

# 修士論文

近隣通信状況に基づいたアドホックネットワーク用  
経路制御プロトコルの研究

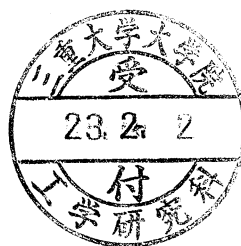
平成22年度修了

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 電気電子工学専攻

通信工学研究室

豊鷲見 和都



# 目次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 序論                           | 1  |
| 1.1 無線通信ネットワークの現状                  | 1  |
| 1.2 アドホックネットワーク                    | 2  |
| 1.3 本論文の目的                         | 5  |
| 1.4 本論文の構成                         | 6  |
| 第 2 章 アドホックネットワーク                  | 7  |
| 2.1 アドホックネットワークの歴史                 | 7  |
| 2.2 アドホックネットワークの基本動作               | 8  |
| 2.3 ルーティングプロトコル                    | 10 |
| 2.4 テーブル駆動型ルーティングプロトコル             | 13 |
| 2.5 リアクティブ型ルーティングプロトコル             | 14 |
| 2.6 ハイブリッド型ルーティングプロトコル             | 15 |
| 2.7 ホップ基準ルーティング                    | 15 |
| 2.8 電力基準ルーティング                     | 16 |
| 2.8.1 通信による消費電力を抑えるルーティング          | 17 |
| 2.8.2 負荷集中による電力消費を避けるルーティング        | 17 |
| 2.9 トラヒック基準ルーティング                  | 18 |
| 2.9.1 ネットワーク全体のトラヒック情報を収集するルーティング  | 18 |
| 2.9.2 ネットワークの一部のトラヒック情報を収集するルーティング | 19 |
| 第 3 章 AODV                         | 20 |

|              |                          |           |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 3.1          | はじめに                     | 20        |
| 3.2          | 概要                       | 20        |
| 3.3          | メッセージフォーマット              | 21        |
| 3.4          | AODV の処理                 | 25        |
| 3.4.1        | シーケンス番号の管理               | 25        |
| 3.4.2        | 経路構築処理                   | 26        |
| 3.4.3        | 経路維持                     | 30        |
| <b>第 4 章</b> | <b>近隣通信に基づく経路制御手法の提案</b> | <b>33</b> |
| 4.1          | 近隣通信が経路構築に与える影響          | 33        |
| 4.2          | 近隣通信状況に基づくルーティング手法       | 34        |
| 4.2.1        | 帯域占有率                    | 35        |
| 4.2.2        | 提案方式における経路探索手順           | 37        |
| 4.2.3        | データパケットの配送               | 40        |
| 4.3          | 動作例                      | 40        |
| 4.4          | 計算機シミュレーションによる特性評価       | 42        |
| 4.4.1        | 経路構築遅延時間                 | 43        |
| 4.4.2        | 総端末数に対するスループット特性         | 44        |
| 4.4.3        | 正規化リンク切断数                | 45        |
| 4.4.4        | 正規化 RREQ メッセージ数          | 46        |
| <b>第 5 章</b> | <b>結論</b>                | <b>48</b> |
| 5.1          | 本研究のまとめ                  | 48        |
|              | 参考文献                     | 50        |
|              | 謝辞                       | 54        |

## 目 次

|     |                              |    |
|-----|------------------------------|----|
| 2.1 | アドホックネットワークの例                | 9  |
| 2.2 | マルチホップ通信の例                   | 9  |
| 2.3 | 経路構築手段別のルーティングプロトコルの分類       | 11 |
| 2.4 | 経路選択基準別のルーティングプロトコルの分類       | 12 |
| 3.1 | RREQ メッセージフォーマット             | 22 |
| 3.2 | RREP メッセージフォーマット             | 23 |
| 3.3 | RERR メッセージフォーマット             | 24 |
| 3.4 | AODV における RREQ メッセージのフローチャート | 27 |
| 3.5 | AODV における RREP メッセージのフローチャート | 28 |
| 3.6 | AODV の経路構築例                  | 30 |
| 3.7 | AODV の RERR 送信例              | 32 |
| 4.1 | 近隣通信による経路構築への影響              | 34 |
| 4.2 | 端末 $C$ における信号受信例             | 35 |
| 4.3 | 端末 $C$ における受信信号のメッセージフロー     | 36 |
| 4.4 | 提案方式における RREQ メッセージのフローチャート  | 38 |
| 4.5 | 提案方式における負荷計算のフローチャート         | 39 |
| 4.6 | 提案方式の経路構築例                   | 41 |
| 4.7 | 経路構築時の制御メッセージフロー             | 42 |
| 4.8 | 経路構築遅延時間                     | 44 |
| 4.9 | パケット到着率                      | 45 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4.10 正規化リンク切断数 .....       | 46 |
| 4.11 正規化 RREQ メッセージ数 ..... | 47 |

## 表 目 次

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 4.1 シミュレーションパラメータ ..... | 43 |
| 4.2 帯域占有率に基づく転送遅延 ..... | 44 |

# 第1章

## 序論

### 1.1 無線通信ネットワークの現状

近年、情報通信技術の発展に伴い無線通信機器が身近なものとなり、現在、多数の無線通信サービスが提供されつつある [1-3]。無線通信サービスの代表格とも言える携帯電話は、国内での加入者が1億1千万人を超えて広く利用されている [4]。また、携帯型 PC や PDA などを利用した無線 LAN の利用も増加している。今後、無線通信サービスを利用した更なるサービスが期待される。

現在提供されている無線通信サービスの代表例として、携帯電話や無線 LAN などを用いたサービスが挙げられる。現在の国内の携帯電話サービスは、第3世代サービスが開始されて以降、メールの送受信や Web アクセスなど様々な用途で利用されてきている。一方、現在検討されている第4世代のサービスでは、50Mbps～1 Gbps 程度の超高速大容量通信が実現し、今後更なるサービスの向上が期待される。

無線 LAN サービスは、アクセスポイントと呼ばれる公衆無線 LAN が整備され、インフラに接続されているアクセスポイントの通信エリア内であれば無線通信によりインターネット接続が可能となる。そして現在、オフィスのみならずコーヒESHOPや街角でもネットワークに接続出来る環境が整いつつある。今後、公園などの防災拠点、図書館や自動販売機など、公共インフラとしての展開も期待されている。公衆無線 LAN の利用形態については、その場でネットワークを自由に利用出来る場合と提供業者の会員として利用する場合がある。前者はホテルや

公共施設などで用いられ、誰でも一時的なネットワークへ接続することを可能とする。一方、後者は喫茶店などで利用される場合が多い。しかし、アクセスポイントの設置場所はまだまだ限られており、どこでも利用できるまでには至っていない。その原因として、アクセスポイントの設置にはケーブルの敷設など多額の費用がかかることが挙げられる。

## 1.2 アドホックネットワーク

現在までに一般化している無線ネットワークは、ほとんどが無線基地局などのインフラストラクチャを必要とするものである。これに対し、インフラを必要としないアドホックネットワークという自律分散ネットワークが注目されている [5-7]。アドホックネットワークは、各々の所持している無線通信端末のみでネットワークを構築する。そのため、基盤設備が存在しない場所でも、無線通信端末のみでその場限りのネットワークを構築することを可能としている。また、インフラに依存しないため、比較的低コストでネットワークを構築できるという特徴がある。

アドホックネットワークは、戦場における軍用情報の交換手段の確保を目指して研究が始まり、近年では、民生通信への応用研究が活発に行われている。その応用例としては、災害時の利用や防災向け、車車間・路車間通信、センサネットワークなどがある。アドホックネットワークの自律的にネットワークを構築する技術を活用することにより、既存のインフラが破壊された災害現場での通信の確保が可能となる。また、道を走るクルマに対して渋滞情報、急ブレーキ情報、事故情報などを瞬時に伝えるなど高度交通システム ITS への技術利用も可能となる。更に、アドホックソフトを搭載したカメラを配置することで監視警備の一助として利用することや、センサーを農場などに配置することで気候データの採取を行うなどの応用も考えられる。

アドホックネットワークでは、一般的な無線通信に用いられている IEEE 802.11 [9] や Bluetooth として知られている IEEE 802.15.1 [10] などの技術を用いて通信を行う。しかし、無線通信端末が直接通信できる範囲には限りがあり、これだけではネットワークを構築することは不可能である。そこで、アドホックネットワークでは、直接通信を行うことができない場合でも近隣端末が中継処理を行うことで



ネットワークの構築を行う。ルータの機能を持つ端末を中継端末と言い、中継端末を経由して通信を行う形態をマルチホップ通信と呼ぶ。マルチホップ通信を行うことで、無線通信端末を中継しながら通信エリアを拡大することが可能となる。

アクセスポイントを用いる場合、端末の情報を基地局で集中管理することができる。一方、アドホックネットワークでは端末を管理する基地局を持たず、各無線通信端末が自律的に働く。そのため、データ送信者からデータ受信者までの通信経路は固定されず、臨機応変にマルチホップ経路を確立する機能が必要となる。そこで、技術的課題として、そのような環境でいかに効率よく安定した経路を構築できるかということが挙げられる。

