

[チュートリアル講演]  
アドホック/メッシュネットワークの要素技術と具体例  
ルーティング技術とその応用

岡田 啓†

†名古屋大学 エコトピア科学研究所  
〒464-8603 名古屋市千種区不老町 C3-1 (631)  
E-mail: †hiraku@m.ieice.org

**あらまし** アドホックネットワークは臨時的に構築されるネットワークであり、インフラストラクチャがなくても端末のみで構築することができるネットワークである。メッシュネットワークは集中管理を行う特別な制御局が存在しなくても相互接続を可能とするネットワークである。本稿ではアドホック/メッシュネットワークに関する要素技術としてルーティング技術を概説し、これを活用した具体例として、協力中継のためのルーティング技術、経路ダイバーシティを紹介する。

**キーワード** アドホックネットワーク, メッシュネットワーク, ルーティング

[Tutorial Lecture]  
Elemental Technology and Example of Ad Hoc and Mesh Networks  
Routing and Its Applications

Hiraku OKADA†

† EcoTopia Science Institute, Nagoya University,  
C3-1 (631) Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan  
E-mail: †hiraku@m.ieice.org

**Abstract** An ad hoc network can be temporary constructed by mobile nodes without any wired infrastructures. A wireless mesh network provides communication backbone with each other even if any central control stations do not exist. As an elemental technology for ad hoc and mesh networks, routing technique is introduced in this report. Some applications of routing technique such as routing for cooperative relay and route diversity are also described.

**Key words** ad hoc network, mesh network, routing

## 1. まえがき

アドホックネットワークはインフラストラクチャがなくても端末のみで構築することができるネットワークである。これに関し IETF (Internet Engineering Task Force) の MANET (Mobile Ad-hoc Networks) ワーキンググループを中心にルーティング技術についての議論が活発に行われてきた。メッシュネットワークは広い意味では相互接続を可能とするネットワークであるが、本稿では少し限定的に集中管理を行う特別な制御局が存在しなくても構築できる無線ネットワークを指す。メッシュネットワークの応用例には IEEE 802.11s が挙げられる。アドホック

ネットワークもメッシュネットワークも自律分散制御によりネットワークが構築される点では同じである。

本稿ではアドホック/メッシュネットワークに関する要素技術としてルーティング技術を概説し、これを活用した具体例を紹介する。なお、本稿の詳細な内容は [2] を参照されたい。また、本稿は [1] に掲載された内容である。

## 2. 要素技術

アドホック/メッシュネットワークではあるノードからあるノードへ他のノードを経由して情報を伝送する。ノードとそれらを結ぶリンクで示されるネットワークトポロジが与えられた

とき、始点ノードから終点ノードまでどのような経路を使って(どのノードを経由して)情報を伝送するかを決めるのがルーチング技術である。

## 2.1 ルーチングプロトコル

ルーチングプロトコルは、どのように必要な情報を集め、集めた情報からどのように経路を決め、どのように経路を指定するのかといった手順を定める。分類方法としては、経路の生成タイミング、情報収集・経路計算の方法、経路指定の方法が挙げられる。

経路情報の生成タイミングには、主にリアクティブ型とプロアクティブ型、これらを組み合わせ合わせたハイブリッド型がある。リアクティブ型では通信要求の発生に応じて経路探索を行う。プロアクティブ型は通信要求の有無に関わらず、経路を構築する。リアクティブ型は間欠的な通信に対しては制御オーバーヘッドを減らすことができるが、経路が構築されるまでに時間を要することや、パケット損失により経路探索が確実に行われない可能性がある。プロアクティブ型は通信要求発生時に経路が構築されるまで待つ必要がないものの、定期的に情報を交換する必要があるため、制御オーバーヘッドはリアクティブ型よりも多くなる。ただし、ノードの移動があまり生じない環境では情報交換の頻度を少なくできることに加え、定期的な情報交換により各リンクの品質を正しく評価することが可能である。

情報収集・経路計算としてベルマンフォードアルゴリズムやダイクストラアルゴリズムに基づく方法の他に、フラッディングに基づく方法がある。フラッディングはあるノードから送信された情報を各ノードが再送を繰り返すことでネットワーク全体に情報を広告する技術である。あるノードから経路探索メッセージや経路広告メッセージをフラッディングしたときのメッセージの伝達経路から、このノードへの経路を決める。

