

アドホックネットワークルーティング

角田 良明, 大田 知行

1. はじめに

アドホックネットワーク[16]とは、交換機や基地局に依存しない、交換機能を持つモバイル端末（以下、端末と呼ぶ）だけで構成される自律分散型ネットワークのことをいう。固定電話ネットワークでは、各家庭にある電話機、交換局にある交換機など常に同じ場所であり、それらをユーザが自由に動かすことができないため、ユーザは決まった場所しかこのネットワークを使用することができなかった。次に、携帯電話ネットワークでは、基地局のある範囲内であればユーザが自由にこのネットワークを使用することができる。これらに対して、アドホックネットワークでは、端末自体が交換機機能を有しているため自由に動かすことができる。遠くに離れたユーザとの通話は、相手のユーザの途中にいるユーザの端末を経由することにより行うことができる。

端末だけでネットワークを構成することができるため、いつでもどこでも、何人かのユーザが集まった時点で即座にネットワークを構築することが可能である。また、各地域でのコミュニティ単位でも即席のネットワークを構築することが可能である。

ユーザ間の通信には、音声、データ等のさまざまなパケットが送受信されている。これらをユーザ間にあるどの端末を経由すれば、効率良く送受信ができるかどうかを考える必要がある。このパケットを転送する端末間の経路を決定することをルーティングと呼ぶ。本稿では、ユーザ間で通信を行うために必要となる技術の一つであるルーティングに焦点をおいて述べる。端末間のアクセス方式等のメディアアクセス制御方式については、文献[19]を参照されたい。

2. ルーティングアルゴリズム

ある端末 A が別な端末 B にパケットを送信することを考える。 A と B が電波の届く範囲内にあるなら、隣接関係にあるという。このとき、 A からパケットを送信することにより、 A から B へのパケット送信が可能となる。 A と B の間に複数の端末（以下、中間端末と呼ぶ）が存在する場合には、これらの端末を経由して A から B へのパケット送信を考える必要がある。アドホックネットワークにおいて、中間端末の間でどの端末を経由してパケットを転送していくかを決定するルーティングは極めて重要な技術である。ルーティングのためのアルゴリズムを単にルーティングアルゴリズムと呼ぶ。ルーティングアルゴリズムは、経路の生成、維持、消滅によって構成される。

ルーティングアルゴリズムには、大きく分けてテーブル駆動型、オンデマンド型、ハイブリッド型の三つの方式が存在する。テーブル駆動型は、各端末が隣接関係にある端末とそれらの端末が持つネットワークトポロジ情報を交換することによって、各端末の経路表が作成される。この経路表を利用することにより、経路の生成、維持、消滅が行われる。オンデマンド型は、フラッディング（節2.2参照）を利用することにより、経路の生成、消滅を行う。経路の維持は、経路生成時に各端末が作成した情報を、各端末が隣接関係にある端末と交換することによって行われる。ハイブリッド型は、テーブル駆動型とオンデマンド型を組み合わせた方式である。本節では、テーブル駆動型、オンデマンド型、ハイブリッド型のそれぞれについて概略を説明する。

2.1 テーブル駆動型

テーブル駆動型は、proactive型とも呼ばれる。テーブル駆動型の主な特徴は、各端末が経路表を持っていることである。図1に示すように、送信元 A が送信したパケットは、中間端末 (B, E, I) の持つ経路表に基づいて受信先 (K) へ転送される。経路表には、

