

アドホックネットワークが開く 新しい世界 (前編)



ATR 適応コミュニケーション研究所
小菅 昌克 kosuga@atr.co.jp

ATR 適応コミュニケーション研究所
板谷 聡子 itaya@atr.co.jp

ATR 適応コミュニケーション研究所
Peter Davis davis@atr.co.jp

(株) スカイリー・ネットワークス
梅田 英和 hidekazu.umeda@skyley.com

●アドホックネットワークとは何か●

近年、無線 LAN、Bluetooth をはじめとする短距離無線技術が急速に発展してきており、特にここ 2、3 年の無線 LAN (Wi-Fi) の普及、低価格化は目覚ましい。無線 LAN によって我々は、ケーブル配線の制約に煩わされることなく、家庭や職場の好きな場所でインターネットにアクセスすることができるようになった。また同じ短距離無線の一種である Bluetooth を利用すれば、マウスやキーボードを無線で PC と接続できるため、机上からケーブル類を一切なくすることも可能となった。

アドホックネットワークとは、上記のような新しい無線メディアの特長を最大限に利用して、単なるケーブルの代替手段を超えた、その場限りの即時的な (=アドホックな) 無線通信網を構築するための技術である。アドホックネットワークにおいてネットワークは局所的であり、通信料金や加入手続きも必要なく、機器間同士が直接、自律的に通信を行う。これによってたとえばデジカメから無線でプリントアウトを行ったり、大規模な災害現場で即時的な無線通信網を構成したり、ビルの中に小型の無線機を設置して温度やセキュリティの管理を配線なしで行うなど、幅広い応用が期待できるようになる。

しかしながら短距離無線によるアドホックネットワークを構築するには、まだ解決すべき課題は多い。その代表例が「マルチホップ機能」と「アドホック機能」である。

アドホックネットワークとマルチホップ

マルチホップとは、短距離無線を搭載した各デバイスにデータの中継機能を持たせることで、パケットリレー式にデータの転送を繰り返し、電波の到達範囲外にある遠くの端末との通信をも可能にする技術のことである (図-1)。

無線メディアの一般的な特性として、通信距離、消費電力、通信スピードの 3 つは両立せず、いずれかを優先しようとするとは別のいずれかを犠牲にせざるを得ない。

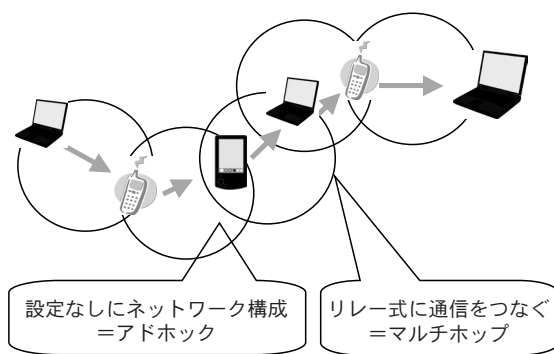


図-1 無線端末によるアドホックネットワーク

たとえば利用する周波数帯域を変えずに通信スピードを上げようとするれば、ビットエラー率を低く抑えるために通信距離は短くせざるを得ない。この際、同時に通信距離を長いまま保とうとすれば消費電力を上げて高い出力で電波を送出することになる。しかし出力の上限は電波法によって厳密に制約されており、簡単には上げることができない。そこで消費電力の低減と通信スピードの向上を優先し、代わりに通信距離を短く抑える道を選択する。そして短い通信距離の限界をマルチホップで克服しようとする。

マルチホップをサポートするアドホックネットワークでは、中継機能を持つ各端末として主に携帯電話やPC、PDA、専用機器が想定されている。そのため端末自体の移動やバッテリー切れなどによって、これまでデータを中継してくれていた端末が突然利用できなくなることも予想される。その場合、可能な限り素早く別の中継ルートを形成する必要があるのだが、従来のインターネットにおける経路制御技術では、アドホックネットワークが想定するような激しいトポロジの変化に追従できない。そこで、より動的で迅速な経路制御技術の確立が主な課題となってくる。アドホックネットワーク環境での経路制御についてはすでにさまざまな研究と提案がなされており、主にMANET (Mobile Ad-hoc NETWORK)¹⁾ WGが主体となって標準化作業が進められている。