経路指定の方法として、有線ネットワークと同様、ソースルーチングとホップバイホップルーチングがある。ソースルーチングは中継ノードで経路表を持つ必要がない、ループが発生しないという長所があるが、データパケットに始点から終点までの経路情報を付加する必要がある。ホップバイホップルーチングは次ホップのみ指定すればよいが、各ノードで管理される経路表に不一致が生じるとループが発生することがある。

## 2.2 メトリック

メトリックはリンクや経路のコストを示す。無線リンクではメトリックはその無線通信路の通信品質や通信容量を反映したものを多用することが多い。適切なメトリックを用いることはルーチングによって決定される経路全体での通信品質向上につながる。ルーチングで用いられるメトリックにはいくつかの条件がある。

一つめはメトリックが通信品質に一致していることである。メトリックの値が小さければ小さい程(または大きければ大きい程)、通信品質が向上するように定めることが重要である。ただし、いくら通信品質に一致しているからといって、メトリックを容易に測定することができないのであれば使うことができない。

次にメトリックの変動が少ないことが挙げられる。メトリック

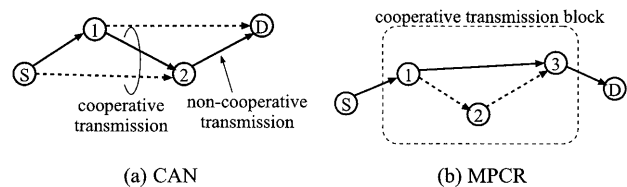


図1 協力中継における簡略化された経路探索手法

クの値が頻繁に変わると、使用する経路が頻繁に変わってしまったりループの発生につながる。

メトリックがルーチングアルゴリズムと合致することも大切である。ルーチングアルゴリズムはリンクメトリックから何らかの計算をしてパスメトリックを求め、これが最も小さくなるものを経路として選択する。このとき、パスメトリック算出の計算量が実用的な範囲でなければならない。

## 3. 具体例

ルーチング技術を活用したアドホック/メッシュネットワークの性能向上技術を紹介する。

### 3.1 協力中継のためのルーチング技術

協力中継のためのルーチング技術が最小エネルギー経路問題として検討されている。始点ノードから終点ノードまでである品質を満たしつつ情報が伝送されるのに要するエネルギーの総和を最小にするように、経路および協力中継に参加するノードを決定する。この問題はNP完全であることが示されている[3]。そこで、最適解ではないものの簡略化された経路探索手法が提案されている。

CAN (Cooperation Along the minimum energy Noncooperative path) [4] ではある品質を満たすのに要する送信電力をメトリックとして用い、協力中継を用いない場合においてパスメトリックが最小となる経路をルーチングプロトコルにより求め、この経路に含まれるノードのみが協力中継に参加する。図1(a)に示されるCANの動作例では、実線は協力中継を用いない場合に総送信電力が最小となる経路である。そして、この経路上のノードにより協力中継を行った方がメトリックが低くなる場合は、破線で示されるように協力中継に参加する。MPCR (Minimum Power Cooperative Routing) [5] では、各ノードは隣接ノードへデータパケットを送るのにどのノードと協力中継を行うとエネルギーが最小になるのかを予め調べて協力中継を行うブロックを決める。図1(b)では、ノード1はノード3への総エネルギーが最小となる協力中継ブロックを調べ、その結果、ノード2がこれに加わっている状態を示している。このときの総エネルギーをリンクメトリックとして用いる。そして、このリンクメトリックを用いて経路を探索することで、始点ノードから終点ノードまでの総エネルギーが最小となる経路を求める。

### 3.2 経路ダイバーシチ

無線分散ネットワークでは、始点ノードから終点ノードまでの経路に冗長性を持たせることで経路ダイバーシチの効果を求めることができる。経路ダイバーシチとして、送信ノードが複数の中継ノードを指定してデータパケットを送信する送信側が主

