

## 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

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、発信源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な送信電力は、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。

## Power-Control Routing Protocol for Ad-Hoc Networks

Shingo Umeshima, Hiroaki Higaki  
{shin5, hig}@higlab.k.dendai.ac.jpDepartment 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、PDA、ノート型PC、自律移動ロボットなどのモバイルコンピュータの開発、利用が進んでいる。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うことが求められる。つまり、モバイルコンピュータは、その使用場所に制限されることなく通信可能であることが必要とされる。従来の有線ネットワークでは、固定的に設置されたルータのみがパケット配送を行うネットワークが構築されていたが、コンピュータの使用場所が限定されてしまうという問題があり、実現可能なアプリケーションが限定される。そこで、使用場所に限定されることなく、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への要求が高まっている。

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。移動コンピュータを固定ネットワークに接続して利用する技術としてDHCP [5]、MobileIP [8]などが開発、利用されてきた。さらに、通信手段として無線への注目が高まっており、IEEE802.11 [1]やHIPERLAN [2]などの無線LANプロトコル技術の利用が始まっている。無線通信媒体としては、光、赤外線、電波などが利用されている。これらの電磁波には、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、近傍のモバイルコンピュータとの通信に対して最小限必要とされる送信電力は小さくなる。この特性を利用した送信電力制御が可能なMACプロトコルが提案されている [12,13]。これらのMACプロトコルで

は、次ホップのモバイルコンピュータ (以下ノードと記述) に送信する際、送信先ごとに異なる送信電力を選択する手法を提案している。

2つのノード  $A, B$  間の通信において、 $A$  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、 $\lambda$  は送信電波波長、 $d$  は  $A, B$  間の距離、 $n$  は空間係数 (一般に 2~6)、 $g_t, g_r$  はそれぞれ  $A, B$  のアンテナゲインである。 $A, B$  間の通信に必要な最小限の送信電力を求めるためには、 $A, B$  間の距離  $d$  を求めればよい。そこで  $A$  が送信するパケットに、そのパケットを送信するために用いた送信電力を記載することにより、パケットを受信した  $B$  は、式 (1) によって、 $A$  との距離  $d$  を求めることができる。通信に必要な最小限の送信電力が求められることで、各ノードは必要最小限の電力から最大電力までの間で送信電力を制御することができる。ここで、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。

アドホックネットワークでは、すべてのノードがパケットの転送、すなわちルーティングを行う。RIP [6]、OSPF [7] といった従来の固定ネットワークにおけるルーティングプロトコルでは、各ルータが定期的にルーティング情報を交換したり、ネットワークポロジの変化をトリガとしてルーティング情報を交換するなどして、各ノードのルーティング情報に最新のネットワークポロジを反映させる手法が用いられている。これに対して、ノードの移動によってネットワークポロジが頻繁に変化するアドホックネットワークでは、通信を開始するときに送信元ノードから送信先ノードまでのパスを探索するオンデマンド型のプロトコルが有利である。このようなプロトコルとして、DSR [4]、LBSR [14]、AODV [9] などがある。ここでは、各モバイルコンピュータからの送信信号の到達範囲は固定であると仮定している。パスの探索においては、ホップ数をメトリックとしてパスの長さを評価し、より短いパスを選択する。しかし、送信電力の制御が可能になると、ホップ数がパスのメトリックとして有効に機能するとは限らない。

モバイルコンピュータは、バッテリーを電源としているため、稼働時間に制限がある。そこで、十分長い稼働時間を確保するためには、消費電力を抑制することが求められる。そこで、消費電力が少なくなるパスを選択することが考えられる。パス上にあるノードの消費電力を考慮したルーティングプロトコルとして、[3, 11] がある。ここでは、ノード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、[10] 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わなければ、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。

ここで、単一の通信のみを考えた場合、送信電力を小さくするとホップ数が大きくなり、エンド-エンドの通信遅延は大きくなる。しかし、現実のネットワークにおいては、複数のコンピュータ対が同時に通信を行う。そのため、送信信号の到達範囲に重複のある複数のコンピュータからの送信間に競合が発生することがある。ここで、送信待ちによる通信遅延が発生すると、たとえホップ数が小さくても通信遅延が短いとは限らない。

そこで、ノードの分布密度に注目する。ノードの分布が密である場所を複数のパスが通過する場合、従来のアドホックネットワークルーティングプロトコルでは、図1のように一方のパスの信号の到達範囲と他方のパスの信号の到達範囲とが重複するため競合が発生することがある。このため、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ことが考えられる。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で重複をなくし、エンド-エンドの通信遅延を短縮することができる。