「アドホック」であることの難しさ

またアドホックネットワークは、その名前が示す通り、その場限りの即時的な(=アドホックな)ネットワークを構成し、端末間でのデータ通信を可能にする。しかし、たとえばインターネットで用いられるIP(Internet Protocol)にアドホックネットワークを適用すると、以下のような根本的な問題が発生する。

1. 複数の端末のIPアドレスをいかにユニークに割り振るか
2. IPアドレスをユニークに割り振ったとして、端末と

アドレスの対応付けをどのように行うか

このような場合、IPネットワークではDHCPとDNSを利用するのが一般的である。しかしアドホックネットワークではDHCPやDNSへの到達性が必ずしも保証されていない。またネットワークへの参加や離脱が頻繁に発生するアドホックネットワークで従来型の名前解決機構が有効に働くかどうかとも検討が待たれるところである。

現状ではこれらの問題に対してZeroConfやUPnPが提案されている。前者のZeroConfはApple社が採用し、Apple社の最新のPCにランデブーという名称で搭載されている。またBluetoothという短距離無線の規格では、各無線モジュールにあらかじめ固有のBDアドレスと呼ばれる識別子を付与しておき、これを用いてアドホックネットワークを形成することで問題を解決する。またマルチホップ環境では、IP Auto Configurationなどの仕組みが提案されているが、まだ検討が始まったばかりであり、最終的な解決策は定まっていない。

このように、アドホックネットワークは、近年の新しい短距離無線メディアに着目して、マルチホップによる距離の延長と、アドホックによる即時的なネットワーク構築の問題に取り組んでいる。アドホックネットワークにおいては末端のデバイス同士で自律的かつ局所的な無線網を形成する。このため理論的には基地局設置コストを限りなくゼロに近づけることができ、従来の設備投資型通信事業モデルとは根本的に異なる無線通信サービスを提供できる可能性を秘めているといえる。またアドホックネットワークは、特定のアプリケーションに依存しない汎用的なネットワーク技術であるため、無線メディアを選択的に組み合わせることでさまざまな応用が可能である。有線の世界では一足先にインターネットが普及したが、無線の世界でもインターネット型のネットワークがようやく実用化されつつあるということに期待したい。

●標準化動向●

IETFのMANET (Mobile Ad-hoc Network) WGにて、アドホックネットワークに関する標準化が進められている。初期の段階では、数多くのルーティング方式がドラフトとして提案され^{2), 3)}、パフォーマンスの問題などが議論された。その後、コアプロトコルとして4つの方式(AODV, DSR, OLSR, TBRPF)がEXPERIMENTAL RFCとしてIESG (Internet Engineering Steering Group)に提出されている。今後は、セキュリティや輻輳制御についても取り組んでいくようである。一方、IRTFのAd hoc Network Scaling (ANS)

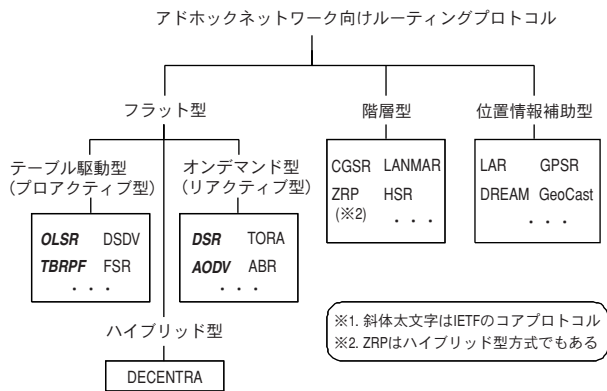


図-2 アドホックネットワーク向けルーティングプロトコルの分類

リサーチグループにて、大規模ネットワークへの適用へ向けてスケーラビリティの検討が開始された。

分類

アドホックネットワーク向けルーティングは、大きくはテーブル駆動型（プロアクティブ型）とオンデマンド型（リアクティブ型）、それらのハイブリッド型に分類される。また、その構造的長から、フラット型、階層型、位置情報補助型といった分類もされており⁴⁾、コアプロトコル群の各方式は、フラット型に属する（図-2）。