アドホックネットワークでは安定した経路構築を行うために、様々なルーチングプロトコルが提案されている [11,12]。アドホックネットワークでは、通信を行う端末がどこに存在しているのかを把握することは困難である。そこで、アドホックネットワークのルーチングプロトコルは、送信先端末を探索するための手法として、テーブル駆動型、リアクティブ型、ハイブリッド型のルーチングプロトコルが考えられている。テーブル駆動型ルーチングプロトコルでは、データパケットの送信要求が起こる前に経路を構築しておく。リアクティブ型ルーチングプロトコルでは、端末がデータパケットの送信要求を出すとルーチングプロトコルが動作し、経路構築後に通信を開始する。また、ハイブリッド型のルーチングプロトコルは、リアクティブ型とテーブル駆動型のプロトコルを組み合わせたものである。アドホックネットワークでは、これらの経路制御手法を用いることで経路構築を可能としている。

一方、アドホックネットワークでは、複数の経路が存在する場合があります。複数の経路から最適な経路を選択するための経路選択基準が必要となる。そこで、経路選択基準として、ホップ数、消費電力、トラヒックを用いるルーチングプロトコルが考えられている。ホップ数を経路選択基準に採用したルーチングプロトコルでは、送信元端末から送信先端末までの経路ホップ数が最小となる経路の選択を行う [13-15,17]。ホップ基準ルーチングでは、最小ホップ数で経路を構築することから短期間で経路の構築が可能となる。また、他の経路選択基準と比べて経路選択に考慮する情報が少ないため、経路構築におけるトラヒックを抑えられる。しかし、経路上の端末の電池残量や経路上のトラヒック情報を考慮しないため、電源

の切断や近隣通信の影響によってネットワークの性能が低下してしまうことが考えられる。消費電力を経路構築基準に採用したルーチングプロトコルでは、無線端末の多くが電池駆動であるという点を考慮し、電池残量などの情報に基づいた経路構築を行う [20–25]。そのため、電力基準ルーチングではネットワークの長寿命化が可能となる。しかし、経路上のトラヒックを考慮していないことから、通信遅延の増加やスループットの低下を招くことが考えられる。一方、トラヒックを経路構築基準に採用するルーチングプロトコルでは、各端末のトラヒック情報を考慮することによる安定した経路の構築を行う [26–36]。アドホックネットワークでは複数の端末が同時に通信を行うということも想定される。そのような環境で各々の通信が他の通信を考慮しない経路を用いた場合、特定の端末や帯域への負荷の集中が起こり、ネットワーク性能が大きく劣化してしまいう可能性がある。トラヒックを経路選択基準とするルーチングプロトコルでは、ネットワーク内の負荷を分散させるため、無線資源を有効に利用することができる。そのため、他のルーチング手法に対して安定した経路構築を行う上で有効な性能改善手法になりうると考えられている [26]。

既存のトラヒック基準ルーチングでは、ネットワーク全体のトラヒック情報を収集することにより最適な経路を構築する手法 [27–31] や、端末の周辺部などネットワークの一部のトラヒック情報を収集することにより経路を構築する手法 [32–36] が提案されている。また、トラヒックの指標として、各端末を経由するトラヒック量を採用するものや、各端末を経由する経路数を採用するものなどがある。

ネットワーク全体のトラヒック情報を収集する手法として、DLAR(Dynamic Load-Aware Routing) [27]、LARA(Load Aware Routing in Ad hoc) [28]、LBAR(Load-Balanced Ad hoc Routing) [29] などがある。これらの手法では、経路上の端末やその近隣端末が通信に関与したパケット数や他の通信のルートとなっている数をトラヒックの指標に用いている。経路構築では、経路制御メッセージを用いてトラヒック情報を送信先端末に通知する。送信先端末では、受信した複数の経路情報から最も低トラヒックである経路を選択することで通信経路を確立する。無線通信では無線信号は端末を中心として円状に広がるため、端末は近隣通信の影響を干渉として受ける。しかし、トラヒックの指標として各端末を経由するパケット数、ルート数を用いた場合、各端末が近隣通信の影響をどれだけ受けているのかについては十分に考慮

ができない。一方, BNAR(Busy Node Avoidance Routing) [30], BNAR\_with\_NAV(Busy Node Avoidance Routing with NAV) [31] では, 経路上に流れるトラヒック量を経路選択の指標として用いている。経路構築では, 送信先端末でトラヒック情報を収集し, トラヒックの低い経路を選択する経路構築を行っている。そのため, 近隣通信のトラヒック量を考慮した経路構築が可能となっている。しかしながら, 経路のトラヒック情報を送信先端末に通知するために制御メッセージ量が増大する可能性がある。

一方, ネットワークの一部のトラヒック情報を用いる手法では, LAOR(Load-Aware On-demand Routing) [32] や, Workload を用いる手法 [33] などが提案されている。これらの手法では, トラヒックの指標にパケットを受信する際の遅延時間や端末のキューを占有するパケット数を用いる。経路構築では, 各端末が低負荷な端末のみを用いて制御メッセージのフラッディングを行うことで経路構築を行う。各端末で経路構築への積極性を変化させる手法はオーバーヘッドが少ないことが知られており, 現実的な運用状況では有効な一手法と考えられる [34–36]。しかし, これらの手法では, トラヒックの指標にパケット受信の際の遅延時間やパケット数を用いており, 近隣通信の影響をどれだけ受けているかについては考慮できていない。

既存のトラヒック基準ルーティングの研究から, ネットワーク内の総スループットを改善可能であることが知られている。一方, 近隣通信によるトラヒック量を考慮した経路構築を行う必要があることと, 各経路上のトラヒック情報を収集することによるオーバーヘッドの増大が問題点として挙げられる。しかし, これら二つの条件を満たすルーティング手法は提案されていない。

### 1.3 本論文の目的

本論文では, 互いの無線信号が到達しない経路を複数構築することにより, 空間的に無線資源の有効利用を可能とし, 安定した経路構築を行うことを目的とする。そこで, 端末が受信する近隣通信量に着目することにより, 自端末が利用可能な無線資源の推定を行い, 利用可能な無線資源に応じて端末の経路構築に関わる積極性を変化させるルーティングプロトコルの提案を行う。提案方式では, 高トラヒック領域に存在する端末の経路構築への積極性を引き下げ, 低トラヒック領

域に存在する端末の経路構築への積極性を引き上げる。結果として、提案方式では経路構築の際に新たな制御メッセージの収集を行うことなく、高トラヒック領域を迂回する経路を構築可能となる。提案方式は様々なルーティングプロトコルの拡張として実装可能であるが、本論文では、代表的なアドホックネットワーク用ルーティングプロトコルである AODV を拡張することにより評価を行う。また、提案方式では各端末が自律的に収集した帯域占有率に基づき自律的に経路構築に関わる積極性を更新できることから、オーバーヘッドが増加することなくトラヒック状況を考慮可能な経路構築を実現可能である。数値例より、提案方式を用いることにより、特に高トラヒック時のパケット到着率、平均遅延時間が改善可能であることを示す。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成としては、第2章でアドホックネットワークの基本的な動作原理、および既存のルーティングプロトコルについて述べ、第3章では提案方式の基盤プロトコルとして用いる AODV について述べる。第4章で、近隣通信に基づく経路制御手法の提案と計算機シミュレーションによる検討結果を述べる。第5章で結論を述べる。

## 第2章

# アドホックネットワーク

本章では、アドホックネットワーク及び、ルーチングプロトコルについて述べる。

### 2.1 アドホックネットワークの歴史

アドホックネットワークの開発の歴史は比較的古く、インターネットとほぼ同時期 (1970 年代 [37-39]) に軍事研究を基にして開始された。1960 年代の終わりから 1970 年代に、ハワイ大学の ALOHA プロジェクトにおいて、オアフ島にある大学本部の中央コンピュータとハワイ諸島に分散する大学施設の端末を結ぶ UHF 帯域を用いたパケット交換網の研究が進められ、1970 年代に運用を開始した。ALOHA プロジェクトは、無線のブロードキャストという特性を利用し、データパケットを送受信するシングルホップシステムの可能性を示した。そして、多くの端末が共通の無線通信路にアクセスするランダムアクセスの原理が確立された。1972 年に、DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency) はパケット無線網 PRNET(Packet Radio Network) の研究を開始した。当初、PRNET は中央制御局を前提とするプロトコルを用いていたが、その後、自律分散型のアーキテクチャへと変換した。ALOHA とは違い、PRNET は無線のブロードキャストを用い、無線の接続性が不十分な環境の中で十分な接続性を提供するためのマルチホップパケット交換経路制御技術を用いており、アドホックネットワークの起源となった。1980 年の初期に PRNET の実現性は実証されたが、当時のパケット無線装置は大きな電力を必要とした。また、1980 年代後半には、パケット無線網の商用利用やアマチュア無線によるパ

ケット交換網の実現も検討されたが、当時の無線装置は大きく実用化には至らなかった。しかし、1990年代後半の無線端末の小型化、高機能化や様々な無線通信技術の開発から、軍事利用に留まらず日常生活や社会サービスとしての研究に注目が集まるようになった。2000年代に入り、携帯電話、PDA、ノート型パソコンの爆発的に普及による既存のインターネット通信にはない無線通信へのニーズの高まりから、アドホックネットワークを利用したネットワークサービスやインターネット接続サービスの提供にも注目が集まっている。