かくだ よしあき, おおた ともゆき
広島市立大学 情報科学部
〒731-3194 広島市安佐南区大塚東3-4-1

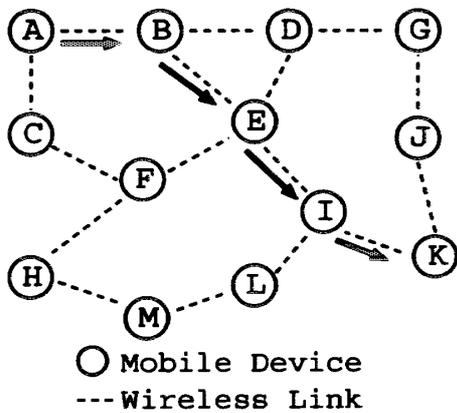


図1 テーブル駆動型

ネットワーク中のすべての端末ごとに、最終的な宛先の端末の ID、その端末へ送るために次に転送すべき端末の ID、最終的な宛先までのホップ数等が記入されている。この経路表を作成するためには、各端末は定期的に制御メッセージを隣接している端末と交換する必要がある。テーブル駆動型では、端末同士の制御メッセージの交換により、あらゆる端末への経路が作成されている。そのため、パケットの送信要求が発生するとすぐに、その宛先へパケットを転送することが可能である。

しかしながら、端末数の増加に伴い、経路表の大きさが大きくなってしまったり、端末の移動の速度が速いことによるネットワークトポロジの頻繁な変化により、経路表を作成するための制御パケットの交換頻度が高くなってしまったり、端末の処理能力や端末間の帯域に非常に大きな負荷を与えてしまうといった問題がある。

Destination Sequence Distance Vector (DSDV) [2]は、Bellman-Ford[1]のルーティングアルゴリズムの考えに基づいたアルゴリズムである。各端末の経路表は、到達可能な受信先への、次に転送すべき端末とホップ情報をエントリとして持っている。各エントリはシーケンス番号を持ち、シーケンス番号の最も大きいエントリが使用される。シーケンス番号が同じ場合には、受信先までのホップ数等のメトリックの小さい方が使用される。

2.2 オンデマンド型

オンデマンド型は、reactive 型とも呼ばれる。オンデマンド型の特徴は、通信要求が発生すると送信元と受信先間のルーティングを行うことである。

送信元において、通信要求発生時に、ネットワーク中のどこかに存在する通信相手（受信先）を探索し、

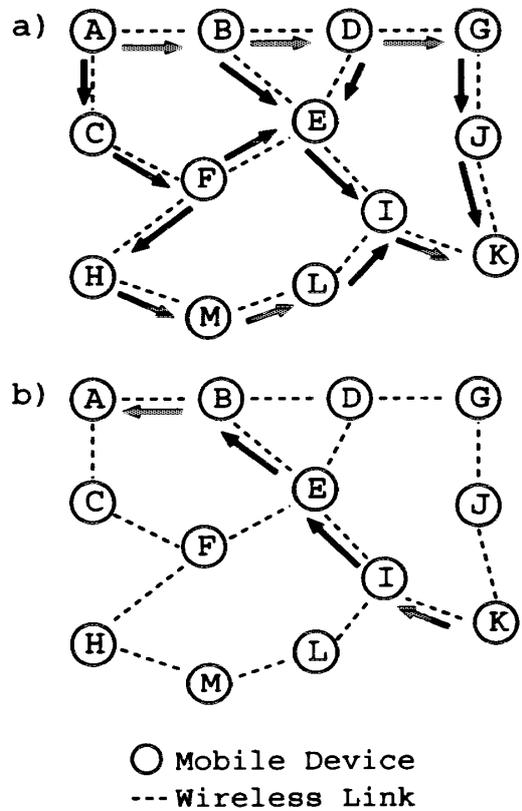


図2 オンデマンド型

これらの2点間での経路を生成した後に、送信元から受信先へパケットを転送する。送信元 A から受信先 K 間のパケットを転送するまでの手順について図2に基づいて説明する。図2 a)に示すように、最初、送信元 A が受信先 K を探すための要求メッセージをネットワーク中に送信する、つまりフラッディングを行う。K が A からの要求メッセージを受信すると、そのメッセージが転送された経路の逆をたどって、応答メッセージを送信する（図2 b)）。送信元 A がその応答メッセージを受信により、受信先 K の存在が確認できる。A から送信されるパケットは、応答メッセージが転送されてきた中間端末を逆にたどることによって転送される。

