

## 電力制御を利用した MANET における通信遅延短縮手法

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

E-mail: {shin5,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

モバイル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、近傍のモバイルコンピュータとの通信では、遠方のモバイル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エンド-エンドの通信遅延を短縮する手法を提案し、その有効性の評価を行なう。

## PowerControl Based Adhoc Routing Protocol

Shingo Umeshima Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {shin5,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モバイル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。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る。これらのプロトコルは、送信先との距離に関わらず、一定の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、送信元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。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、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。

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。各モバイルコンピュータが、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、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、モバイル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、エンド-エンドの通信遅延の短縮を実現する。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。

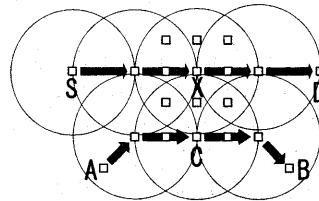


図1: 隣接経路による競合

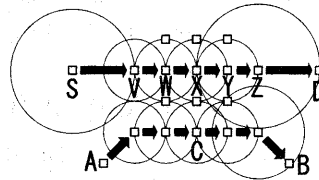


図2: 電力制御による競合の回避

## 2 送信電力制御MACプロトコル

送信電力制御MACプロトコル [9,10]では、既存の無線LANプロトコルと同様に、通信制御方式としてCSMA/CAを採用している。

2つのモバイルコンピュータ(ノード) $T$ - $R$ 間の電磁波による通信において、 $T$ の送信電力 $P_T$ と、 $R$ 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 $T$ - $R$ 間の距離、 $n$ は空間係数(一般に2~6)、 $g_T$ 、 $g_R$ はそれぞれ $T$ 、 $R$ のアンテナゲインである。よって、 $T$ - $R$ 間の通信に必要な最小送信電力を求めるには、相手が送信したメッセージの送信電力がわかればよい。

そこで送信電力の制御のため、各ノードは送信電力をメッセージに格納する。メッセージ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。各ノードがメッセージを送信する場合、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メッセージ(例えば RTS や CTS)やブロードキャストメッセージは、最大送信電力を用いて送信する。

### 3 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。

### 4 送信範囲と通信遅延の関係とその解決手法

MANET におけるエンド-エンドの通信遅延の要因として、以下の 2 つがある。

- 競合による待ち時間
- 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 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。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 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、エンド-エンドの通信遅延が大きくなる。よって、異なる経路間で発生する競合を削減することで、エンド-エンドの通信遅延を短縮することができる。

異なる経路間で発生する競合は、図 3 のように、並行、合流、交差の 3 つに分類される。

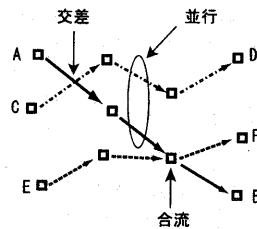


図 3: 経路の合流と交差

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。

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 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、エンド-エンドの通信遅延が短縮される可能性がある。

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。

以上のように、並行した経路と合流した経路を検出したノードが、それぞれ局所的に経路を変更することにより、競合を削減し、エンド-エンドの通信遅延を短縮することができる。

## 5 提案手法

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。これによってエンド-エンドの通信遅延を短縮する。

### 5.1 経路分離アルゴリズム

図 4 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、通信遅延を大きくする。そこで図 4 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。

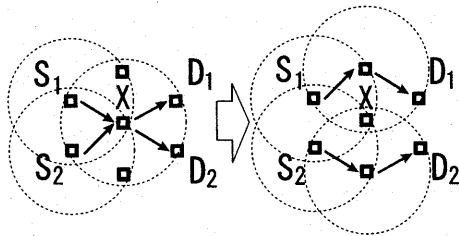


図 4: 経路分離アルゴリズム

[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  $S_i \in R_i$  へ合流の検出を通知する経路変更提案メッセージ PUPPROP( $R_i$ ) をユニキャストで送信する。
3. PUPPROP( $R_i$ ) を受信した  $S_i$  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 (図 5)。
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

