

送信電力制御と経路変更による競合回避を用いた アドホック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

西島 康之 梶垣 博章

E-mail: {nishiji,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

移動コンピュータが自律的に無線ネットワークを構築する MANET (Mobile Ad hoc Network) の研究が進められている。MANET では、IEEE802.11 や HIPERLAN などのように、送信先との距離に関わらず、一定の電力でメッセージを送信する無線 LAN プロトコルを想定し、無線信号の到達範囲が固定であることを仮定している。現在提案されているアドホックルーティングプロトコルは、ホップ数の小さい通信路を構築することを目的としている。しかし、通信媒体である電磁波は、送信元からの距離が大きくなるにつれて減衰するため、近傍の移動コンピュータとの通信では、遠方の移動コンピュータとの通信よりも小さな送信電力でメッセージを送信することができる。送信電力を小さくすることは、無線信号の到達範囲を小さくすることと等しい。そこで本研究では、送信電力制御によって競合を削減できることに着目し、DSR のようなソースルーティングプロトコルにおいて送信機会を増加させることでスループットを向上する手法を提案し、その有効性の評価を行なう。

Contention-Free Ad hoc Routing with Power Control

Yasuyuki Nishijima Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {nishiji,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

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移動コンピュータが広く利用されるようになってきた。これらの移動コンピュータは、移動中においてもネットワーク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に、ネットワークアプリケーションの実行が可能な MANET (Mobile Ad hoc Network) [4] への要求が高まっている。MANET では、ネットワーク上のすべての移動コンピュータがメッセージのルーティング機能を持ち、エンド-エンドの通信路を構築する。移動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る。これらのプロトコルでは、送信移動コンピュータは、受信移動コンピュータとの距離に関わらず、一定の最大送信電力でメッセージを送信する。したがって、無線信号の到達範囲も一定である。このことから、従来から提案されているアドホックルーティングプロトコル [5, 6] では、ホップ数の小さい通信路 (経路) を構築することとなる。

しかし、無線通信媒体である電磁波には、送信移動コンピュータからの距離が大きくなるほど減衰する特性がある。そのため、遠方の移動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必要な送信電力は小さい。論文 [9, 10] で提案されている送信電力制御 MAC プロトコルでは、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。モバイルアドホックネットワークでは、移動コンピュータの分布密度がネットワーク全体で一様であることは稀であり、場所によって疎密があることが一般的である。図 1 左図のように、移動コンピュータの分布が密である場所に複数の経路を構築する場合、従来のルーティングプロトコル [5, 6] では、ホップ数の小さい経路を構築するため、互いの信号到達範囲が重複し、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、経路上にある各移動コンピュータの送信機会が減少し、エンド-エンドのスループットが低下する。そこで図 1 右図のように、移動コンピュータの無線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-エンドのスループットを向上することができる。

そこで本論文では、電力制御を利用した新しいアドホックルーティング手法を提案する。送信元移動コン

ピュータは、既存のオンデマンド型アドホックルーティングプロトコルを用いて送信先移動コンピュータまでの経路を探索、検出し、構築する。そして、経路上にある各移動コンピュータが、複数の経路の無線信号到達範囲が重複していることを検出し、本論分で提案する経路分離アルゴリズム、送信範囲縮小アルゴリズムを局所的に適用する。送信範囲縮小アルゴリズムは、移動コンピュータを経路に追加し、モバイルコンピュータ間の距離を短縮することで、無線信号到達範囲を縮小する。また、経路分離アルゴリズムは、複数の経路が同一の移動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、エンド-エンドのスループットを向上する。なお、本論文では、経路探索時点の初期経路として、DSR [5] や LBSR [11]、C-LBSR [12] 等によって得られたソースルートを用いることとする。