オンデマンド型では、送信要求が発生するまで、経路表作成等の制御メッセージの交換を行わないので、テーブル駆動型と比較すると、送信要求が発生していない間の各端末の負荷は非常に小さい。しかしながら、送信要求が発生して、その受信先を探すために時間が必要となる。これは、ネットワークのサイズが増加すればするほど、この探索のために非常に多くの時間を必要とする可能性がある。

Dynamic Source Routing (DSR) [3]は、パケットが通過する端末の情報がそのパケットのヘッダに含ま

れている。そのため、中間の端末が経路情報の維持、更新等を行う必要がない。Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) [10]は、DSRとDSDVを組み合わせた方式である。経路生成、経路維持はDSRの手法、加えて、DSDVで使用されているシーケンス番号を利用したアルゴリズムである。Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA) [6]では、各端末がheightと呼ばれる情報を持っている。受信先の端末のheightを最も低い値とし、このheightの値が高い端末から低い端末に対してパケットを転送していくしくみとなっている。TORAでは、ネットワークトポロジの変化に対しheightを変更することによって、結果として経路を維持している。

2.3 ハイブリッド型

ハイブリッド型とは、テーブル駆動型とオンデマンド型の二つの要素を併せ持った方式である。Zone Routing Protocol (ZRP) [14]と呼ばれる。端末は、自分自身の近くにいる端末については、それらへの経路表を持ち、テーブル駆動型でルーティングを行う。一方、遠くにいる端末については、オンデマンド型でルーティングを行う。

図3a)を基に説明する。端末は、端末自身から、ホップ数が定数*i*以下の端末までを近くにいる端末として認識しているとする。図中の端末Aから見て、

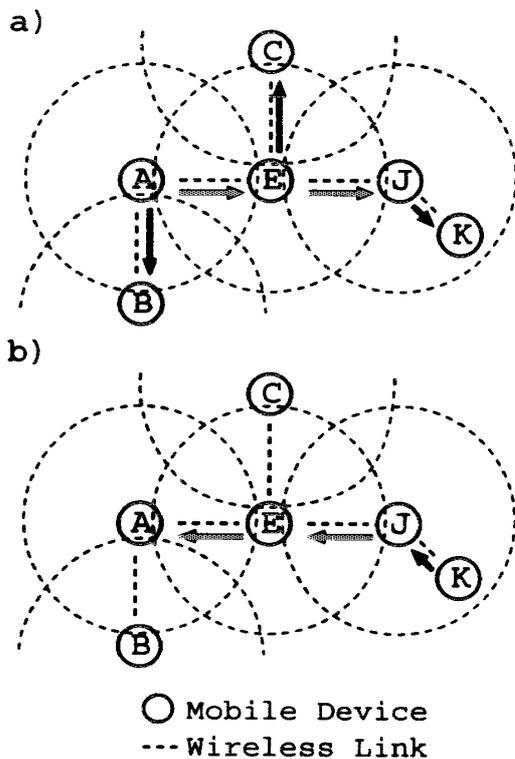


図3 ハイブリッド型

端末BとEはAの近くの端末である。AがKへのルーティングを行うときに、Aのすべての*i*ホップ先の端末B、Eに対してメッセージを送信する。次に、Eから見て*i*ホップ先の端末であるC、Jに対してメッセージを送信する。Jは、端末Kが存在することを経路表により知っているため、端末JとJから*i*ホップ以内に存在する周辺の端末の経路表に基づいてKまでメッセージを転送する(図3b))。要求メッセージを受信したKは、応答メッセージをAからの要求メッセージの逆順に転送する。転送後は、オンデマンド型と同じ方式でAとKの間のルーティングが行われる。

3. 階層ルーティング

テーブル駆動型、オンデマンド型の方式を平面ルーティングと呼び、ハイブリッド型の方式を階層ルーティングと呼ぶ。ハイブリッド型の説明でも示したように、階層ルーティングではいくつかの端末のグループを作ることにより、グループ間でルーティングを行う方式である。仮想的にネットワークを階層化しているため、階層ルーティングと呼ばれる。また、グループのことをクラスタ、グループ分けをすることをクラスタリングと呼ぶ。