## 2.2 アドホックネットワークの基本動作

アドホックネットワークとは、有線通信のインフラストラクチャや無線 LAN のようなアクセスポイントを必要としない、無線で接続できる端末のみによって構成されたネットワークのことである。アドホックネットワークでは直接端末間の無線リンク接続が可能な場合、端末間で直接通信を行う。図 2.1 では、直接通信の可能な端末間で無線リンクの接続を行う場合の一例を示す。図 2.1 に示すように、端末  $A$ ,  $D$  が端末  $B$ ,  $C$ ,  $E$  と通信を行う。しかし、端末が広範囲に分散している場合や、端末間に遮蔽物が存在することも考えられる。また、アドホックネットワークにおける無線デバイスの使用例として IEEE802.11 を用いた場合、通信可能距離は約 100m 程度となる。そのような場合、情報を受け取る任意の送信先端末は、直接通信することが可能であるとは限らない。そこで、アドホックネットワークでは近隣の端末を経由して情報を中継するマルチホップ通信を行う。マルチホップ通信を行うことで遠方の端末との通信を行うことが可能となる。図 2.2 に、マルチホップ通信を利用した通信の例として、送信元端末  $S$  が送信先端末  $D$  と通信を行う状況を示す。 $S$  は  $D$  と通信を行うために、近隣端末の  $A$ ,  $B$ ,  $C$  が中継端末となり情報を転送することで  $D$  への情報伝達を可能とする。このように、マルチホップ通信を行うことで、 $S$  は  $D$  と通信を行うことが可能となる。

しかし、マルチホップ通信を行うだけでは、情報を伝達したい端末がどこに存在するのかを把握することは困難である。また、送信元端末と送信先端末との間で最適な経路が確立されるとは限らない。

そこで、送信元端末が送信先端末と通信を行うための経路制御手法が必要とな

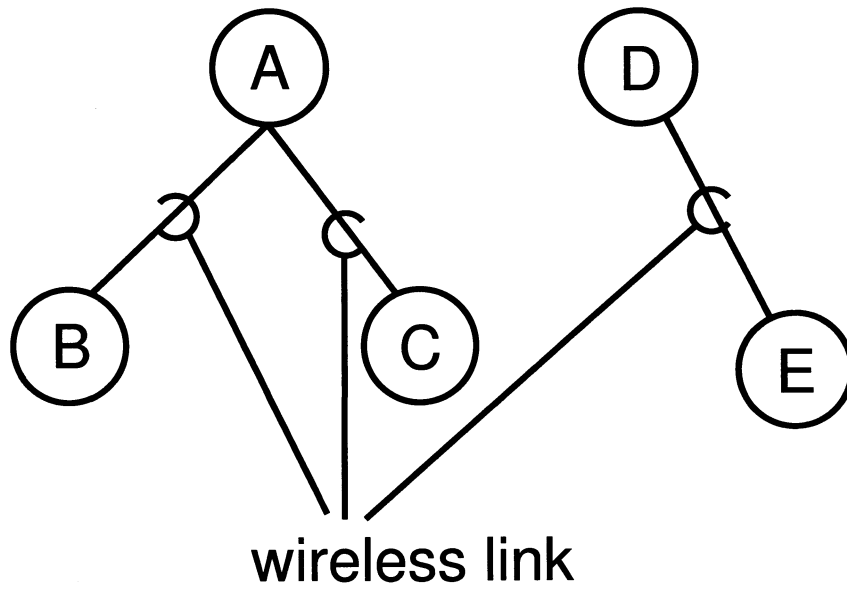


図 2.1 アドホックネットワークの例

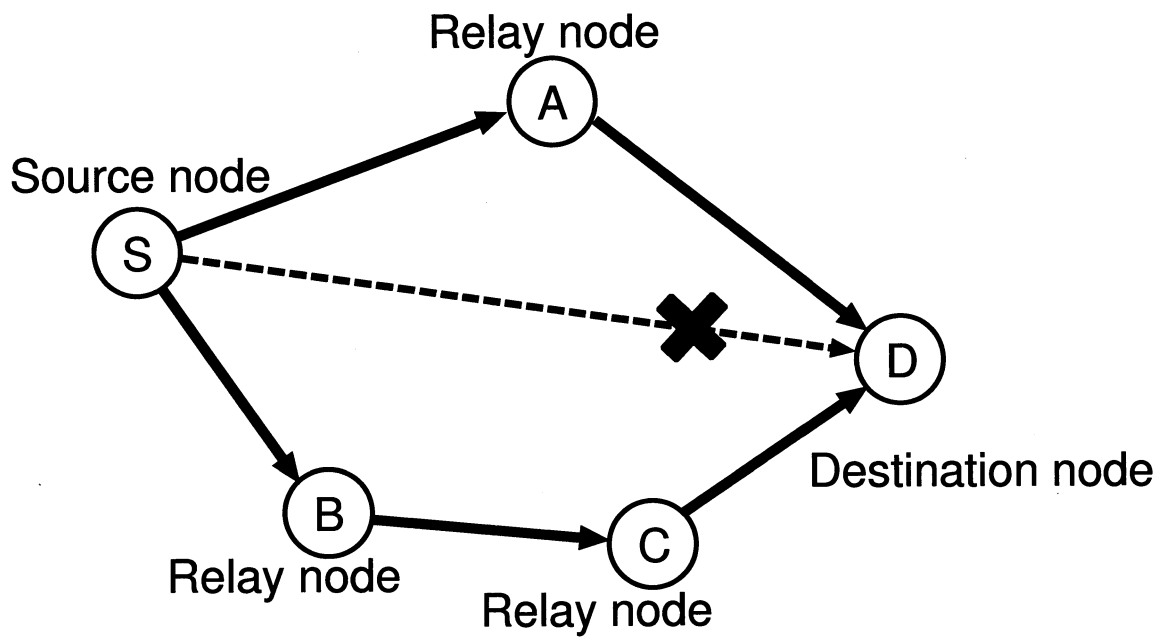


図 2.2 マルチホップ通信の例

る。経路制御は、通信相手への経路構築、ネットワーク環境の変化に対応するための経路維持、の二つの機能を用いる。経路構築を行う際に、送信先端末のアドレス情報のみを元に経路発見を行う経路制御プロトコルをリアクティブ型と呼ぶ。一方、予め定期的な制御メッセージをアドホックネットワーク内で交換することで経路制御テーブルを構築し、テーブル情報を元に経路制御を行うものをテーブル駆動型と呼ぶ。リアクティブ型の多くのプロトコルでは、経路探索のためにフラッディングという手法が用いられる。また、テーブル駆動型でもアドホックネットワークの開始時にはテーブル情報を持たないため、経路発見のためにフラッディングを用いるプロトコルがある。

フラッディングとは、送信元端末が隣接端末に向けてパケットをブロードキャストで送信することにより、多方面に連鎖的に転送してもらう方式のことである。フラッディングにより、パケットは一定の生存期間中に無差別に転送される。フラッディングは、有効範囲を制御することが可能である。これは、この方式は転送を繰り返すことになるため、ネットワークに与える影響が非常に大きいからである。そのため、フラッディングは必要最小限に行うことが望まれている。フラッディングの用途は、送信先端末の探索が主なものであるが、テーブル駆動型における周辺端末や、全端末への制御情報の配信などにも用いられる。

一方、アドホックネットワークでは、経路を発見し、構築した後も各端末の電源切断や通信状況の変化などによりネットワーク環境が変化することが考えられる。そのような変化に対応するのが経路維持の機能である。経路維持には、通信経路の接続性の断続を元に再度経路発見、または部分的な経路修正を行うプロトコルや、定期的に通信経路上の端末同士で Hello メッセージなどの制御情報を交換するプロトコルがある。経路維持にも経路制御プロトコルごとの様々な方式が提案されている。

### 2.3 ルーティングプロトコル

本節では、既存のルーティングプロトコルを基に、アドホックネットワークにおいてどのような経路構築が行われているのかを述べる。

アドホックネットワークを用いた通信では、送信元端末は送信先端末への通信



経路を迅速に構築する必要がある。アドホックネットワークにおける通信経路は、有線通信のように実際に端末同士が物理的に繋がるものではない。そこで、これまでに数多くのアドホックネットワーク用ルーチングプロトコルが提案されている。アドホックネットワークでは、送信先端末を探索するための手段が重要となる。これまでに提案されてきたルーチングプロトコルを図 2.3 に示す。経路構築手段について、テーブル駆動型 (Proactive)、リアクティブ型 (Reactive)、ハイブリッド型 (Hybrid) に分類することができる。一方、アドホックネットワークにおける経路構築では、複数の経路が存在する可能性がある。そこで、最適経路で通信を行うための経路選択基準も重要な課題となる。経路選択基準について、これまでに提案されてきたルーチングプロトコルを図 2.4 に示す。図 2.4 に示すように、ホップ数、消費電力、トラヒックに分類することができる。同じタイプのネットワーク用に設計されているにもかかわらず、これらのルーチングプロトコルにはかなりの違いがある。以下に、それぞれのプロトコルについて説明し、特徴を述べる。