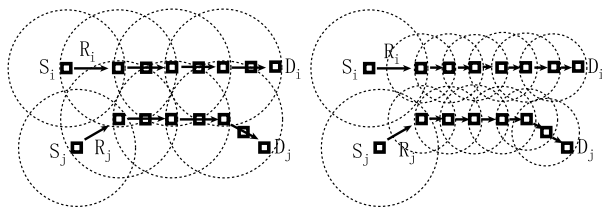


図 1: 電力制御による競合の回避

2 従来手法

送信電力制御 MAC プロトコル [9, 10] を前提としたルーティング手法としては、経路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経路を選択する。しかし、経路上にあるノードの消費電力を小さくすると、経路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、経路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、経路探索は最大電力で到達可能な経路を発見する。経路探索後、リンク状態情報の交換やリンク切れ、片方向リンクの検出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、定期的な経路更新が行なわれなければ、経路は最大電力で探索した状態のままである。一方、経路の更新が頻繁に生じるならば、構築される経路が安定しない。

3 送信範囲と送信機会の関係とその解決手法

MANETにおいて、エンド-エンドのスループットが低下する要因として、以下の2つがある。

- 競合による送信待ち時間
- ホップ数の増加によるメッセージ転送処理時間の増加

図1左図のように、無線信号の到達範囲が重複すると、CSMA/CAによる衝突回避のため、コンテンションウィンドウが大きくなり、バックオフ時間が長くなる。よって、競合は送信待ち時間を増加させる。そのため、送信機会が減少する。競合を削減するには、無線信号の到達範囲の重複を解消すればよい。MANETにおいて、図1左図のように、送信元と送信先が異なる経路間で競合が発生した場合、経路上のノードの送信機会が減少する。よって、異なる経路間で発生する競合を削減することで、送信機会を増加することができる。

異なる経路間で発生する競合は、図2のように、並行、合流、交差の3つに分類される。これらの競合を検出するために、無線通信においては、すべてのメッセージがブロードキャストされることを利用する。並行した経路は、ある経路に含まれているノードが、他のノードを送信先とするメッセージのうち、自身を経由せずに配送されたメッセージを受信することで検出できる。また、合流する経路は、自身を経由して異なる配送先へと配送されるメッセージを受信することで検出できる。しかし、交差した経路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こととする。

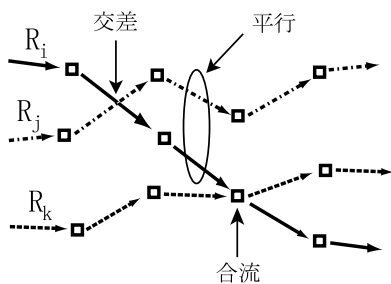


図2: 経路の合流と交差

並行した経路を検出した場合、無線信号の到達範囲を縮小し、競合を削減する。既存のオンデマンド型ルーティングプロトコル [5,6,11] のように、無線信号の到達範囲が一定であることを前提とした場合、ホップ数の小さい経路を構築することでエンド-エンドの通信遅延の小さい経路を得る。しかし、送信電力制御により無線信号の到達範囲が可変である場合、この限りではない。図1左図のように、ノードの分布が密である場所では、経

路の近隣に経路には含まれないノードが多数存在する。無線信号の到達範囲が可変である場合、これらのノードのうち、そのノードを経由することで無線信号の到達範囲を縮小できるノードを経路に加えることで、複数の経路間で発生する競合を削減することができる。よって、ホップ数の増加によるメッセージ転送処理時間の増加量に対し、競合の解消による待ち時間の減少量が大きければ、送信機会が増加する可能性がある。そこで、並行する経路を検出したノードが、経路に新しいノードを追加することで、局所的に競合を解消する。

合流した経路を検出した場合、迂回経路を求めることで競合を削減する。そこで、合流点となるノードが、自身の近隣ノードを経由してメッセージが配送されるように経路を変更する。

4 提案アルゴリズム

ソースルーティング型プロトコル [5,11,12] において、経路分離アルゴリズムと送信範囲縮小アルゴリズムを局所的に適用し、競合を削減する。これによって送信機会を増加し、エンド-エンドのスループットを向上する。