ネットワーク中の端末が少ない場合には、平面ルーティングの方が有効である。しかしながら、ネットワーク中の端末が多い場合には、テーブル駆動型、オンデマンド型ともいくつかの問題が発生する。テーブル駆動型では、各端末の持つ経路表のサイズが大きくなる。この経路表は、ネットワークのトポロジーが変更されるたびに最新の情報に基づいて更新される必要がある。端末の移動に経路表の情報更新が追い付かなくなり、正確な経路に沿ったパケット転送ができない可能性がある。また、オンデマンド型では、送信元と受信先間の経路の生成に時間がかかることや、フラッディングに依存しているため、効率の良いフラッディングを行わなければ莫大な数の要求メッセージを必要とする。

階層ルーティングでは、クラスタ外の端末を探索する場合に、フラッディングが用いられるが、クラスタ単位でフラッディングが行われるため、すべての端末に対してフラッディングを行うよりも少ない要求メッセージ数で探索が可能であり、平面ルーティングより有効であると考えられる。本節では、最初にクラスタリングについて説明し、次にクラスタリングを利用し

たルーティングアルゴリズムについて説明する。

3.1 クラスタリング

図4に典型的なクラスタリングとして、ワンホップクラスタリング[5, 9, 13]で用いられるクラスタ構成を示す。ワンホップクラスタリングでは、クラスタ内の端末はそのクラスタヘッドから1ホップ内にあるようにクラスタを構成する。ワンホップクラスタリングの特徴は、クラスタの構成にかかる時間が非常に短いことが上げられる。図中のいくつかの端末を囲んでいる点線の範囲内を一つのクラスタとして考える。例えば、端末A, B, C, Dで一つのクラスタを構成している。このとき、二重丸で示される端末Bは、このクラスタのクラスタヘッドである。クラスタヘッドは、クラスタの管理等の中心的な役割を果たす端末として機能する。B以外の端末は単にクラスタBに属するクラスタメンバであり、単にメンバと呼ばれる。メンバは、クラスタヘッドと隣接関係でなければならない。また、端末DはBをクラスタヘッドとするク

ラスタとEをクラスタヘッドとするクラスタの二つのクラスタのメンバとなっている。この二つ以上のクラスタのメンバとなっている端末は、ゲートウェイとなる。パケットがゲートウェイを経由することにより、クラスタ間でのパケットの転送を行う。

アドホックネットワークでは端末が常に移動しているため、頻繁なトポロジーの変化が起こる。ルーティングと同様に、トポロジー変化に対してクラスタ構成を維持する必要がある。ワンホップクラスタリングでのクラスタ構成を維持するための手法について下記に説明する。

1. 隣接関係にあるクラスタヘッドが存在しない場合は、その端末自身がクラスタヘッドとなる。
 2. クラスタヘッド同士が隣接関係となった場合、どちらかの端末がその役割を放棄する。
- 2.のクラスタヘッドの選択アルゴリズムに関しては、例えば、端末の持つIDが小さい方がクラスタヘッドの役割を放棄する等がある。このクラスタヘッドの効

