパケットを送信する場合、まず、送信先ノードが自身の持つ近隣ノードリストに記録されているかを確認する。記録されているならば、記録された最小送信電力を基準とし、ノードの移動を考慮して一定のオフセットを加算した電力を用いて送信する。記録されていないならば、最大電力で送信する。ただし、無線信号の到達範囲に存在するすべてのノードに送信する必要がある制御パケット (例えば RTS や CTS) やブロードキャストパケットは、最

大送信電力を用いて送信するものとする。

3 送信範囲と通信遅延の関係とその解決手法

アドホックネットワークにおいて、エンド-エンドの通信遅延が大きくなる要因には以下の 2 つがある。

- ホップ数の増加によるパケット転送処理時間の増加
- 複数ノードが行なう送信の競合による待ち時間

既存のオンデマンド型ルーティングプロトコル [5, 6, 12] のようにパス要求メッセージを電磁波の最大到達範囲 (固定送信範囲) で送信することによるパス探索を行なった場合、構築されたパス上でノードの分布が密である場所では、パスに含まれるノードの近隣に、パスに含まれないノードが多数存在する (図 1)。送信信号の到達範囲が一定であることを前提とした場合、パスに含まれるノードの近隣に存在するノードをパスに加えると、ホップ数が増加するばかりでなく、他のパスに含まれるノードとの間で送信の競合が発生する可能性が高くなる。送信信号の到達範囲を制御できる場合、これらのノードをパスに加えることで送信信号の伝達範囲を縮小することができる。これを行なえば、他のパスとの競合が減少し、エンド-エンドの通信遅延が短縮される可能性がある。また、複数のパスが交差、あるいは合流することがある (図 3)。このとき、交差点付近のノードや合流点であるノードにパケットが送信されると、CSMA/CA を用いていることから、競合による送信待ちが発生し、エンド-エンド通信遅延が大きくなる。

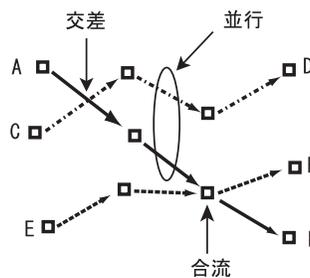


図 3: パスの合流と交差

エンド-エンド通信遅延を縮小するためには、以下を検出し、競合の発生率を低下させる手法が必要である。

- 周辺ノードの分布密度
- 並行するパス
- 合流するパス
- 交差するパス

ノードの分布密度は、各ノードが持つ近隣ノードリストから得ることができる。また、無線 LAN プロトコルでは、パケットがブロードキャストされる。そこで、ある

パスに含まれているノードが自身を送信先としない他のノードを送信先とするパケットを受信することによって、並行するパスの存在を検出することが可能である。また、自身を送信先とするパケットを受信することによって、2つのパスに属していること、すなわち合流するパスの存在を検出することが可能である。しかし、パスが交差していることを検出するためには各ノードの位置を示す座標情報が必要となる。そこで、この問題は、本論文では議論の対象としない。

4 提案手法

送信電力制御 MAC プロトコルを用いることで、必要最小送信電力から最大送信電力の間で送信電力を制御できる。各モバイルコンピュータ (以下ノードと記述) は、最大送信電力を用いて通信を開始する。ノードの分布が密であり、多数のノードが通信を行なっている領域では競合が発生する。そこで、パス分離アルゴリズムとパス縮小アルゴリズムを局所的に適用し、競合を減少させる。これによって、エンド-エンドの通信遅延を短縮し、スループットを向上させる。

4.1 パス分離アルゴリズム

図4のように、複数のパスが同一のノードを含んでいる状態を合流という。合流は競合を発生させるため、通信遅延を大きくする。そこで、このノードを含まないパスへ切り替えることでパスを分離し、合流を解消する。

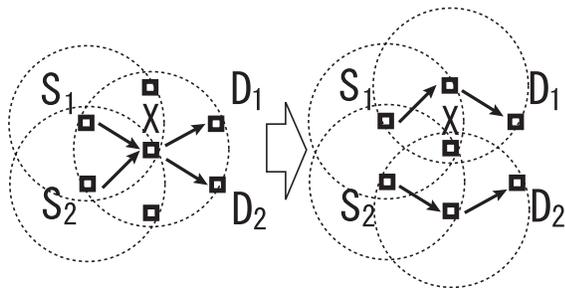


図 4: パス分離アルゴリズム

[パス分離アルゴリズム]

1. 合流点であるノード X が合流を検出する。
2. X の上流ノード S_i へ合流の検出を通知するパス変更提案メッセージ PUPROP をユニキャストで送信する。
3. PUPROP を受信した S_i は最大送信電力を用いて、無線信号到達範囲のすべての移動コンピュータにパス変更要求メッセージ PUREQ をブロードキャストする。PUREQ は、変更対象であるパスの経路情報を含む (図 5)。