4.1 経路分離アルゴリズム

図3左図のように、複数の経路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、送信機会が減少する。そこで図3右図のように、このノードを含まない経路へ切り替えることで経路を分離し、合流を解消する。

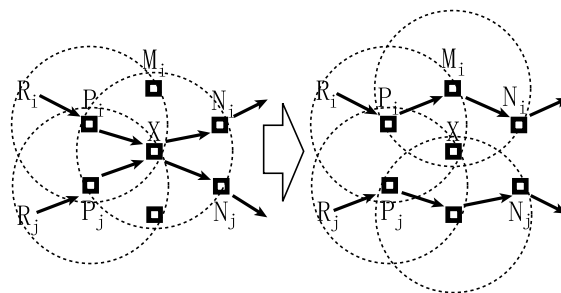


図3: 経路分離アルゴリズム

[経路分離アルゴリズム]

1. 2つの経路 R_i と R_j の合流点であるノード X が合流を検出する。
2. 上流ノード $P_i \in R_i$ へ合流の検出を通知する経路変更提案メッセージ $PUProp(R_i)$ をユニキャストで送信する。
3. $PUProp(R_i)$ を受信した P_i は経路変更要求メッセージ $PUReq(R_i)$ を最大送信電力 P_{max} を用いてブロードキャストする

4. $PUReq(R_i)$ を受信したノード M_i は、 M_i を R_i に含むことの可否を決定し、変更応答メッセージを P_i へユニキャストで送信する。
 - 4-1. M_i が R_i 以外の経路に含まれている場合は、経路変更否定応答メッセージ $PUNack(R_i)$ を P_i にユニキャストする。
 - 4-2. M_i が R_i 以外の経路に含まれていない場合は、 M_i の無線信号到達範囲に R_i における X の次ホップ移動コンピュータ N_i を含むかを確認する。
 - 4-2-1. 含まない場合は、 $PUNack(R_i)$ を P_i へユニキャストで送信する。
 - 4-2-2. 含む場合は、経路変更肯定応答メッセージ $PUAck(R_i, M_i)$ を P_i にユニキャストで送信する。
5. X は、 $PUAck(R_i, M_i)$ をユニキャスト送信した移動コンピュータのうちの一つを X に代わる次ホップとした経路 R'_i を送信元移動コンピュータへ通知する。□

4.2 送信範囲縮小アルゴリズム

図4左図の X_i と X_j のように、無線信号到達範囲が重複すると競合が発生し、送信機会が減少する。そこで図4右図のように、経路に新しい移動コンピュータ M_i と M_j を追加し、移動コンピュータ間の距離を短縮し、送信電力を低減することによって、それぞれの移動コンピュータの無線信号到達範囲を縮小する。これによって、競合の発生を抑制する。

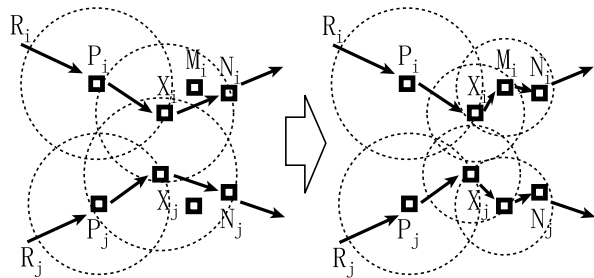


図4: 送信範囲縮小アルゴリズム

[送信範囲縮小アルゴリズム]

1. $X_i \in R_i$ から送信され R_i を配送されるメッセージを $X_j \notin R_i$ が受信することによって、 R_i と R_j の無線信号到達範囲が重複し、並行が存在することを検出する。
2. X_j は、送信範囲縮小提案メッセージ $RUProp(R_i)$ を X_i にユニキャストで送信する。
3. $RUProp(R_i)$ を受信した X_i は、送信範囲縮小要求メッセージ $RUReq(R_i, X_i)$ を X_j に到達可能な最小