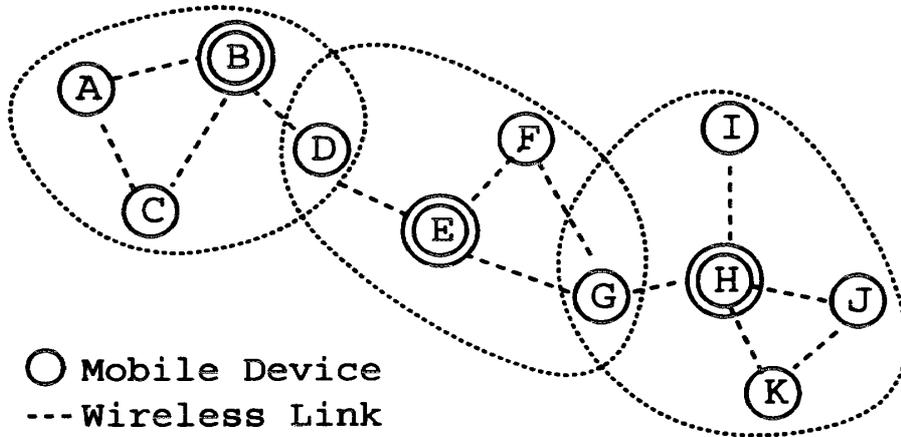


図4 ワンホップクラスタリング

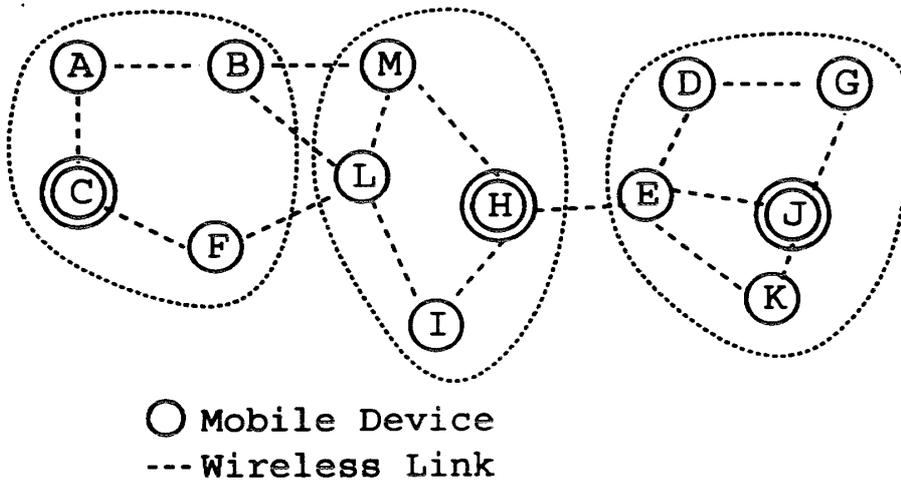


図5 マルチホップクラスタリング

率的な選択アルゴリズムに関する研究も行われている。

ワンホップクラスタリングでは、トポロジー変化の頻度が高い場合、つまり、端末の移動が頻繁に起こる場合、頻繁なクラスタの生成、消滅、再構成といった問題が発生する可能性がある。また、一つのクラスタがクラスタヘッドとその隣接端末で構成されるため、端末の密度（単位面積当たりの平均端末数）によっては、クラスタリングの有効性が失われる可能性がある。高密度な場合は、クラスタヘッドの管理するメンバー数が非常に大きくなってしまい、クラスタヘッドに大きな負荷を与えてしまう。低密度な場合は、クラスタヘッドが管理するメンバー数が少なくなってしまい、クラスタヘッドの数とネットワーク中の端末数がほぼ等しくなり、クラスタリングの効果が失われしまう可能性がある。これらの問題を解決するために、マルチホップクラスタリング[12, 15, 20]が提案されている。

図5にマルチホップクラスタリングで用いられるクラスタ構成を示す。マルチホップクラスタでのクラスタの条件は以下の通りである。

1. クラスタヘッドから2ホップ以上離れたクラスタメンバーは、同じクラスタに所属するクラスタメンバーによって連結されていなければならない。

文献[20]のマルチホップクラスタリングでは、さらに次の条件が加わる。

2. クラスタヘッドが管理するクラスタメンバーの数を指定した範囲内とする。

これらの条件1, 2により、クラスタの地理的な大きさが大きくなることにより、端末移動速度が高い場合においても効率の良いクラスタリングが可能になっている。また、クラスタをクラスタメンバー数によって定義しているため、端末の密度に依存しないクラスタリングを行うことができる。また、すべてのクラスタサイズを均等にすることによりクラスタヘッドの負荷を均一にすることが可能となる。