テーブル駆動型ルーティング

各ノードがネットワーク内の他ノードと経路に関する情報（トポロジ情報）を定期的に交換し、あらかじめ経路表を作成する方式である。DSDV, OLSR, TBRPF, FSR などがある。経路構築の手法として、距離ベクトル型（DV型）やリンク状態型（LS型）等が用いられており、DV型は有線のルーティング方式であるRIPで、LS型はOSPFで用いられている方式である。

(a) OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)

LS型のルーティング方式であり、周期的にトポロジ情報をネットワーク内の他のノードと交換する。OLSRの特徴は、トポロジ情報をネットワーク内の全ノードに伝えるための「フラッディング (flooding)」を効率よく行うためのプロトコルであるMPRs (multipoint relays) にある。

MPRsでは、定期的に隣接ノード情報等を含むパケットを送出し、結果、2ホップ先までのノード情報を知ることができる。その情報から、すべての2ホップ先のノードにパケットを転送可能な最小数の隣接ノードの集合である、MPR集合を決定する。このMPR集合に含まれるノードのみがトポロジ情報を転送することによって、発生するトラフィック量を削減できる（図-3）。しかしながら、最適なMPR集合を見つけることはNP完

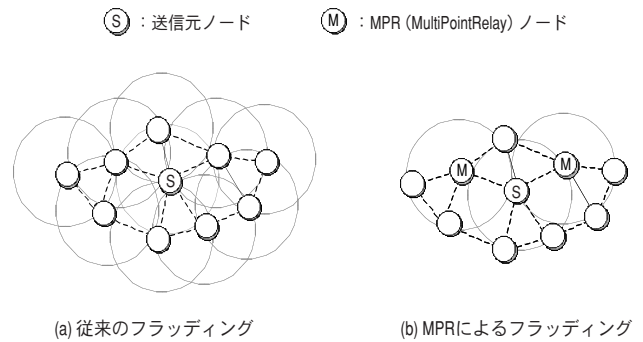


図-3 MPRによるフラッディングの効果

全クラスの問題となるため、OLSRでは最適性にはこだわらずに、効率的にある程度よい解を導くアルゴリズムが提案されている。また、ノード間で交換されるトポロジ情報はMPRセレクト集合から構築されたものであり、実際のリンクよりも少ないリンクを用いることで、交換するトポロジ情報量を削減できる。

(b) TBRPF (Topology Broadcast Based on Reverse Path Forwarding)

TBRPFもLS型のプロトコルであり、トポロジ情報の配布に逆方向パス転送 (Reverse Path Forwarding, RPF) のアイデアを用いている。TBRPFは隣接ノード探索モジュールとルーティングモジュールの2つから構成される。隣接ノード探索モジュールでは、変更があった隣接ノード情報のみを報告する差分HELLOメッセージを周期的に送信する。このHELLOメッセージには複数の種類が用意されており、安定した双方向リンクを選び出す仕組みが備わっている。各ノードはすべての到達可能なノードへの最小ホップ経路を提供する、送信元木 (source tree) を計算する。隣接ノードへは、その送信元木全体ではなく、その一部のみを隣接通知することでオーバーヘッドを削減している。トポロジ情報は周期的だけでなくリンクに変更があった場合にも送信され、トポロジの変化にすばやく対応する。

オンデマンド型ルーティング

オンデマンド型は、実際にデータ送信が発生した際に経路を構築することで、経路形成のオーバーヘッドを軽減させる方式である。反面、経路探索のために、データ送信可能になるまでに少しの時間が必要となるが、経路のキャッシュを利用することでその欠点を補っている。

(a) DSR (Dynamic Source Routing)