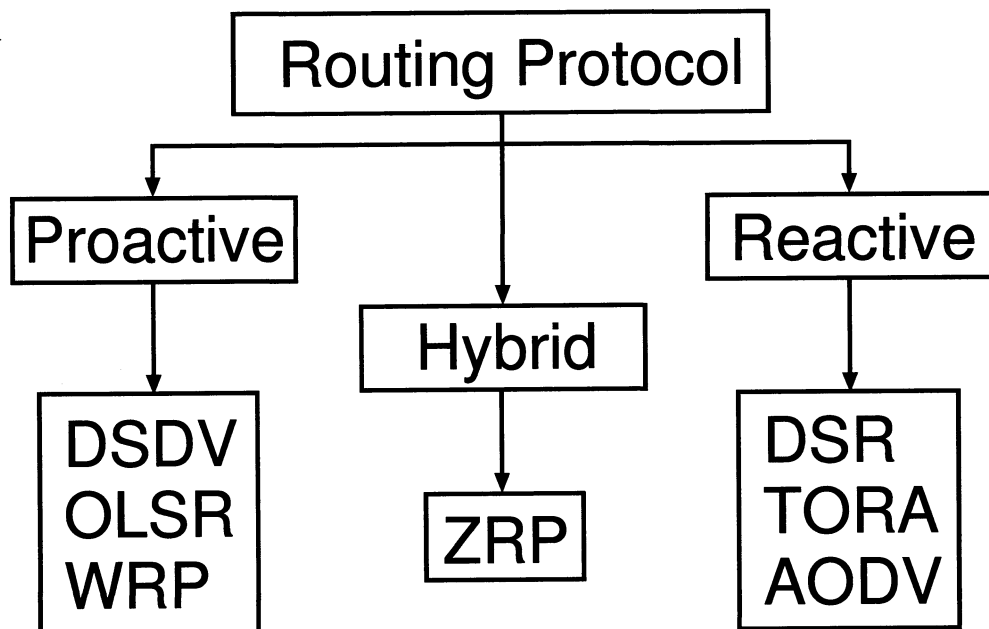


図 2.3 経路構築手段別のルーチングプロトコルの分類

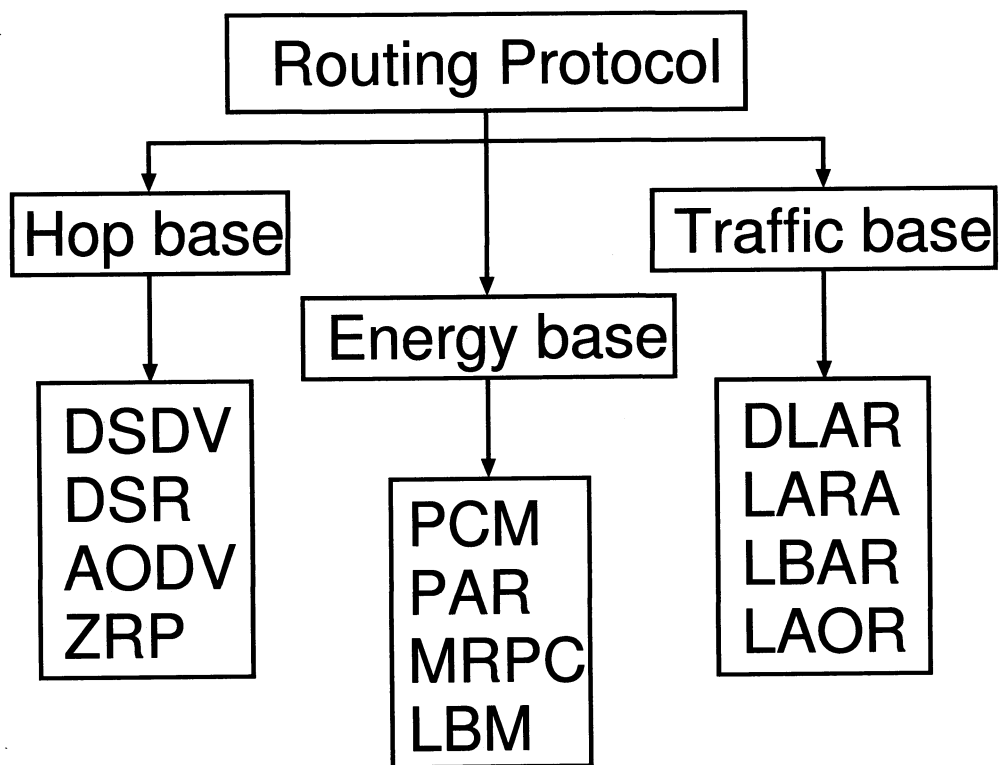


図 2.4 経路選択基準別のルーチングプロトコルの分類

## 2.4 テーブル駆動型ルーチングプロトコル

テーブル駆動型ルーチングプロトコルは、ネットワーク上の各々の端末から他の全ての端末への、矛盾のない最新の経路制御情報の維持を行うよう動作する。これらのプロトコルでは、各端末は経路制御情報を格納するためのテーブルを1つ以上持つ。そして、ネットワーク状況の変化に応じてネットワーク全体に経路の更新情報を転送する。常に最新の経路表を保持することにより、通信要求に対してすぐにデータパケットを送信することを可能としている。テーブル駆動型ルーチングプロトコルでは、ルーチングに要した必要テーブル数と、ネットワーク構造に変化があった場合の通知方法に各プロトコルの違いがある。

DSDV(Destination Sequenced Distance Vector) プロトコルは、古典的な Bellman-Ford ルーチングアルゴリズムを基にした、テーブル駆動型ルーチングプロトコルである [13]。DSDV では、各端末は経路制御情報がループしないよう、同一ネットワーク内の到達可能な全ての送信先端末とそのホップ数を記録した、経路制御情報を管理する。また、送信元端末が最新の経路情報を判断するために、シーケンス番号を使用する。DSDV は、2種類の経路情報更新用パケットを使用することで、経路の維持を行う。1つは、フルダンプパケットである。このパケットは、利用可能な全ての経路情報を格納しており、大きく経路情報が更新される場合に用いられる。2つ目は、フルダンプより小さな差分パケットである。このパケットは、最後に送信したフルダンプ以降の経路更新情報のみを送信する場合に用いる。新たな経路制御情報を送信する場合、送信先端末の情報を受信した時のシーケンス番号を記録する。最も新しいシーケンス番号を持つ経路が常に使用されるため、同じ経路更新情報がシーケンス番号を持つ場合、ホップ数の少ない経路を選択する。

OLSR(Optimized Link State Routing) プロトコルの特徴は、フラッディングを効率よく行うことが出来る点である [14]。フラッディングを行った際、メッセージを受信した全ての端末がそのメッセージの再送信を行うため、ネットワーク中に冗長なメッセージが多く流れてしまう。そこで、OLSR では MPR (Multi Point Relay) 集合の概念を導入している。ある端末がブロードキャストしたパケットをその端末の選択した MPR と呼ばれる端末のみが再ブロードキャストすることで、冗長な

メッセージを削減し、フラッディングの効率化を図ることが可能になる。経路維持を行う場合は、経路情報の生成はMPRのみが行うことでフラッディグされる経路情報を削減することが可能である。また、MPRとして選択した端末との間で経路情報を交換することで、経路制御パケットのオーバーヘッドを削減することが可能である。

## 2.5 リアクティブ型ルーチングプロトコル

リアクティブ型のルーチングプロトコルは、通信要求が発生した時にのみ経路を作成する。ある端末において送信先端末への経路が必要となった場合、ネットワーク内に経路要求メッセージをブロードキャストすることで経路構築を開始する。経路構築処理は、送信先端末への経路を構築すると終了する。経路構築後は、送信元端末と送信先端末間の経路が無効となるか経路が不必要となるまで、経路が維持される。また、経路要求後に経路構築を行うため、通信開始まで多少の遅延を伴う。一方、アドホックネットワークで想定する無線端末は、蓄電池などを用いた稼働が想定される。リアクティブ型ルーチングプロトコルは通信要求がない場合、プロトコルは完全に動作しないため、無駄な消費電力がかからない。

DSR(Dynamic Source Routing) プロトコルは、送信元端末が予め全体の経路を指定するソースルーチングという形式を採用している [15,16]。また、全てのデータパケットが送信元端末から送信先端末までの経路情報を保持し、経路制御を行っている。DSRでは、ソースルート情報を各中継端末がキャッシュすることで、経路発見時間の短縮や経路切断時の経路回復などに用い、効率化を図っている。DSRは、経路探索と経路保持の2つのメカニズムにより成り立つ。経路探索では、送信先端末への有効な経路が存在した場合、パケットの送信にその経路を使用する。一方、有効な経路が存在しない場合、経路探索を開始して経路要求パケットをブロードキャストする。経路保持では、パケットの送信に問題が発生した場合に経路エラーパケットが生成され、代替経路や経路探索を行う。

AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector) プロトコルは、DSDV アルゴリズムを基盤として構築されている [17]。DSDVでは完全な経路リストを維持管理するのに対し、AODVはリアクティブに経路を作成する。これにより、必要なブロード

キャスト数を最小化している。また、AODVは送信先端末までの各中継端末が送信先端末のアドレスに基づき、次の中継端末を決定する経路制御方式である。また、シーケンス番号を用いることで、経路のループ防止と最新の経路情報の保持を保証している。AODVは経路発見と経路保全を行うことで、アドホックネットワークを実現する。AODVは、ソースルーチングなどの機能がなく、実装が比較的容易であるため、経路制御プロトコルの実装としてAODVが最も多くなっている[18]。AODVについては、本論文の基となるプロトコルとして、次章で詳しく説明を行う。

## 2.6 ハイブリッド型ルーチングプロトコル

ハイブリッド型プロトコルは、テーブル駆動型とリアクティブ型のプロトコルを組み合わせたプロトコルである。送信元端末の近隣の端末に対してはProactive型で経路表を作成する。一方、遠方に存在する端末との通信を行う場合は、Reactive型のルーチングプロトコルを用いて経路を作成する。

ZRP(Zone Routing Protocol)プロトコルは、テーブル駆動型のルーチングプロトコルとリアクティブ型のルーチングを複合的に用いたハイブリッド型の経路制御プロトコルである[19]。ZRPでは、経路制御ゾーンを中心端末から1, 2ホップ程度の範囲内の端末で構成する。経路制御ゾーンは、データの送信要求の発生時に利用し、ゾーン内ではテーブル駆動型のルーチングを行う。よって、各端末はゾーン内の全ての経路情報を保持している。一方、送信先端末が送信元端末のゾーン外に存在する場合、リアクティブ型の経路制御手法を用いた経路構築プロセスを実行する。