3.2 階層ルーティングアルゴリズム

図6に、ワンホップクラスタリングでの階層ルーティング[4]を示す。端末AからKへの通信を考える。最初に、Aは、Aが所属するクラスタのクラスタヘッドであるBに要求メッセージを送信する。Bは、すべてのゲートウェイC, Dに要求メッセージを転送する。次にこれらのゲートウェイが別のクラスタヘッドに要求メッセージを転送する。この流れを繰り返すことにより、端末Kと隣接しているクラスタヘッド

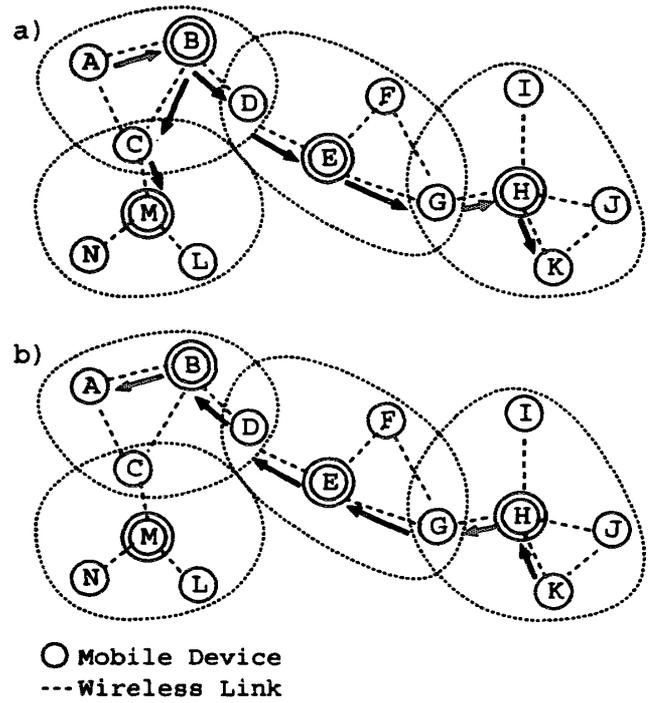


図6 ワンホップクラスタリングでの階層ルーティング

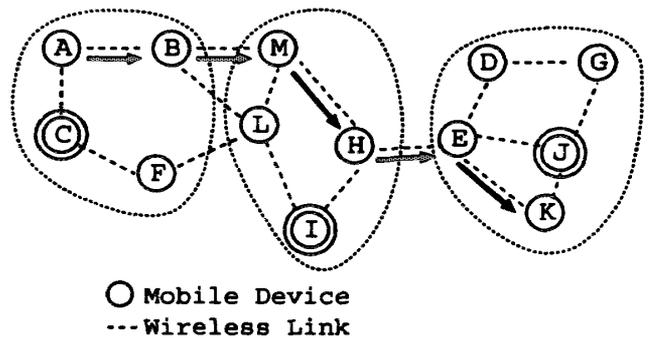


図7 マルチホップクラスタリングでの階層ルーティング

ドHに要求メッセージが転送されると、HはKに要求メッセージを転送する。このとき、初めて、クラスタヘッドでなくゲートウェイでもない端末にメッセージが転送されたこととなる。つまり、クラスタヘッドとゲートウェイである端末間のみで要求メッセージを転送することにより、ネットワーク全体の要求メッセージの個数を減少させることができる。最後に、Kから要求メッセージの転送の逆順をたどることにより、送信元Aと受信先K間の経路が設定される。

図7に、マルチホップクラスタリングでの階層ルーティング[18]を示す。ワンホップクラスタリングを用いた場合、すべてのクラスタメンバーは、クラスタヘッドと隣接関係にあったため、クラスタ内での経路表を持つ必要がなかった。マルチホップクラスタリングを用いた場合、各クラスタにおいて、隣接関係にない端末が存在するため、端末はクラスタ内専用の経路表を