- 送信電力 $P(X_i, X_j)$ を用いてブロードキャストする。
4. $RUReq(R_i, X_i)$ を受信した移動コンピュータ M_i は、 M_i を R_i に含むことの可否を決定し、送信範囲縮小応答メッセージを X_i にユニキャストで送信する。
 - 4-1. M_i が R_i 以外の経路に含まれている場合は、送信範囲縮小否定応答メッセージ $RUNAck(R_i, M_i)$ を X_i にユニキャストで送信する。
 - 4-2. M_i が R_i 以外の経路に含まれていない場合は、 M_i の無線信号到達範囲に R_i における X_i の次ホップ移動コンピュータ N_i を含むかを確認する。
 - 4-2-1. 含まない場合は、 $RUNAck(R_i, M_i)$ を X_i へユニキャストで送信する。
 - 4-2-2. 含む場合は、送信範囲縮小肯定応答メッセージ $RUAck(R_i, M_i)$ を X_i へユニキャストで送信する。
 5. X_i は、 $RUAck(R_i, M_i)$ をユニキャスト送信した移動コンピュータのうちの一つを次ホップとして加えた経路 R'_i を送信元移動コンピュータへ通知する。□

3.において、 X_i が $RUReq(R_i, X_i)$ を $P(X_i, X_j)$ で送信し、これを受信した移動コンピュータ M_i のみが X_i の次ホップ移動コンピュータとなる。このため、 X_i から M_i へ送信電力 $P(X_i, M_i)$ で送信されるとき、 $P(X_i, M_i) < P(X_i, X_j)$ が成り立つ。すなわち、 R_i に M_i を追加することによって、5.における追加移動コンピュータの選択手法によらず、 X_j は X_i の無線信号到達範囲外に位置することになる。しかし、 M_i が N_i へ到達可能な最小電力で送信したとしても、その信号到達範囲内に X_j が含まれる場合がある。これを回避できる追加移動コンピュータ M_i の選択手法として以下が考えられる。ただし、仮定2より、 $|X_i M_i|$ 、 $|M_i N_i|$ 、 $|X_i N_i|$ はいずれも取得可能である。

[手法1] $|X_i M_i|$ が $|X_i X_j|$ より小さい範囲で大きな値となるほど $|M_i N_i|$ が小さくなり、 M_i の無線信号到達範囲に X_j が含まれる可能性が小さくなると考え、 $|X_i M_i|$ が最大となる M_i を追加する。

[手法2] $|X_i X_j| > |X_i N_i|/2$ ならば、 $X_i N_i$ の中点に近い移動コンピュータが競合を発生しにくいと考えられる。そこで、 $X_i M_i$ の中点からの距離が最小となる M_i を追加する。この距離 d_i は次式で計算できる。

$$d_i = \frac{\sqrt{2|X_i M_i|^2 + 2|M_i N_i|^2 - |X_i N_i|^2}}{2}$$

[手法3] $|M_i N_i|$ が大きい場合、 M_i の無線信号到達範囲に X_j が含まれる可能性が高くなると考えられる。また、

交差が発生していないという前提では、 M_i が X_iN_i に近いほど競合は発生しにくいと考えられる。 M_i と X_iN_i との距離 h_i は次式で計算できる。

$$h_i = \frac{L(L - 2|X_iM_i|)(L - 2|M_iN_i|)(L - 2|X_iN_i|)}{2|X_iN_i|}$$

ただし、 $L = |X_iM_i| + |M_iN_i| + |X_iN_i|$ とする。

そこで、 $|M_iN_i| + \alpha h_i$ が最小となる M_i を追加する。
[手法4] $|X_iM_i|$ と $|M_iN_i|$ の差が小さくなると $|X_iM_i| < |X_iX_j|$ であることから $|M_iN_i| < |M_iX_j|$ を満足する可能性が高いと考えられる。そこで、手法3と同様に M_i と X_iN_i との距離も考慮に入れ、 $||X_iM_i| - |M_iN_i|| + \alpha h_i$ が最小となる M_i を追加する。