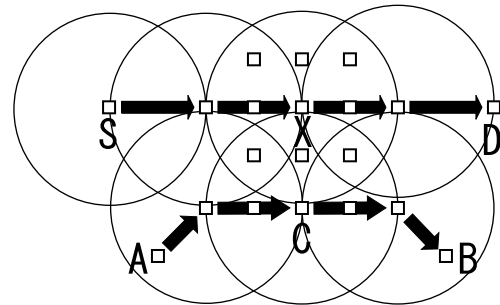


図 1: 並行する 2つのパス

本論文で提案するプロトコルでは、パス探索のためのパケットは最大電力で送信する。そして、ノードの分布の疎密と、競合の発生の有無に応じて送信電力を小さくすることでエンド-エンドの通信遅延が縮小する。

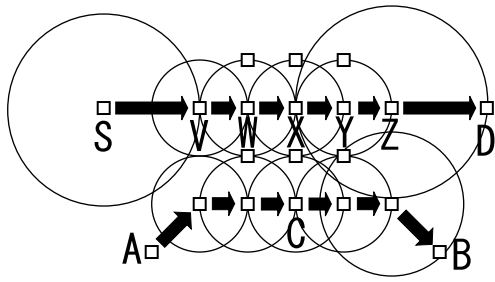


図 2: 並行する 2 つのパス (パス変更後)

## 2 電力制御可能な無線 LAN プロトコル

本論文では、[12, 13] において提案されている無線 LAN プロトコルを前提とする。[12, 13] では、既存の無線 LAN プロトコル同様に、媒体アクセス方式として CSMA/CA + Ack を採用する。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、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記載する。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、送信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: RTS, 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
- 複数のノードが行う送信の競合による送信待ち時間

既存のオンデマンド型ルーティングプロトコル [4, 9, 14] 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。(図 2)

また、複数のパスが交差、あるいは合流することがある。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)

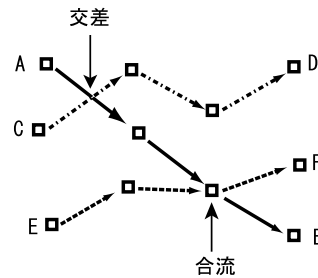


図 3: パスの合流と交差

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。

- 周辺ノードの分布状態
- 隣接するパス
- 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、隣接するパスの存在あるいは合流点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。

次章では電力制御を DSR、LBSR などのソースルーティングプロトコルに適用し、エンド-エンドの通信遅延を小さくするアドホックネットワークルーティングプロトコルを提案する。

#### 4 提案手法

DSR、LBSR などのソースルーティングプロトコルでは、送信元ノードからパス要求メッセージをフラグディングし、これによって、送信先ノードまでのパスを探索する。送信先ノードがパス要求メッセージを受信すると、送信先ノードに到達するまでの経路上に存在するノードの順序情報をパス返答メッセージに付加して送信元ノードに返送する。パス返答メッセージを送信元ノードが受信すると、データパケットに送信先ノードまでのノードの順序情報を付加して送信する。各ノードがデータパケットに付加されたノード順序情報に基づいてパケットを配送することで通信を行う。

パス探索後、パスに含まれるノードが、新たに他のパスに含まれることになった場合、それぞれのパスの上流ノードへ送信するパケットの合流フラグをセットすることで合流を通知する。(図 4) 合流を通知された上流ノードは、以下に示すパス分離アルゴリズムによって合流を回避する。

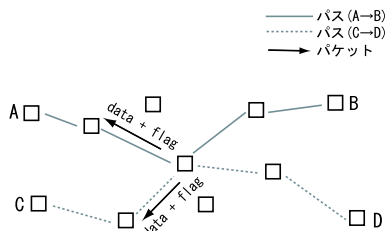


図 4: 合流通知

#### [パス分離アルゴリズム]

- 1) 複数のパスの合流を通知したノードに対してメッセージを送信するのに必要な最小電力を用いて、変更対象となるパスのノード順序情報を記載したパス変更要求メッセージをブロードキャストする。(図 5)
- 2) パス変更要求メッセージを受信したノードは、自身がパス順序情報に記載されたノードへ送信可能であるか否かを確認する。(図 6)
  - 2-1) もし、送信可能であるならば、自身をパスに加えた新しいノード順序情報を生成し、これをパス変更返答メッセージとしてパス変更要求メッセージを送信したノードへ返送する。このとき、ノード順序情報中の複数のノードに送信可能であった場合には、送信先に近いノードを選択する。(図 7)
  - 2-2) もし、送信不可能であるならば、自身のアド