持つ必要がある。各クラスタにおいて、隣接クラスタの端末と隣接関係にある端末がゲートウェイとなる。

端末 A から K への通信を考える。送信元 A は、クラスタ内の経路表によりゲートウェイである端末 B へ要求メッセージを送信する。ゲートウェイ B は隣接関係にあり、かつ、異なるクラスタに所属するゲートウェイ M に要求メッセージを転送する。要求メッセージを受信した M は、クラスタ内の経路表で K のエントリを確認する。しかし、 K のエントリが存在しないため、クラスタ内の経路表に基づいて他のゲートウェイ H に要求メッセージを転送する。 H は、 E に要求メッセージを転送する。要求メッセージを受信した E が持つクラスタ内の経路表には K がエントリとして存在しているため、この経路表を利用して要求メッセージが転送される。最後に、 K から要求メッセージの転送の逆順をたどることにより、送信元 A と受信先 K の間の経路が設定される。

4. マルチキャストルーティング

現在の有線ネットワークでは、ネットワークトポロジが変化することは少ない。しかしながら、アドホックネットワークでは、端末の移動により頻繁なネットワークトポロジの変化が起こる。そこで、ネットワークトポロジの変化に高い適応力を持つ新しいマルチキャストのためのルーティングアルゴリズムを必要とする。本節では、マルチキャストのためのプロトコルを紹介する。

4.1 DVMRP

Distance Vector Multicast Routing Protocol (DVMRP) [7] は、有線ネットワークのために設計されたルーティングプロトコルである。DVMRP は、送信元の端末を根とする木を構成し、その木に沿ってパケットを流す。アドホックネットワークで使用するために、リーフ端末の検出や、動的な枝の接続や切断を行えるように拡張している。

4.2 CAMP

Core Assisted Mesh Protocol (CAMP) [11] は、マルチキャストグループのためにマルチキャストメッシュを構築する。いくつかのコアとして選択された端末が、新しい端末の加入の補助を行う。送信元も受信先もこのマルチキャストメッシュに加わる必要がある。新しく加わるメンバは、このマルチキャストメッシュに加わっている端末が近くにいない場合は、コアにマルチキャストメンバへの加入を通知する。このとき、

ユニキャストルーティングを必要とする。

4.3 ODMRP

ODMRP [8] は、フラッディングをベースとしたプロトコルである。しかしながら、本来のフラッディングとは異なり、フォワーディンググループ内のみでフラッディングを行う。フォワーディンググループとは、マルチキャストグループのためにマルチキャストのトラフィックを転送するために選択された端末の集合である。送信元の広告と受信先の加入メッセージのブロードキャストによりフォワーディンググループが構成される。

4.4 LBM

Location Based Multicast (LBM) [17] は、マルチキャストグループへパケットを伝達するために位置情報を利用する。送信元は、マルチキャスト領域と呼ばれる特別な領域に存在する端末に対してパケットを送信する。このとき、送信元がマルチキャスト領域の中に存在しない場合は、中間に存在する端末により送信元からマルチキャスト領域の中の端末までパケットが転送される。

5. その他の課題

5.1 セキュリティ技術

アドホックネットワークでは、送信元から受信先へメッセージを送るとき、それらの間にいる端末を経由してパケットが転送される。つまり、中間の端末は、簡単に二者間に流れるパケットを盗聴することが可能であると考えられる。第三者にパケットを盗聴されたとしても、中身を判別できないようにするために、そのパケットに対して暗号化を行う必要がある。現在、インターネット上には数多くの暗号化技術が使用されている。しかしながら、それらの技術をアドホックネットワークにそのまま適用することは現在の段階においては非常に難しい。第一に、暗号化をするために多くの CPU パワーを消費してしまう。第二に、パケットを暗号化したことにより、パケットが冗長になってしまう。

5.2 電池寿命

送信元、受信先以外の端末であっても、他の端末のパケットを転送しなければならないため、常に何らかのパケットを転送している状態となる。つまり、常に通話している状態と同等の状態となる。そのため、ユーザが端末を使用していなくても電池が消耗してしまう。