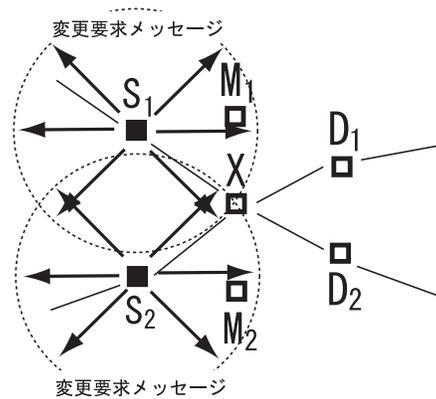


図 5: パス変更要求メッセージ

4. PUREQ を受信したノード M_i は、自身をパスに含むことの可否を決定し、変更応答メッセージを S_i へユニキャストで送信する (図 6)。

- 4-1. M_i が他のパスに含まれているかを確認する。含まれているならば、 M_i をパスに含むことを拒否するためにパス変更否定応答メッセージ PUNACK を S_i にユニキャストする。ここで、他のパスとは、エンド-エンドの異なるパスのことである。
- 4-2. M_i が他のパスに含まれていないならば、変更対象であるパス上のノードのうち、 S_i よりも送信先ノードに近いいずれかのノードが M_i からの無線信号到達範囲内に存在するかを確認する。存在しない場合は、 M_i をパスに含むことを拒否する PUNACK を S_i へユニキャストで送信する。存在するならば、自身を含むことを許可するパス変更肯定応答メッセージ PUACK を S_i へユニキャストで送信する。PUACK には、 M_i を含む更新された経路情報が格納される。

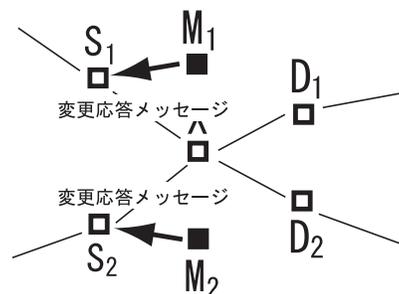


図 6: パス変更応答メッセージ

5. S_i は受信した経路情報を送信元ノードへ通知する。□

4.2 パス縮小アルゴリズム

図7のように、無線信号の到達範囲が重複すると競合が発生し、通信遅延が大きくなる。そこで、パスに新しいノードを追加し、ノード間の距離を短縮し、送信電力を低減することによって、それぞれのノードの無線信号到達範囲を縮小する。これによって、競合を抑制する。

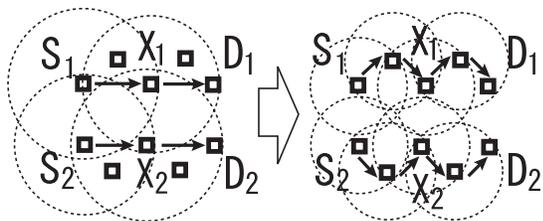


図7: パス縮小アルゴリズム

[パス縮小アルゴリズム]

1. ノード X_i を含まないパスを配送されるメッセージを X_i が受信することによって、 X_i が無線信号到達範囲の重複を検出する。
2. X_i は、 S_i への送信に必要な最小送信電力を用いて、パス縮小提案メッセージ PSPROP をブロードキャストする。PSPROP は、変更対象であるパスの経路情報を含む (図8)。

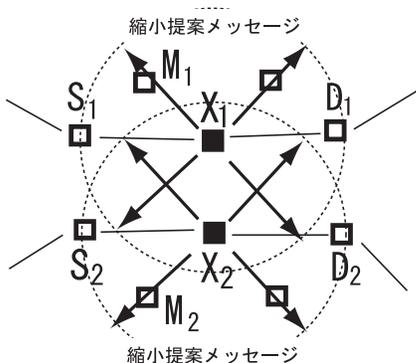


図8: パス縮小提案メッセージ

3. PSPROP を受信した S_i は、同じパスに対する縮小要求メッセージを送信していないのならば、 X_i への送信に必要な最小送信電力を用いて、パス縮小要求メッセージ PSREQ をブロードキャストする (図9)。
4. PSPROP と PSREQ の両方を受信したノード M_i は、以下の手順によって経路に加わることの可否を決定し、縮小応答メッセージを S_i へユニキャストで送信する (図10)。
 - 4-1. M_i が他のパスに含まれているかを確認する。

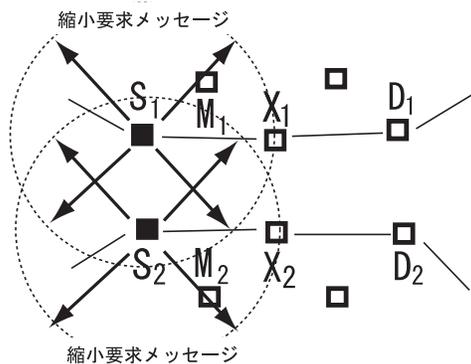


図9: パス縮小要求メッセージ

含まれているならば、 M_i をパスに含むことを拒否するためにパス縮小否定応答メッセージ PSNACK を S_i にユニキャストする。

- 4-2. M_i が他のパスに含まれていないならば、 M_i を含むことを許可するパス縮小肯定応答メッセージ PSACK を S_i にユニキャストする。このとき、受信した PSPROP に含まれる経路情報を更新し、PSACK に格納する。さらに、更新したパスに含まれないノードとの通信に必要な最小送信電力を近隣ノードリストから求め、PSACK に格納する。