5 評価

まず、送信範囲縮小アルゴリズムにおける追加移動コンピュータの選択手法について、前章で提案した4つの手法の性能をシミュレーションによって評価する。ここでは、すべての移動コンピュータの最大無線信号到達範囲は等しいものと仮定する。また、 $|X_iN_i|$ は、この最大範囲の60%であると仮定する。 X_j および M_i の候補となる移動コンピュータは、 X_i から $P(X_i, N_i)$ で送信した場合の無線信号到達範囲に一様分布しているとし、各手法を用いて選択された M_i について、 M_i から $P(M_i, N_i)$ で送信した場合の無線信号到達範囲内に X_j が存在し、再度送信範囲縮小アルゴリズムを適用しなければ競合が発生してしまう確率を求めた。手法1では69.3%、手法2では54.0%という結果が得られた。また、手法3と手法4において、 α の値を変化させたときの競合発生確率をそれぞれ図5と図6に示す。いずれの手法においても、 α に対して単調増加していることから、 h_i を M_i の選択に用いることは有効ではないと言える。 $\alpha = 0$ のときの競合発生確率はそれぞれ51.4%、45.6%であることから、手法4において $\alpha = 0$ とする場合、すなわち、 $|X_iM_i|$ と $|M_iN_i|$ の差が最小となる M_i を R_i に加える手法が最も有効である。

次に、提案手法によって送信機会が増加し、エンドエンドのスループットが向上することをシミュレーションによって評価する。図7のように、ノード $S1$ 、 $S2$ がそれぞれ $D1$ 、 $D2$ に1秒間メッセージを送信するものとし、送信元から送信先までのノード数に対するスループットを求めた。ネットワーク層に IEEE802.11b を用いて DSR によって経路を構築した場合と、電力制御 MAC プロトコルを用いて DSR に範囲縮小アルゴリズム、経路分離アルゴリズムを適用した場合のスループ

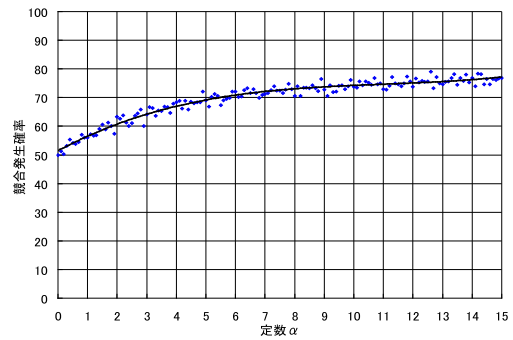


図 5: 手法3における競合発生確率

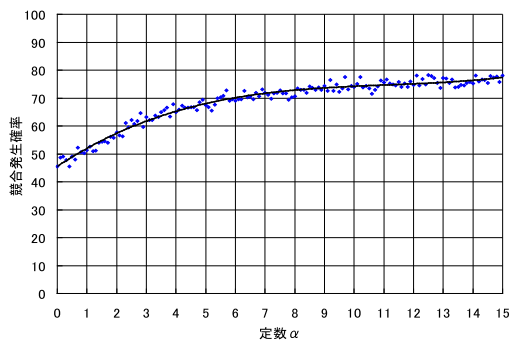


図 6: 手法4における競合発生確率

トを比較した。無線信号の最大到達範囲は50mである。結果を図8に示す。

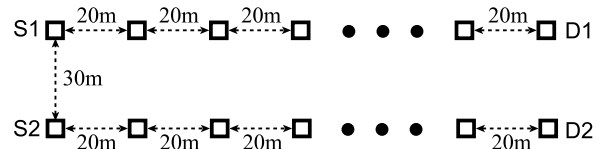


図 7: シミュレーションにおけるノード配置

送信元から送信先まで3台のノードが存在する状況では、提案手法、DSRにおける送信先までのホップ数は、それぞれ2ホップ、1ホップである。この状況では、競合関係にあるノードが互いに1台であるため、5台以上のノードが存在する場合よりも高いスループットが示されている。