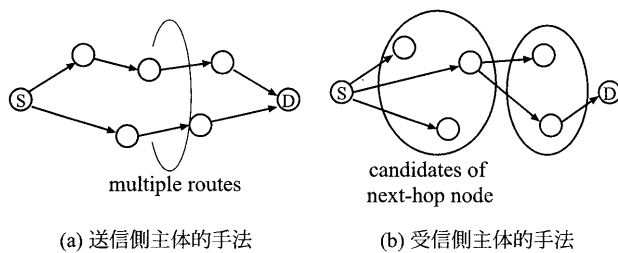


図2 経路ダイバーシチ

体的な手法(図2(a))と、送信ノードは二つ以上の受信ノードに対してデータパケットを送信し、この受信ノードのうち正しくデータパケットを受信したノードが再中継を行う受信側が主体的な手法(図2(b))がある。

マルチパスルーティングは始点ノードから終点ノードまで複数の経路を構築する手法である。送信側主体的手法ではこのマルチパスルーティングにより構築された複数の経路に、符号化により冗長化したデータパケットを分割して伝送することで経路ダイバーシチを得る。送信側主体的手法として、消失訂正符号を用いたもの[6]や、経路次元符号化を用いたもの[7]が挙げられる。

無線通信路の同報性を利用して、受信側が主体となって経路ダイバーシチ効果を得る手法として、Opportunistic Routing [8]がある。この手法では送信ノードが複数の受信ノードを指定してこれらに対しデータパケットを同報送信する。指定されたノードのうち、データパケットの受信に成功したノードが転送を行う。受信側主体的手法は結果としては単一の経路で送信されることになるが、その経路は事前に指定されたものではないため、パケット単位では異なる経路を通ることになる。このとき、伝送の成否に応じた経路を通るため、経路ダイバーシチの効果を得られる。

#### 4. むすび

本稿では自律分散制御を基本とするアドホック/メッシュネットワークにおいて、重要な要素技術であるルーティング技術について概説するとともにこれを活用した性能向上技術を紹介した。アドホック/メッシュネットワークでは本稿で紹介した具体例やネットワークコーディングの活用[9],[10]など自律分散ネットワーク特有の多くの技術があり、今後の更なる発展が期待される。

#### 文 献

- [1] 岡田啓, “アドホック/メッシュネットワークの要素技術と具体例: ルーティング技術とその応用,” 電子情報通信学会 総合大会, BT-6-1, pp.SS-46–SS-47, Feb. 2011.
- [2] 三瓶政一, 阪口啓(編), 無線分散ネットワーク, 電子情報通信学会, May 2011.
- [3] F. Li, K. Wu, and A. Lippman, “Energy-efficient cooperative routing in multi-hop wireless ad hoc networks,” IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, pp.215-222, 2006.
- [4] A.E. Khandani, J. Abounadi, E. Modiano, and L. Zheng, “Cooperative routing in static wireless networks,” IEEE Trans. Commun., vol.55, no.11, pp.2185-2192, Nov. 2007.
- [5] A.S. Ibrahim, Z. Han, and K.J.R. Liu, “Distributed energy-efficient

cooperative routing in wireless networks,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol.7, no.10, pp.3930-3941, Oct. 2008.

- [6] A. Tsirigos, and Z.J. Haas, “Analysis of multipath routing—Part I: The effect on the packet delivery ratio,” IEEE Trans. Commun., vol.3, no.1, pp.138-146, Jan. 2004.
- [7] H. Okada, N. Nakagawa, T. Wada, T. Yamazato, and M. Katayama, “Multi-route coding in wireless multi-hop networks,” IEICE Trans. Commun., vol.E89-B, no.5, pp.1620-1626, 2006.
- [8] S. Biswas, and R. Morris, “ExOR: Opportunistic multi-hop routing for wireless networks,” ACM SIGCOMM, pp.133-143, 2005.
- [9] S. Katti, H. Rahul, D.K. W. Hu, M. Médard, and J. Crowcroft, “XORs in the air: Practical wireless network coding,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.16, no.3, pp.497-510, June 2008.
- [10] S. Chachulski, M. Jennings, S. Katti, and D. Katabi, “Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing,” ACM SIGCOMM, pp.169-180, 2007.