## 2.7 ホップ基準ルーチング

ホップ基準ルーチングでは、送信元端末から送信先端末までの中継端末数が最小となるような経路を構築する。よって、短期間で経路の構築ができることが特徴として挙げられる。また、他の経路選択基準と比べて経路制御メッセージの情報を少なく抑えられることから、経路構築にかかるトラヒックを抑えられ、経路

制御も比較的容易であることが特徴として挙げられる。前節までに述べた代表的な経路制御プロトコルでは、ホップ基準を用いた経路選択を行っている。一方、アドホックネットワークで想定される端末は、蓄電池などを用いた稼働が想定される。また、複数の端末が同時に通信を行うことも考えられる。そのような環境でホップ基準ルーチングを適用した場合、トラヒックの集中による特定の端末への大きな電力負荷や他の通信との干渉を引き起こすことが予想される。これらの問題はネットワークの性能を低下させる要因となるため、ホップ数を経路選択基準とした手法は、アドホックネットワークでの経路制御手法として必ずしも最適ではないと言える。

## 2.8 電力基準ルーチング

電力基準ルーチングでは、経路選択基準に端末の電力情報を用いる。アドホックネットワークを構成する端末は、移動性や小型化といった要因のため蓄電池などを用いた稼働が想定される。そのため、端末の電力を考慮した経路構築はネットワークの長寿命化を可能とする手法となりアドホックネットワークにおける重要な経路制御の一手法となる。電力基準ルーチングでは、経路構築における電力を削減することで、端末の電力消費を抑えるルーチング手法が提案されている [20–22]。また、負荷の集中による特定の端末での電力低下に着目し、電力消費の公平性を考慮した経路構築を行うルーチング手法も提案されている [23–25]。端末の電力消費を抑える手法では、通信時の電力制御を行うことにより経路構築を行う際に必要となる電力や、データを送信する際の電力の削減を行い、ネットワークの長寿命化を行っている。しかし、元々電池残量の少ない端末を用いた経路を構築した場合は、経路が切断する可能性がある。負荷集中による電力低下に着目した手法では、各端末や経路全体での電力情報から最も電池残量の少ない経路を選択することで、特定の端末の電池残量の著しい低下を防いでいる。この手法では、長時間同じネットワークで通信が行われた場合に電池切れとなる端末が減るため、ネットワークの性能が落ちにくくなる。

### 2.8.1 通信による消費電力を抑えるルーチング

PCM(Power control MAC) プロトコルでは、周期的に DATA の電力レベルを最大電力レベルまで上げる制御を行う。Extended IFS(EIFS) 期間を終了した端末が DATA/ACK の通信中に干渉しないため、電力効率が向上する [20]。

PAR(Power Aware Routing) プロトコルは、端末の稼働時間を長引かせられるよう、電池残量を効率的に使用することを目的としている [21]。通信経路上の各端末で消費される電力に関する情報を予め交換しておき、この情報に基づいて各端末の消費電力の合計が最小となる経路を選択する。

MTPR(Minimum Total Transmission Power Routing) プロトコルは、1 パケットあたりの送信先端末までの送信電力の総量を最小にすることを目的としている [22]。MTPR では、隣接端末間で通信にかかる電力を数値化し、複数ある経路ごとの通信電力の総量を求める。そして、通信電力の最も小さい経路を選択する手法をとる。これにより、通信時の消費電力を最小限に抑えることができる。

### 2.8.2 負荷集中による電力消費を避けるルーチング

MRPC(Maximum Residual Packet Capacity) プロトコルは、複数の経路が重なることなどにより電力残量が少なくなった端末に対し、迂回経路を選択することによって、電力の公平性を実現する [24]。MRPC では、各端末においてリンクのエラー率、伝送電力、電力残量から送信可能なパケット数を算出し、経路選択の指標として用いている。

LBM(Load Balanced Routing Mechanism) プロトコルでは、電池残量の少なくなった端末を含まない経路を選択することによる、経路の長寿命化を目的としている [25]。LBM では、経路上の端末での最小電力量、端末に並ぶパケットの平均値とホップ数を指標とした経路選択を行う。

AODV+G(AODV+Gossip) プロトコルは、中継を依頼された端末がある確率でこれを拒否し、消費電力を抑える手法となっている [22]。経路探索の際に、制御メッセージを受信した受信端末は確率  $p$  でパケットを破棄する。そのため、AODV+G ではシステム全体の電力消費を低減できるが接続成功確率が下がる、という特徴を持つ。

## 2.9 トラヒック基準ルーチング

トラヒック基準ルーチングでは、各端末のトラヒック情報を用いた経路構築を行うことにより、特定の経路にトラヒックが集中することを防ぐ負荷分散を目的としている。トラヒックを経路選択基準に採用するルーチング手法として、ネットワーク全体のトラヒックを収集することで最適な経路構築を行う手法が提案されている [27-31]。また、端末の周辺部などネットワークの一部のトラヒック情報を収集する手法も提案されている [32, 33]。ネットワーク全体のトラヒックを収集する手法では、送信先端末で複数の経路のトラヒック情報を収集し、最適な経路の選択を行う。そのため、経路全体のトラヒックを把握することが可能となる。しかし、複数の経路情報を制御メッセージにより伝達する必要があるため、トラヒック情報を収集するためのトラヒック量が増大する可能性がある。ネットワークの一部のトラヒック情報を収集する手法では、一部のトラヒック情報を用いることで経路構築を行うが、経路全体のトラヒックを判断することは難しくなる。しかし、各端末がトラヒックを判断するため、経路情報を伝達するためのトラヒックが不必要となる。

### 2.9.1 ネットワーク全体のトラヒック情報を収集するルーチング

DLAR(Dynamic Load-Aware Routing) プロトコルでは、経路構築の際に各端末が通信に参与したパケット数を収集する [27]。この情報を制御メッセージを用いて送信先端末に通知することにより、トラヒックを考慮する経路選択を実現している。送信先端末では、複数の経路候補から最も負荷の少ない経路に対して経路応答メッセージを送信することで経路を構築する。

LARA(Load Aware Routing in Ad hoc) プロトコルでは、各経路ごとの中継端末の送信待ちパケットが保持しているキューの長さの総和を求める [28]。負荷の指標にこの値を用い、負荷の最も少ない経路を選択することで負荷分散を行う。負荷の算出には、各端末と近隣端末のキューの長さを一定間隔ごとにサンプリングした値を用いる。

LBAR(Load-Balanced Ad hoc Routing) プロトコルでは、自端末と隣接端末が属している経路の数を負荷の指標とした経路構築を行っている [29]。経路探索時に、各



端末が制御メッセージを中継するごとに負荷の指標を加えていくことで、送信先端末に到達したパケットから各経路の負荷を把握している。送信先端末では、複数の経路から最も負荷の低い経路を選択する。

BNAR(Busy Node Avoidance Routing) プロトコル, BNAR\_with\_NAV(Busy Node Avoidance Routing with NAV) プロトコルでは、経路上に流れるトラフィック量を負荷の指標として用い、送信先端末で負荷の低い経路を選択する経路構築を行っている [30,31]。そのため、BNAR, BNAR\_with\_NAV では、近隣通信のトラフィック量を考慮した経路構築が可能となっている。

### 2.9.2 ネットワークの一部のトラフィック情報を収集するルーチング

LAOR(Load-Aware On-demand Routing) プロトコルでは、パケットを受信する際の遅延時間を負荷の指標としている [32]。経路構築では、高負荷な端末ではパケットの転送を行わず、低負荷な端末のみを用いて制御メッセージのフラッディングを行う。LAOR は、AODV をベースとしており、経路は最初に送信先端末に到達した経路で構築される。

Workload を用いる手法では、キューを占有するパケット数により閾値を設け、閾値を超える端末を高負荷端末としている [33]。高負荷端末ではパケットの転送を行わず、低負荷な端末のみを用いた経路探索を行う。LAOR, Workload ではトラフィック情報を制御メッセージで伝達しないことによって、オーバーヘッドの抑制を可能としている。また、負荷の判断を各端末が行うことで AODV や、DSR などのプロトコルへの適応が行いやすくなっている。

## 第3章

# AODV

本章では、オンデマンド型の代表的なプロトコルの一つである、AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector) について説明する。

### 3.1 はじめに

AODV は、経路構築要求に対して動的に経路構築を開始し、アドホックネットワークの経路構築や経路維持に参加する端末間でマルチホップルーチングを可能とする。AODV は、経路発見と経路保全の二つの機能を持つ。AODV では、通信が行われていない送信先端末への経路情報を保持せず、新しい通信要求に対して迅速に送信先端末への経路構築を行う。また、リンクの切断や変更に対して適切に対応する機能を持つ。リンクが切断された場合は、切断されたリンクを使用している経路を無効化するため、影響する端末への通知を行う。AODV の特徴として、シーケンス番号を利用している点が挙げられる。AODV では、シーケンス番号を利用することでループの回避を行っている。

### 3.2 概要

AODV では、経路要求 (RREQ : Route Request) メッセージ、経路応答 (RREP : Route Reply) メッセージ、経路無効 (RERR : Route Error) メッセージが使用される。