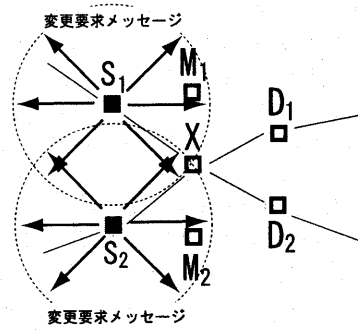


図 5: 経路変更要求メッセージ

を  $S_i$  へユニキャストで送信する (図 6)。

- 4-1.  $M_i$  が  $R_i$  以外の経路に含まれている場合は、 $M_i$  を  $R_i$  に含むことを拒否するために経路変更否定応答メッセージ PUNACK( $R_i$ ) を  $S_i$  にユニキャストする。ここで、 $R_i$  以外の経路とは、エンド-エンドの異なる経路のことである。
- 4-2.  $M_i$  が  $R_i$  以外の経路に含まれていない場合は、 $m_i \in R_i$  かつ  $m_i \in \text{Range}(M_i, P_{max})$  で  $S_i$  よりも送信先ノードに近いノード  $m_i$  が存在するかを確認する。ただし、 $\text{Range}(n, p)$  とは、ノード  $n$  の送信電力  $p$  による無線信号到達範囲である。
  - 4-2-1. 存在しない場合は、 $M_i$  を  $R_i$  に含むことを拒否する PUNACK( $R_i$ ) を  $S_i$  へユニキャストで送信する。
  - 4-2-2. 存在する場合は、 $M_i$  を  $R_i$  に含むことを許可する経路変更肯定応答メッセージ PUACK( $R'_i$ ) を  $S_i$  へユニキャストで送信する。ここで  $R'_i$  は  $M_i$  を含むように更新した経路情報である。

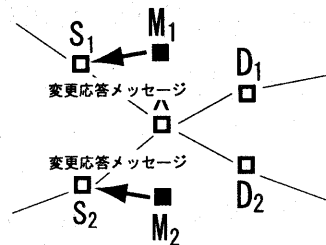


図 6: 経路変更応答メッセージ

5.  $S_i$  は受信した経路情報  $R'_i$  を送信元ノードへ通知する。□

## 5.2 送信範囲縮小アルゴリズム

図7左図のように、無線信号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。そこで図7右図のように、経路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。

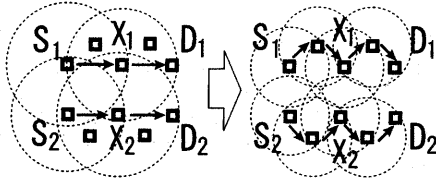


図7: 送信範囲縮小アルゴリズム

[送信範囲縮小アルゴリズム]

1.  $X_i \in R_i$  が、 $R \neq X_i$  である  $R$  へ配達されるメッセージを受信することによって、無線信号到達範囲の重複を検出する。
2.  $X_i$  は、送信範囲縮小提案メッセージ  $\text{PSPROP}(R_i)$  を  $S_i$  に対する最小送信電力  $P(S_i)$  を用いてブロードキャストする (図8)。

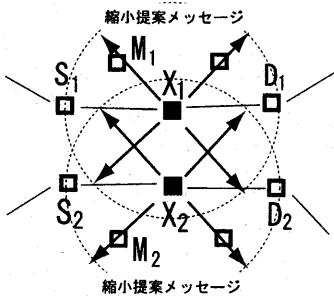


図8: 送信範囲縮小提案メッセージ

3.  $\text{PSPROP}(R_i)$  を受信した  $S_i$  は、送信範囲縮小要求メッセージ  $\text{PSREQ}(R_i)$  を送信したかを確認する。送信していないのならば、 $P(X_i)$  を用いて  $\text{PSREQ}(R_i)$  をブロードキャストする (図9)。
4.  $\text{PSPROP}(R_i)$  と  $\text{PSREQ}(R_i)$  の両方を受信したノード  $M_i$  は、以下の手順によって  $R_i$  に加わることを可否を決定し、縮小応答メッセージを  $S_i$  へユ