6. おわりに

本稿では、アドホックネットワークにおけるルーティング方式であるテーブル駆動型、オンデマンド型、ハイブリッド型、および、クラスタリングを導入した階層ルーティングについて紹介した。また、一対多の情報転送方式であるマルチキャストルーティングについての紹介も行った。アドホックネットワークでは端末が常に動き回るため、端末間の経路確立後の経路の維持は非常に重要な課題であり、今後の研究の進展が期待されている。

参考文献

- [1] D. Bertsekas and R. Gallager: "Data Networks", Prentice Hall, 1987.
- [2] C. E. Perkins and P. Bhagwat: "Highly dynamic Destination Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers", Proc. SIGCOMM. '94, pp. 234-244, 1994.
- [3] D. B. Johnson and D. A. Maltz: "Dynamic source routing in ad hoc wireless network", Mobile Computing, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [4] C. Chiang, H. Wu, W. Liu and M. Gerla: "Routing in Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Channel", Proc. of the IEEE Singapore Int'l Conf. on Networks (SICON), pp. 197-211, 1997.
- [5] C. R. Lin and M. Gerla, "Adaptive Clustering for Mobile Wireless Networks", IEEE JSAC, Vol. 15, No. 7, pp. 1265-1275, 1997.
- [6] V. D. Park and M. S. Corson: "A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks", Proc. IEEE INFOCOM. '97, pp. 1405-1413, 1997.
- [7] M. Gerla, C. C. Chiang and L. Zhang: "Tree Multicast Strategies in Mobile, Multihop Wireless Networks", ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications Journal, 1998.
- [8] C. C. Chaing and M. Gerla: "On-demand multicast in mobile wireless networks", Proc. of IEEE ICNP'98, 1998.
- [9] S. Basagni: "Distributed Clustering for Ad Hoc Networks", Proc. 99' Int'l Symp. on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks (ISPA'99), pp. 310-315, 1999.
- [10] C. E. Perkins and E. M. Royer: "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing", Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999.
- [11] J. J. Garcia-Luna-Aceves and E. L. Madruga: "The Core-Assisted Mesh Protocol", IEEE JSAC, Vol. 17, No. 8, pp. 1380-1394, 1999.
- [12] A. D. Amis, R. Prakash, T. H. P. Vuong and D. T. Huynh: "Max-Min D-Cluster Formation in Wireless Ad Hoc Networks", Proc. IEEE INFOCOM'2000, 2000.
- [13] 谷口, 井上, 増澤, 藤原: "アドホックネットワークにおけるクラスタ構成法", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-I, No. 2, pp. 127-135, 2001.
- [14] C. E. Perkins: "AD HOC NETWORKING", Addison-Wesley, 2001.
- [15] S. Banerjee and S. Khuller: "A Clustering Scheme for Hierarchical Control in Multi-hop Wireless Networks", Proc. IEEE INFOCOM'2001, 2001.
- [16] 間瀬, 中野, 仙石, 篠田: "アドホックネットワーク", 電子情報通信学会誌, Vol. 84, No. 2, pp. 127-134, 2001.
- [17] C. K. Toh: "Ad Hoc Mobile Wireless Networks", Prentice Hall PTR, 2002.
- [18] T. Ohta, M. Fujimoto, S. Inoue and Y. Kakuda: "Hi-TORA: Hierarchical Routing Protocol in Ad Hoc Networks", Proc. of the IEEE Int'l Symp. on High Assurance Systems Engineering (HASE 2002), pp. 143-148, 2002.
- [19] 蓮池, ソンブラカシュ, 植田: "アドホックネットワークの技術的課題", 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. 85-B, No. 12, pp. 2007-2014, 2002.
- [20] T. Ohta, S. Inoue and Y. Kakuda: "An Adaptive Multihop Clustering Scheme for Highly Mobile Ad Hoc Networks", Proc. of 6th IEEE Int'l Symp. on Autonomous Decentralized Systems (ISADS 2003), April 2003 to appear.