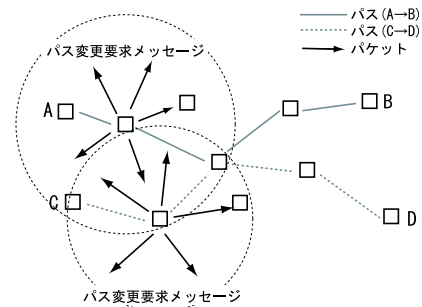


図 5: パス変更要求メッセージ

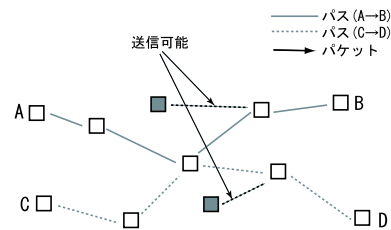


図 6: 接続性確認

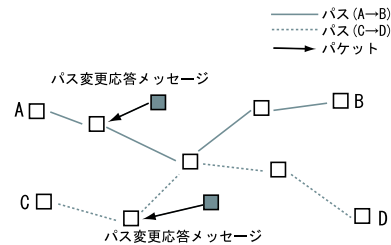


図 7: パス返答メッセージ

レスのみを記載したノード順序情報をそのままパス返答メッセージとしてパス変更要求メッセージを送信したノードへ返送する。

- 3) パス変更要求メッセージを送信したノードは、近隣ノードリストに含まれるすべてのノードからパス変更返答メッセージを受信まで待機する。
- 4) 受信したパス変更返答メッセージに含まれる送信先へ到達可能なパスのうち、現在のパスとの共通部分が最小となるパスを選択する。(図 8)

もし、他のパス、すなわち自身宛ではないパケットを受信したならば、隣接するパスがあることを検出し、競合を回避するためのパス縮小アルゴリズムにより送信信号の到達範囲の縮小を行う。

#### [パス縮小アルゴリズム]

- 1) 隣接パスを検出したノードは、自身とそのパス上の直接の上流ノードの間に追加可能なノードを探索するために、自身の管理する近隣ノードリスト含むパス縮小要求メッセージをこの上流ノードへ送信する。(図 9)
- 2) パス縮小要求メッセージを受信した上流ノード

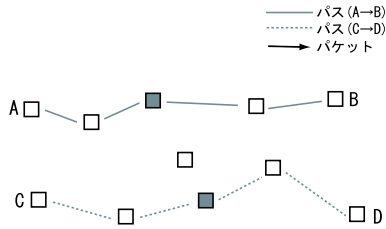


図 8: 合流分離後のバス

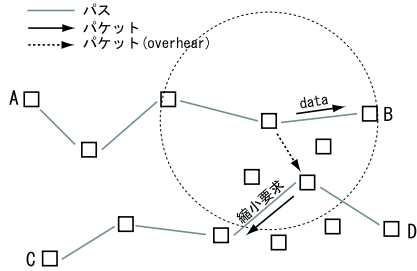


図 9: バス縮小要求メッセージ

は、受信した近隣ノードリストと自身の近隣ノードリストと比較し、両方の近隣ノードリストに含まれるノードを探す。

3) 両方の近隣ノードリストに登録されているノードのうち、近隣バスを検出したノードおよびその上流モードまでの距離の2乗和がこれらのノード間の距離の2乗以下となっている(近隣バスを検出したノードとその上流ノードとの間の距離を直径とする円内に存在するノード)を探す。(図 10)

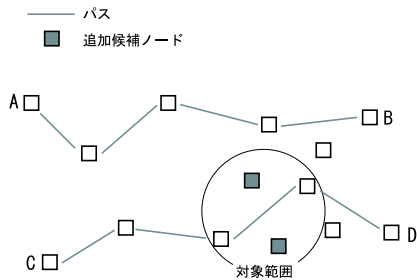


図 10: バス参加要求メッセージ

4) この条件を満たすノードのうち、そのノードへの送信に必要な最小電力が最大となるノードへの最小送信電力を用いて、条件を満たすすべてのノードの ID と、自身の下流ノード(すなわち、近隣バスを検出したノード)の ID を記載したバス参加要求メッセージをブロードキャストする。(図 11)

5) バス参加要求メッセージを受信したノードのうち、メッセージに自身の ID が含まれるノードは、自身が他のバスに含まれているか否かを確認する。

5-1) 他のバスに含まれているならば、新しいバス

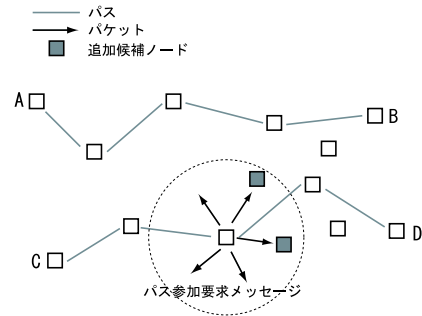


図 11: バス参加要求メッセージ

へ含まれることを拒否するため、不参加であることを伝えるバス参加返答メッセージを返す。

5-2) 他のバスに含まれていないならば、新しいバス以外のバスが近隣に存在するか否かを確認する。(図 12)