AODV では、送信先端末への経路が必要となった時、送信元端末は RREQ メッ

セージをネットワーク全体にブロードキャストし、送信先端末への経路を探索する。送信先端末か送信先端末への経路情報を持つ端末がRREQメッセージを受信した場合、経路が決定する。RREQメッセージを受信した端末が送信先端末でなかった場合、メッセージを受信した端末は中継端末として、送信先端末のアドレスに基づき次ホップを決定する。また、各端末はシーケンス番号を管理し、経路に変化があるとシーケンス番号を1増加させる。AODVでは、送信先端末のシーケンス番号が大きい経路を選択することにより、経路上のループの発生を防止している。複数の経路が存在する場合は、送信先端末のシーケンス番号が大きい方の経路を選ぶことにより最新の経路の選択が可能となる。AODVでは、RREPメッセージをRREQメッセージが経由してきた経路を用いることで経路が利用可能となる。RREQメッセージを受信した端末は、送信元端末への逆経路を保持する。そのため、中継端末などは保持している経路情報を用いてユニキャストで送信元端末の返信を行える。

有効な経路上にある端末は、次ホップへのリンク状態を監視する。リンク切断は、RERRメッセージによって他の端末へ通知される。

AODVでは、各端末が経路表を保持する。経路表には、以下の項目が含まれる。

- 送信先アドレス
- 送信先シーケンス番号
- 次ホップ IP アドレス
- ホップ数
- TTL(Time To Live)

各経路表はTTLを持ち、経路が利用される度に更新され、TTLを超えるとその経路は無効となる。また、各端末は送信先端末ごとに、送信先端末への次ホップとする隣接上流端末(プリコーサ)のリストを持つ。プリコーサリストは、経路修復の際に利用される。

### 3.3 メッセージフォーマット

本節では、図3.1図3.2、図3.3にRREQ, RREP, RERRメッセージのフォーマットの図を示し、説明をする。

|                             |   |   |   |   |   |          |           |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|----------|-----------|
| type                        | J | R | G | D | U | reserved | hop count |
| RREQ ID                     |   |   |   |   |   |          |           |
| destination IP address      |   |   |   |   |   |          |           |
| destination sequence number |   |   |   |   |   |          |           |
| source IP address           |   |   |   |   |   |          |           |
| source sequence number      |   |   |   |   |   |          |           |

図 3.1 RREQ メッセージフォーマット

- type  
メッセージを識別するためのフィールド。1が入ることによって RREQ メッセージであると識別される。
- J (Join Flag)  
マルチキャスト通信用に予約されたフィールド。本論文では使用しない。
- R (Repair Flag)  
マルチキャスト通信用に予約されたフィールド。本論文では使用しない。
- G (Gratuitous RREP Flag)  
不必要な RREP メッセージを送信するかどうか判断するために使用する。
- D (Destination Only Flag)  
送信先端末のみが RREP メッセージを生成できるようにするために使用する。
- U (Unknown Sequence Number)  
送信先シーケンス番号が不明な場合に使用する。
- reserved  
送信予約をする際に、0 を格納する。受信時は無視される。
- hop count  
送信元端末から送信先端末までのホップ数を格納する。
- RREQ ID  
最後に送信した RREQ メッセージの RREQ ID に 1 を加えた値を格納する。

- destination IP address  
送信先端末の IP アドレスを格納する。
- destination sequence number  
送信元端末が最後に受信した送信先端末へのシーケンス番号を格納する。
- source IP address  
送信元端末の IP アドレスを格納する。
- source sequence number  
送信元端末への経路において利用される現在のシーケンス番号を格納する。

| type                        | R | A | reserved | prefix | hop count |
|-----------------------------|---|---|----------|--------|-----------|
| destination IP address      |   |   |          |        |           |
| destination sequence number |   |   |          |        |           |
| source IP address           |   |   |          |        |           |
| TTL (time to live)          |   |   |          |        |           |

図 3.2 RREP メッセージフォーマット

- type  
メッセージを識別するためのフィールド。2 が入ることによって RREP メッセージであると識別される。
- R (Repair Flag)  
マルチキャスト通信用に予約されたフィールド。
- A (Acknowledgement Required)  
ACK を必要とする場合に使用する。
- reserved  
送信予約をする際に、0 を格納する。受信時は無視される。
- prefix  
アドホックネットワークをいくつかのサブネットワークを分割して行う際に使用する。本論文では、使用しない。

- hop count  
送信元端末から送信先端末までのホップ数を格納する。
- destination IP address  
送信先端末の IP アドレスを格納する。
- destination sequence number  
送信元端末が最後に受信した送信先端末へのシーケンス番号を格納する。
- source IP address  
送信元端末の IP アドレスを格納する。
- TTL (Time to Live)  
RREP メッセージを受信した端末が、その経路が有効であると判断する時間を格納する。

| type                                    | N | reserved | dest count |
|---|---|----------|------------|
| unreachable destination IP address      |   |          |            |
| unreachable destination sequence number |   |          |            |
| unreachable destination IP address      |   |          |            |
| unreachable destination sequence number |   |          |            |
| ...                                     |   |          |            |

図 3.3 RERR メッセージフォーマット

- type  
メッセージを識別するためのフィールド。3 が入ることによって RERR メッセージであると識別される。
- N (No Delete Flag)  
ローカル経路修復を行う時に使用される。上流端末は経路の削除をすべきでないという情報を知らせる。
- reserved  
送信予約をする際に、0 を格納する。受信時は無視される。

- dest count  
メッセージ内に含まれる非到達送信先端末数を格納する。1以上の値が入る。
- unreachable destination IP address  
リンク切断のために、到達不可の送信先 IP アドレスを格納する。
- unreachable destination sequence number  
リンク切断のために、到達不可の送信先シーケンス番号を格納する。

### 3.4 AODV の処理

本節では、送信元端末への経路を構築するための処理について述べる。

#### 3.4.1 シーケンス番号の管理

経路上にある全ての端末は、常に送信先アドレスに対して最新のシーケンス番号を維持する必要がある。このシーケンス番号を送信先シーケンス番号と呼ぶ。送信先シーケンス番号は、端末が受信した経路制御メッセージから新しい情報を取得した場合に更新する。AODVでは、各端末が送信先シーケンス番号の管理を行う。送信先シーケンス番号は、2つの条件で自身の番号をインクリメントする。

- 端末が経路探索を行う前に、自身のシーケンス番号をインクリメントする。これにより、RREQ 生成端末への逆経路との一致を防ぐ。
- 送信先端末が RREP メッセージを送信する直前に、自身のシーケンス番号と RREQ メッセージ内の送信先シーケンス番号の最大値へシーケンス番号をインクリメントする。

送信先端末に関するシーケンス番号が最新であることを確認するため、端末は現在のシーケンス番号の数値を、受信したメッセージのシーケンス番号と比較する。受信したメッセージのシーケンス番号から現在のシーケンス番号を引いた値が0未満である場合、受信したシーケンス番号は古い情報であるため、メッセージの送信先端末に関する情報は破棄される。

送信先シーケンス番号は、送信先端末への次ホップに対するリンクが切断されるか、寿命となる場合にも変更される。この場合、端末は自身の経路表を参照することで次ホップを送信先端末とする。そして、次ホップを使用する送信先端末について、シーケンス番号をインクリメントし、経路を無効状態として記録する。

以下の場合に、端末は送信先端末へのシーケンス番号を更新する。

- 自身が送信先端末で、新しい経路を提供する場合。
- 送信先端末へのシーケンス番号に関する新しい情報を保持するメッセージを受信した場合。
- 送信先端末への経路が切断されるか、寿命となる場合。

### 3.4.2 経路構築処理

AODV プロトコルの経路構築処理について述べる。

#### 経路探索

図 3.4 に、RREQ メッセージのフローチャートを示す。また、図 3.5 に、RREP メッセージのフローチャートを示す。

送信元端末が通信要求を発生した場合、まず自身の経路表を参照する。送信先端末への経路を保持していた場合、次ホップへデータパケットを送信する。経路を保持していない場合、データパケットは送信待ちバッファに格納され、経路構築プロセスを開始する。送信元端末は RREQ メッセージを生成し、ネットワーク内の端末へメッセージをブロードキャストする。

RREQ メッセージを受信した中継端末はシーケンス番号を確認し、最新の経路であれば RREQ メッセージの再ブロードキャストを行う。RREQ メッセージのブロードキャストは、ネットワークへの過剰なパケットの拡散を招く。そこで、AODV では TTL を利用することで RREQ メッセージの拡散制御を行う。TTL はメッセージが 1 ホップ転送されるごとに一つずつ減少し、0 になるとメッセージは破棄される。最初の探索で TTL は初期値に設定される。一定時間以内に RREP メッセージ