送信元から送信先までのノード数が7台以上の場合、DSRよりも提案手法におけるスループットが高い。これはDSRでは同一経路上のノード間で発生する競合に加え、異なる経路間で競合が発生するのに対し、提案手法では同一経路上のノード間でのみ競合が発生するため、DSRよりも送信機会が増加したためである。

ここで、送信元から送信先まで7台のノードが存在

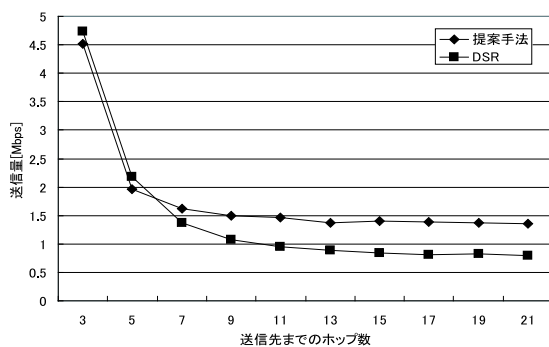


図 8: 送信先までのノード数に対する送信量

する状況における送信元の送信量、送信先の受信量を図 9 を示す。提案手法、DSR ともに送信量に対し受信量が大幅に少ないことが確認できる。これは、無線信号の衝突により、メッセージを紛失しているためである。

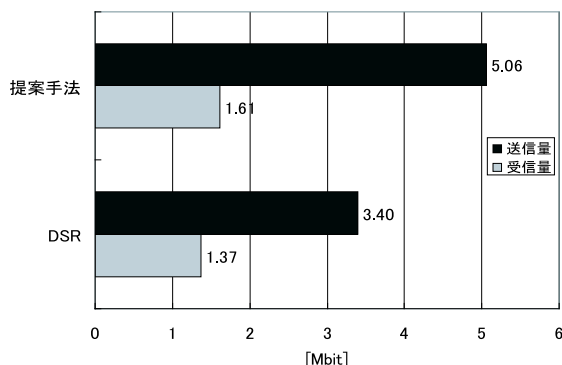


図 9: 送信量と受信量 (ノード数:7)

CSMA/CA では、無線信号の有無を確認することで送信の可否を決定する。よって、送信要求を持つノードに隣接するノードがメッセージを送信している場合、送信を延期することでメッセージの衝突を回避する。しかし、2 ホップ先のノードが送信した無線信号を確認することはできないため、メッセージを紛失する。この問題は一般に、隠れ端末問題として知られている。

隠れ端末問題の解決法としては、RTS/CTS による送信権の予約が提案されている。しかし、本提案手法に RTS/CTS を導入した場合、無線信号の最大到達範囲内の送信権を予約するため、送信機会を増加することができず、エンド-エンドのスループットを向上できない。よって、送信電力を制御し、無線信号の到達範囲を可変とした場合でも、隠れ端末問題を解決する手法が必要である。

6 まとめと今後の課題

本論文では、送信電力制御を利用して DSR において競合の発生を削減し、スループットを向上する手法を提案した。また、シミュレーションによって、提案手法を評価した。シミュレーション結果から、本提案手法により、送信機会が増加し、エンド-エンドのスループットが向上することが確認された。しかし、隠れ端末問題によるメッセージの紛失が発生していることが確認された。そこで今後は、送信電力制御を利用した環境において、隠れ端末問題を解決する手法を検討し、本提案手法に組み込む。

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. and Tassiulas, L., "Energy Conserving Routing in Wireless Ad-hoc Networks," Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000, pp. 22-31 (2000).
- [4] Corson, M.S. and Macker, J., "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," RFC 2501 (1999).
- [5] Johnson, D.B., Maltz, D.A. and Hu, Y.C., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-09.txt (2003).
- [6] Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S., "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC 3561 (2003).
- [7] Ramanathan, R. and 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. and 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. 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).
- [10] Singh, S. and 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] 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).
- [12] 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).