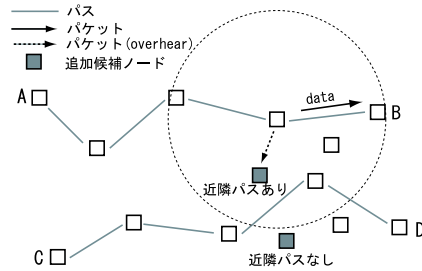


図 12: 近隣バス確認

5-2-1) 新しいバス以外のバスが近隣に存在するならば、近隣ノードリストからそのバスを構成するノードへ送信するのに必要な最小電力を求め、この電力を含むバス参加返答メッセージを返送する。(図 13)

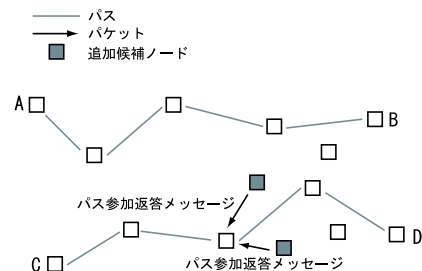


図 13: バス参加返答メッセージ

5-2-2) 新しいバス以外のバスが近隣に存在しないならば、参加返答メッセージを返送する。

6) バス参加要求メッセージを送信した上流ノードが、対象としたすべてのノードからバス参加返答メッセージを受信したならば、新しいバスに加えるノードを選択する

6-1) 新しいバスに加えることが可能であり、近隣

に他のパスが存在しないノードをパスに加える。  
(図 14)

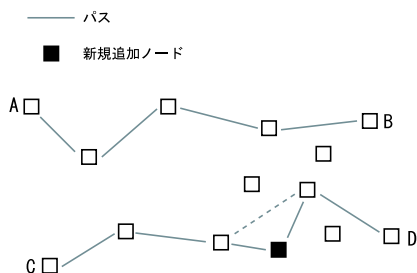


図 14: 縮小処理後のパス

6-2) 新しいパスに加えることが可能であるが近隣にパスが存在する場合、参加返答メッセージに含まれている最小送信電力が最小であるノードを新しいパスに加える。

このように、局所的な処理であるパス分離アルゴリズム、パス縮小アルゴリズムを繰り返すことによって、競合を回避できる新しいパスへの変更を行う。

## 5 まとめと今後の課題

ソースルーティングを用いるアドホックネットワークルーティングプロトコルに対して、パス分離アルゴリズム、パス縮小アルゴリズムを適用することによって、競合を減少させ、エンド-エンドの通信遅延を短縮する手法を提案した。

提案したパス分離アルゴリズムでは、2つのパスの交差を解消することはできない。また、提案したパス縮小アルゴリズムによって、ノードの分布が密である部分で競合が頻繁に発生する場合、パスの縮小によって競合を回避することは可能であるが、逆にノードの分布が粗であることを検出することによって、送信信号の到達範囲を拡大し、パスの拡大を行なうことによってホップ数を削減することができない。これらを解決し、シミュレーションによって本提案手法の有効性を示すことが今後の課題である。

## 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); HIPER-LAN," ETSI Functional Specifications (1995).
- [3] Chang, J-H. and Tassiulas, L., "Energy Conserving Routing in Wireless Ad-hoc Networks," Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000 (2000).
- [4] 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).
- [5] Droms, R., "Dynamic Host Configuration Protocol," RFC 1531 (1993).
- [6] Hedrick, C., "Routing Information Protocol," RFC 1058 (1988).

- [7] Moy, J., "Open Shortest Path First specification," RFC 1131 (1989).
- [8] Perkins, C., "IP Mobility Support," RFC 2002 (1996).
- [9] Perkins, C.E. and 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).
- [10] Ramanathan, R. and Rosales-Hain, R., "Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment," Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000, vol. 2, pp. 404-413(2000).
- [11] Stojmenovic, I. and Lin, X., "Power aware localized routing in wireless networks," Proceedings of IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, pp. 371-376 (2000).
- [12] Tseng, Y.C., Wu, S.L., Lin, C.Y. and 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).
- [13] Singh, S. and Raghavendra, C. S., "PAMAS - Power Aware Multi-Access protocol with Signalling for Ad Hoc Networks," ACM Computer Communications Review, July, pp. 5-26 (1998).
- [14] 佐川, 桜垣, "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," 情報処理学会第 60 回全国大会論文集, No.3, pp.359-360 (2001).