DSRはその名前からも分かるようにソースルーティング (始点経路制御) がその基本方式となっている。ソースルーティングとは、データを送出するノードにお

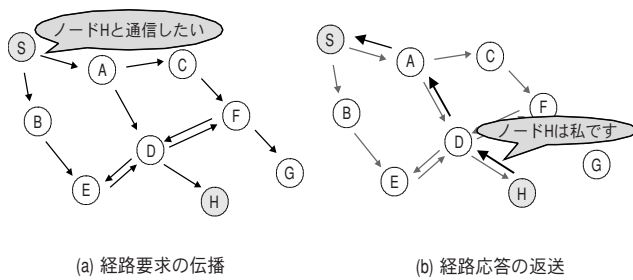


図-4 オンデマンド方式での経路探索

いて終点までの経路を決定し、中継ノードがその経路に従って順次終点までデータを転送する方式である。DSRは2つのフェーズ、経路探索と経路維持から構成される。宛先への経路が存在しない場合には、経路要求パケットをブロードキャストすることで経路探索を開始する。ルート要求パケットを受信したノードは、宛先へのルートをすでに知っているかを確認する。もし、知らないのであれば、自分のアドレスを経路要求パケットの経路レコードへ付け加え、パケットを転送する(図-4(a))。ただし、受信した経路要求パケットの経路レコードに、すでに自分のアドレスが存在する場合は、その経路要求パケットを破棄し、無駄な経路要求パケットを削減している。経路要求パケットが宛先ノード自身、もしくは、宛先への有効な経路を経路キャッシュ内に持つ中間ノードに到達した場合に、経路応答パケットを生成し、経路レコードの情報を設定して、送信元へ送り返す(図-4(b))。通信リンクに致命的な問題が発生した際に、経路エラーパケットが生成され送信元へと返される。

(b) AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing)

AODVは、DSRとは異なり、ホップバイホップ経路制御手法を用いており、各ノードにおいて直接通信可能な次の転送先の経路を決定する。新しい送信先への経路が必要になった場合に、送信元からルート要求メッセージ(RREQ)が送信され、RREQを受信したノードは、その送信者である隣接ノードのアドレスをルートテーブルに記録して、逆経路を形成し、宛先ノード自身もしくは宛先ノードへの経路を保持するノードが受信するまでメッセージを転送する。次にそれらのノードは、経路応答メッセージ(RREP)を送信元へと送信する。RREPはRREQによって作成された逆経路をさかのぼって送信され、その際にRREPを受信したノードが正方向の経路を作成する。リンクの切断を検知したノードは、送信元ノードへ経路エラーメッセージ(RERR)を送出し、それによって各ノードが経路の無効を知ることができる。

その他の方式

(a) ハイブリッド型

ハイブリッド型はオンデマンド方式とテーブル駆動方式を併用するもので、ZRPやDECENTRAがこれにあたる。ZRPではゾーンという概念を導入し、ゾーン内ではプロアクティブ方式にて経路形成を行い、ゾーン外のノードへはゾーンの境界にいる端末がオンデマンド方式で経路探索を行う。

(b) 階層型

ネットワークのサイズが増大した場合、制御パケットの増加等により、フラット型のルーティングでは、機能しなくなることが考えられる。そこで、クラスタリング等によってネットワークに階層を持たせることが検討されている。LANMARやCGSRなどがこれにあたる。

(c) 位置情報補助型

各ノードがGPS等の位置情報が検出可能な機器を有している場合に、その位置情報を利用して経路形成を効率よく行うものであり、LAR、GPSRなどがこれにあたる。

(d) 複数経路(マルチパス)型

複数の経路を選択可能にするマルチパス方式も検討されている。複数経路を構築することで、経路探索回数の削減や、パケットの到達率の向上が期待できる。

●まとめ●

前編ではまずアドホックネットワークの概要を説明した。アドホックネットワークにはマルチホップとアドホックという2つの性質があり、それぞれに経路制御や名前解決など固有の技術的課題があることを述べた。次に標準化動向として、IETFにおけるMANETの取り組みを紹介した。MANETは主に無線LANを用いたIPネットワークを対象として、経路制御の問題を解決しようと試みており、その方式にはテーブル駆動型やオンデマンド型などいくつかの分類があることを述べた。次号の後編では、アドホックネットワークの具体的な製品、研究事例を紹介する。

前編参考文献

- 1) Mobile Ad-hoc Network (MANET), http://protean.itd.nrl.navy.mil/manet/manet_home.html
- 2) Perkins, C. E.: AD HOC NETWORKING, Addison Wesley (2001).
- 3) Toh, C. K. 著: 構造計画研究所訳: アドホックモバイルワイヤレスネットワーク-プロトコルとシステム, 共立出版 (2003).
- 4) Xiaoyan, H., Kaixin, X. and Mario, G.: Scalable Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks, IEEE Network, pp.11-21 (July 2002).

(平成 15 年 7 月 29 日受付)