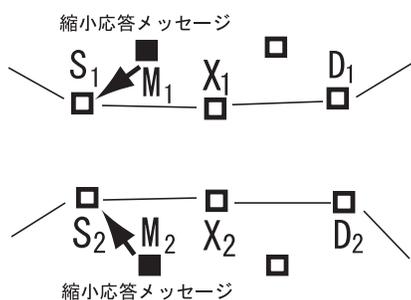


図10: 縮小応答メッセージ

5. X_i は受信した PSACK に含まれる経路情報を送信元ノードへ通知する。複数の PSACK を受信したならば、格納された最小送信電力がもっとも大きいものを選択する。□

4.3 パスの状態管理

パス分離アルゴリズム、パス縮小アルゴリズムをソースルーティングに適用するためには、それぞれのノードが、いずれのパスに含まれているかを知る必要がある。各ノードは、自身が含まれるパスの経路情報を保存するルートキャッシュを持つ。送信元ノードはデータ送信開始前 (パス使用開始前)、データ送信終了後 (パス使用終

了後) に送信先ノードへパス使用開始メッセージ、パス使用終了メッセージを送信する。パス使用開始メッセージを受信したノードは、メッセージに含まれる経路情報をルートキャッシュに保存する。この経路情報は、パス使用終了メッセージ受信時に削除される。

しかしアドホックネットワークでは、ノードの移動などによってリンクが切断され、パスが使用できなくなることがある。DSR、LBSR などでは、リンク切れを検出したノードが、送信元ノードへパスエラーメッセージを送信する。これによって切断リンクより上流のノードは、経路情報をルートキャッシュから削除することができる。しかし、下流のノードは、パスが無効化されたことを知ることができない。そこで、各ノードのルートキャッシュには、経路情報とともにパスの状態を保存する。

パスの状態は、有効、休眠、無効のいずれかである。有効とはパケット配送に使用されている状態、休眠とは確立されているがパケット配送に使用されていない状態、無効とは切断されている状態である。本論文のアルゴリズムでは、有効状態とその他の状態を区別できればよい(図 11)。

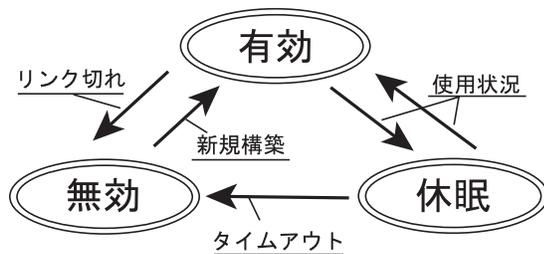


図 11: パスの状態遷移

ルートキャッシュに経路情報が保存される時、無効状態から有効状態へ遷移する。パス使用の終了やリンク切れによって有効状態から無効状態への遷移が起きる。タイムアウトによって、休眠状態から無効状態に遷移する際に、ルートキャッシュから経路情報が削除される。有効状態と休眠状態の間は、パスの使用状況によって遷移する。一定期間内に閾値以上のパケットが送信されていれば、そのパスは有効状態であり、そうでない場合には、休眠状態となる。有効状態であるパスがルートキャッシュに保存されているノードは、パス変更要求メッセージ PUREQ やパス縮小要求メッセージ PSREQ を受信した場合、否定応答 PUNACK、PSNACK を返信する。

5 まとめと今後の課題

本論文では、送信電力制御により送信信号の到達範囲を縮小することで、競合の発生を回避し、通信遅延を短縮し、スループットを向上する手法を提案した。今後はシミュレーションによる有効性の評価を行なう。

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] Chang, J-H., Tassiulas, L., "Energy Conserving Routing in Wireless Ad-hoc Networks," Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000, pp. 22-31 (2000).
- [4] Corson, M.S., Macker, J., "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," RFC 2501 (1999).
- [5] David, B., David, A., Hu, Y.-C., Jetcheva, J.G., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-04.txt (2000).
- [6] Perkins, C.E., Royer, E.M., "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," Proceedings of the IEEE 2nd Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 90-100 (1999).
- [7] Ramanathan, R., Rosales-Hain, R., "Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment," Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000, pp. 404-413 (2000).
- [8] Stojmenovic, I., Lin, X., "Power aware localized routing in wireless networks," Proceedings of IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, pp. 371-376 (2000).
- [9] Tseng, Y.C., Wu, S.L., Lin, C.Y., Sheu, J.P., "A Multi-Channel MAC Protocol with Power Control for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, pp. 419-424 (2001).
- [10] Singh, S., Raghavendra, C.S., "PAMAS - Power Aware Multi-Access protocol with Signalling for Ad Hoc Networks," ACM Computer Communication Review, Vol. 28, No. 3, pp. 5-26 (1998).
- [11] 梅島, 桧垣, "電力制御を利用したアドホックネットワークルーティング," 情報処理学会研究報告, Vol. 2001, No. 88, pp. 7-12 (2001).
- [12] 佐川, 神林, 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回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 157-162 (2001).
- [13] 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 (2001).