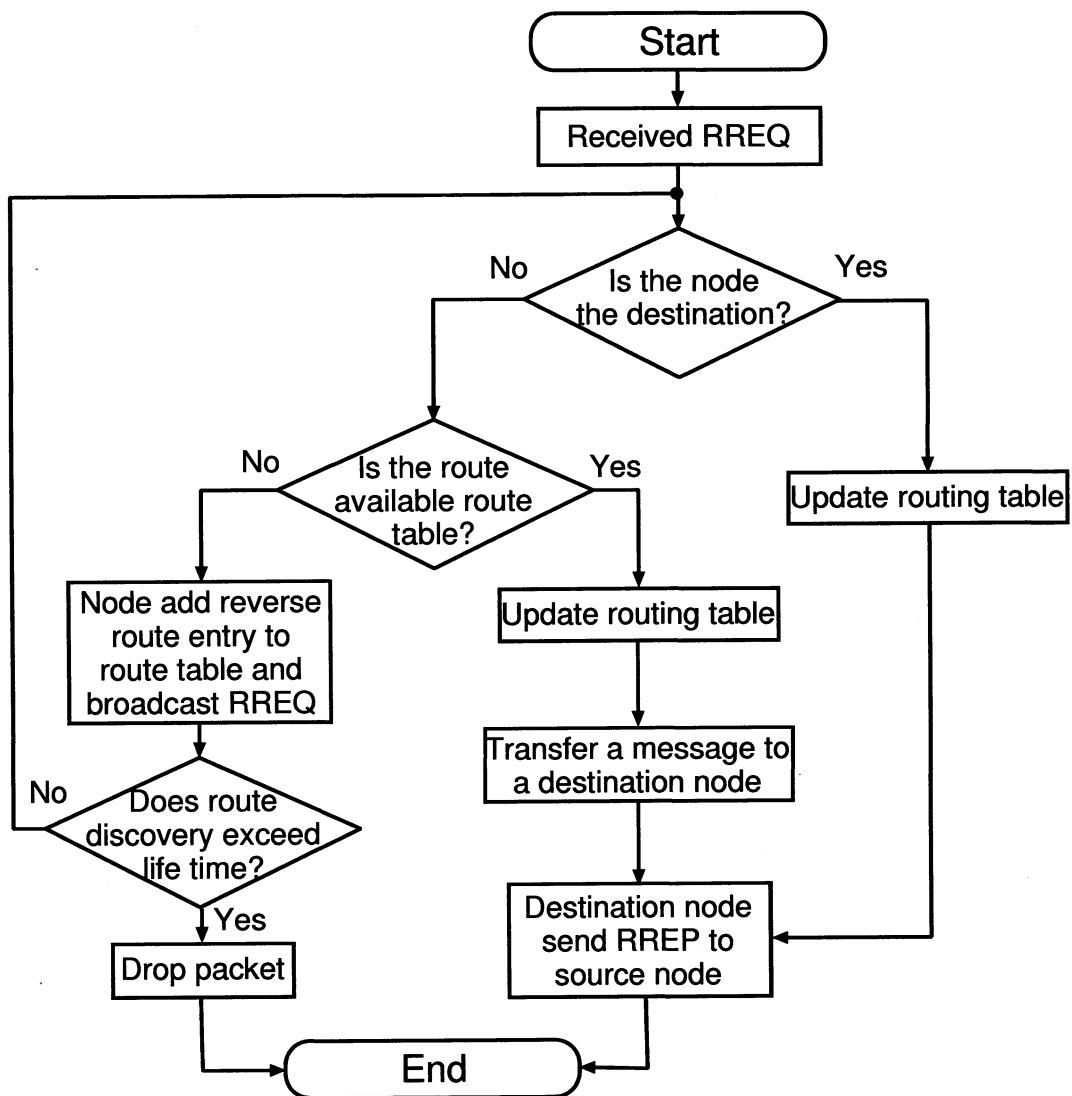


図 3.4 AODV における RREQ メッセージのフローチャート

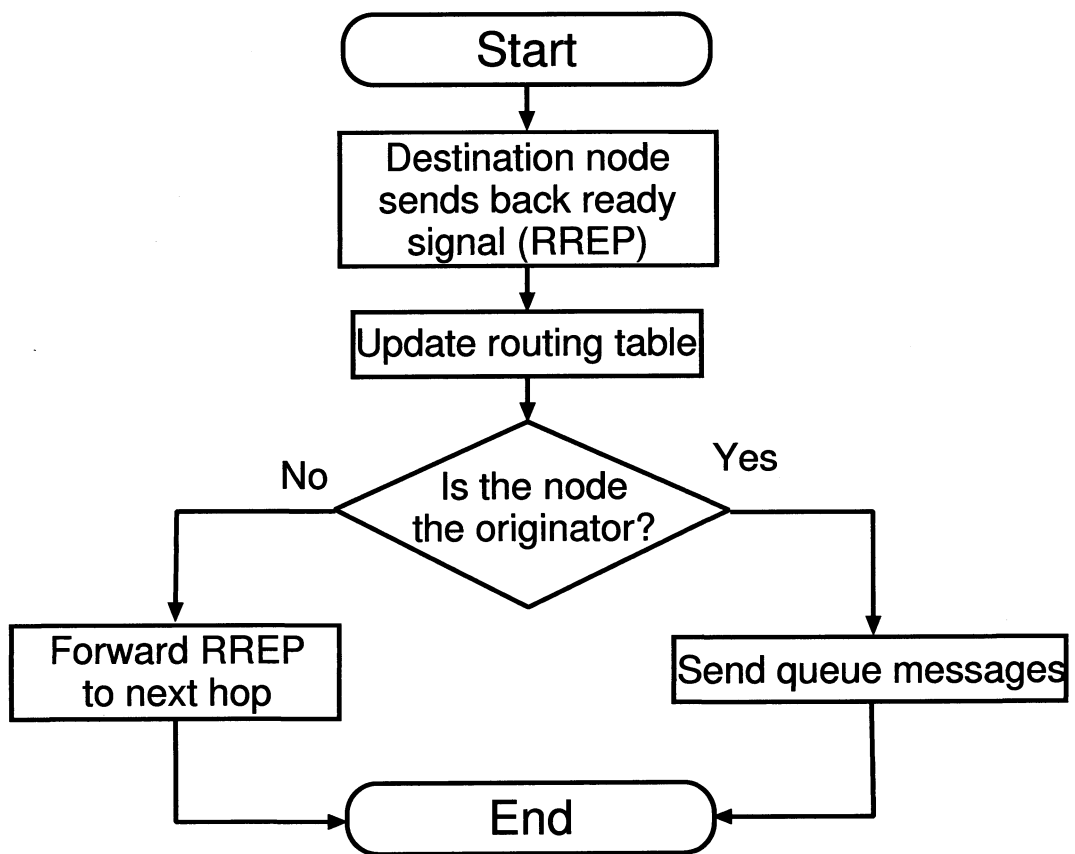


図 3.5 AODV における RREP メッセージのフローチャート

が得られない場合、TTL を一定値増加させて RREQ メッセージの再転送を行う。しかし、TTL がある値以上になっても RREP メッセージが得られない場合、ネットワーク全体を探索できるよう TTL を設定する。

#### 経路確定

RREP メッセージは、送信先端末が RREQ メッセージを受信した場合、送信先端末への有効な経路を持つ端末が RREQ メッセージを受信した場合に生成される。

- 送信先端末が RREP メッセージを生成する場合

RREP メッセージのシーケンス番号に 1 を加えた値と、送信先端末のシーケンス番号を比較し、大きい方の値を RREQ メッセージのシーケンス番号とする。

- 送信先端末への経路を持つ端末が RREP メッセージを生成する場合

端末が保持する順経路エントリに基づき、送信先シーケンス番号、ホップ数が設定される。そして、端末が保持する送信先端末への順経路と送信元端末への逆経路のエントリを更新する。

RREP メッセージは送信先端末と送信元端末へメッセージを転送するために必要な情報が付加され、送信を行う。そして、受信した RREQ メッセージが経由してきた経路を用いて送信元端末へユニキャストで送信される。一方、送信元端末で複数の RREP メッセージを受信した場合は最初に受信したメッセージを採用する。しかし、先に受信した RREP メッセージのホップ数より少ないホップ数の場合や、送信先シーケンス番号が大きい場合は経路を更新することが可能である。これらの処理により、送信元端末は経路を確立する。経路を確立すると、送信元端末はデータパケットの送信を開始する。

#### 経路構築例

図 3.6 に AODV での経路構築の動作例を示す。図 3.6 では、端末  $S_1$  から  $D_1$  への通信を行うための経路構築を行う状況を示す。端末  $S_1$  は RREQ メッセージを

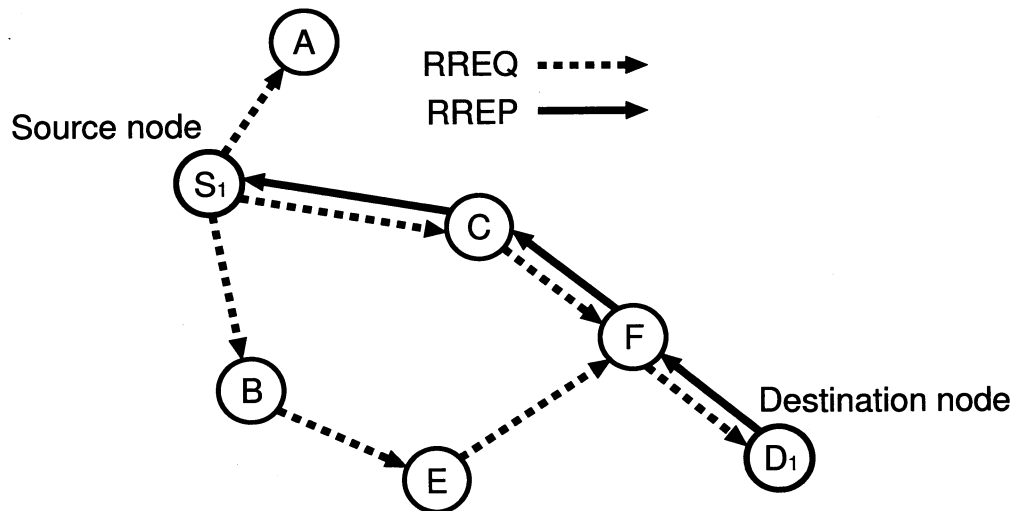


図 3.6 AODV の経路構築例

生成し、ネットワーク全体にブロードキャストする。RREQ メッセージを受信した端末 A, B, C は、 $D_1$  への経路を保持していないため、再度 RREQ メッセージのブロードキャストを行う。次に、RREQ メッセージを受信した端末 E, F は送信先端末の探索のために再度ブロードキャストを行う。結果、C, F を経由した RREQ メッセージが最初に  $D_1$  に到達する。AODV では、最初に送信先端末に到達した経路に返信を行うため、RREP メッセージは RREQ メッセージの逆経路である F, C を経由して  $S_1$  へ転送される。 $S_1$  が RREP メッセージを受信すると、経路構築が完了し、データの送信が開始される。