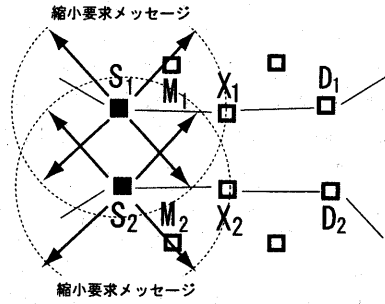


図9: 送信範囲縮小要求メッセージ

ニキャストで送信する (図10)。

- 4-1.  $M_i$  が  $R_i$  以外の経路に含まれているかを確認する。含まれている場合は、 $M_i$  を経路に含むことを拒否するために送信範囲縮小否定応答メッセージ  $\text{PSNACK}(R_i)$  を  $S_i$  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、 $M_i$  を含むことを許可する送信範囲縮小肯定応答メッセージ  $\text{PSACK}(R'_i, P(m_i))$  を  $S_i$  にユニキャストする。ここで、 $R'_i$  は  $M_i$  を含むように更新した経路情報である。また、 $P(m_i)$  は、 $m_i \notin R_i$  かつ  $P(m_i)$  が最小である  $P(m_i)$  である。

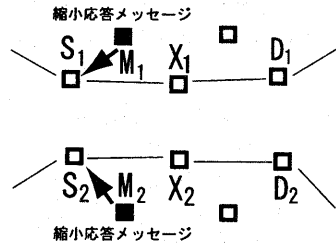


図10: 縮小応答メッセージ

5.  $X_i$  は  $\text{PSACK}(R'_i, P(m_i))$  に含まれる経路情報を送信元ノードへ通知する。複数の  $\text{PSACK}$  を受信したならば、 $P(m_i)$  がもっとも大きい  $R'_i$  を選択する。□

## 6 評価

提案手法によって、エンド-エンドの通信遅延が短縮することをシミュレーションによって評価した。図11のノード分布において、ノード  $S_1, S_2$  がそれぞれ  $D_1, D_2$

に1秒間メッセージを送信するものとし、ネットワーク層にIEEE802.11b、電力制御MACプロトコル、それぞれを用いてDSRによって経路を構築した場合と、DSRに送信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ットを比較した。無線信号の最大到達範囲は50mである。結果を図12に示す。

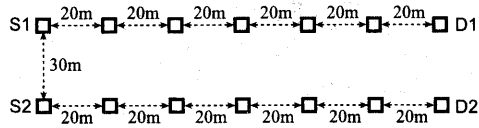


図 11: シミュレーションにおけるノード配置

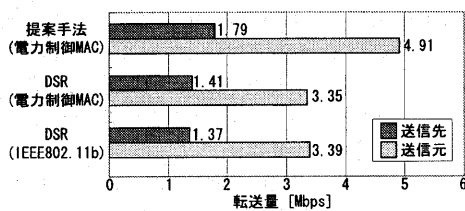


図 12: シミュレーション結果

図12に示されているように、提案手法によって、送信、受信側双方のスループットが高くなることが確認できた。しかし、いずれの場合も、送信量に対し受信量が小さく、メッセージを紛失している。これは同一経路上のノード間でメッセージが衝突しているためと考えられる。

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、メッセージの衝突が発生する。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、遅延時間が短縮されず、エンド-エンドの通信遅延を短縮できない。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。

## 7 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、通信遅延を短縮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、通信遅延が短縮され、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., 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] Johnson, D. B., Maltz, D. A., 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., Das, S., "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC 3561 (2003).
- [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] 佐川, 神林, 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, 松垣, "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).