### 3.4.3 経路維持

アドホックネットワークでは、無線環境は常に変化する。そのため、経路構築後も近隣通信の影響などにより構築した経路が有効でなくなる場合がある。リンク切断が起こった場合その影響がネットワーク全体に影響を与えるため、送信元端末へその情報を知らせ、経路を再構築する処理が必要となる。本項では、リンク切断が起こった場合の AODV プロトコルの経路維持について述べる。

### 経路再構築

パケット送信の失敗は、MAC(Media Access Control)層からの通知に基づいて検出する。IEEE802.11ではパケット送信後、RTS(Request To Send)送信後にCTS(Clear To Send)が受信されない場合や、確認応答メッセージ(ACK)が受信されない場合にパケット送信が失敗したことを検出する。そして、一定回数以上の再送を行ってもパケットを送信できない場合にリンク切断と判断する。

リンク切断を検出した端末は、そのリンクを使用していた経路のエントリを無効化し、RERRメッセージを生成する。RERRメッセージは、無効化された経路の送信先端末のIPアドレスのリストを入れ、プロコーサリストへ送信する。この時、送信先シーケンス番号を一つインクリメントし、RERRメッセージに格納する。プリコーサリストが一つの場合は、ユニキャストで送信する。プリコーサリストが複数存在する場合は、ユニキャストでの送信を繰り返すか、TTLを1としてブロードキャストで送信する。RERRメッセージを受信した端末は、RERRメッセージの不達送信先端末のリストを参照する。そして、経路表の中にリストに含まれる送信先端末への経路があり、その経路の次ホップがRERRメッセージを送信して来た隣接端末である場合は、その経路を無効化する。経路表を更新した端末は、新たな経路表に基づくRERRメッセージを生成し、プリコーサリストへ送信する。RERRメッセージの転送を繰り返すことで、送信元端末にリンク切断が通知される。送信元端末では経路を無効化し、通信を継続する必要がある場合は経路構築を再度開始する。

図3.7に、リンク切断によりRERRメッセージが送信された例を示す。図3.7では、端末 $F$ 、 $D_1$ 間でリンク切断が起こり、端末 $D_1$ に対する上流端末に対してRERRメッセージを送信している。端末 $C$ がRERRメッセージを端末 $S_1$ に通知することで、経路が無効化される。

### ローカル経路修復

中継端末がパケットの送信中にリンク切断を検出した時、送信先端末までのホップ数が一定値以下の場合に、送信元端末からの経路を保持したまま、送信先端末への代替経路を構築することが可能である。これをローカル経路修復という。ロー

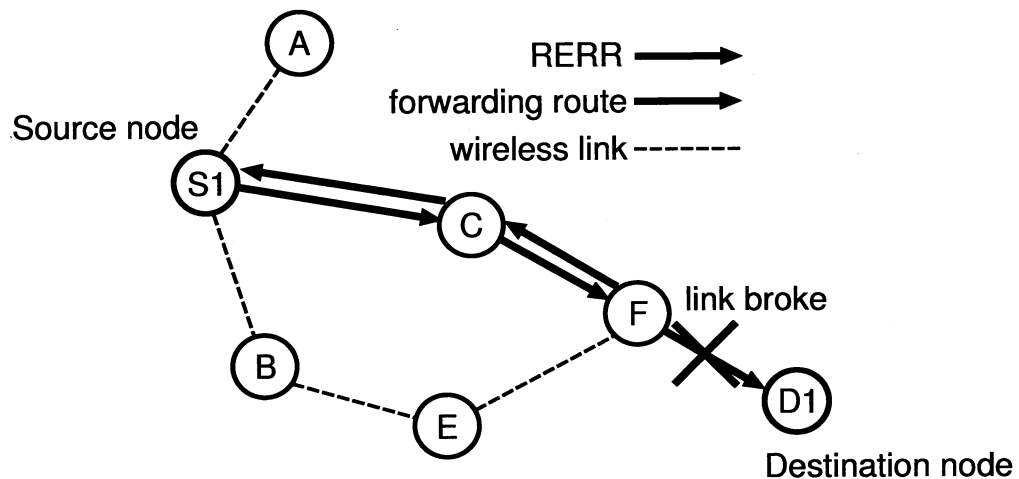


図 3.7 AODV の RERR 送信例

カル経路修復では、リンク切断を受信した端末が送信先シーケンス番号を一つ増加して RREQ メッセージをブロードキャストする。一定時間以内に RREP メッセージが得られなかった場合は、通常のリンク切断と同様に RERR メッセージを送信する。RREP メッセージが得られた場合、新たな経路と以前の経路の送信先端末へのホップ数を比較する。新たな経路のホップ数は以前の経路のホップ数を上回る場合、N フラグを立てた RERR メッセージを送信元端末へ通知する。N フラグを立てた RERR メッセージを受信した端末では経路の無効化はされない。その後、RREP メッセージの送信を行い、送信元端末の経路情報の更新を行う。RREP メッセージが送信元端末に到達すると、経路修復が完了する。

## 第4章

### 近隣通信に基づく経路制御手法の提案

本章では、提案方式である近隣通信に基づくルーティング手法について述べる。最初に、複数の通信が行われている環境で既存のルーティングプロトコルを用いた場合の問題について説明する。また、提案方式である近通信状況に基づくルーティング手法について述べ、提案方式の有効性を計算機シミュレーションにより明らかにする。

#### 4.1 近隣通信が経路構築に与える影響

一般に、無線信号は端末を中心として円状に広がる。そこで、経路構築により特定の端末や帯域へ負荷が集中した場合、端末は近隣端末の通信の影響を大きく受けることが予想される。また、アドホックネットワークを実現するための無線通信デバイスとして想定される IEEE 802.11 などでは、ランダムアクセスによるコンテンション方式をベースとした CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を用いて無線資源の共有を実現している。CSMA/CA では、通信を行う前にキャリアセンスを行うことで無線チャネルの使用状況を確認する。その後、他の端末の送信信号が存在する場合は送信を延期する。未使用であると判断される場合はランダムな時間待ったのちに送信を行う。このようにすることで、複数の端末が一斉にパケット送信を行うことを防止している。パケットの送信は、受信側からの ACK (Acknowledge) フレームが到着することで、正しく送信されたと判断している。

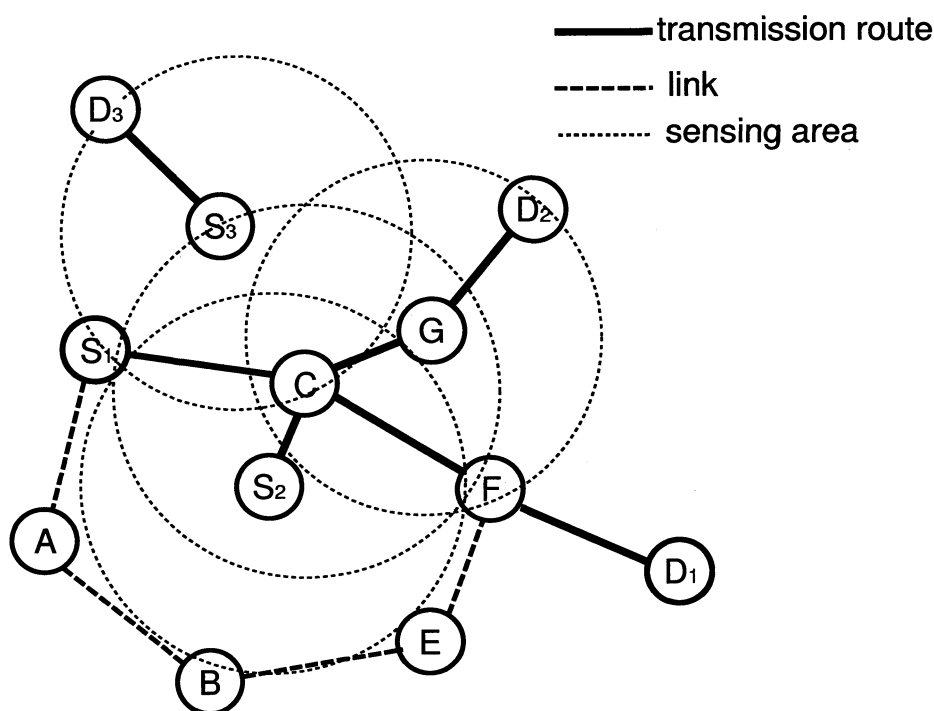


図 4.1 近隣通信による経路構築への影響

CSMA/CA ではパケットの衝突を回避するために端末に送信機会を確率的に割り当てるため、近隣通信量に応じて、自端末の送信機会が得られる頻度も大きく変化する。図 4.1 では、端末  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  が通信を行っている例を示す。パケットの転送を行う時、端末  $S_1$ ,  $F$  がパケットの転送を行う場合、近隣通信による影響が少ないため送信機会が得られる確率が高くなると考えられる。しかし、端末  $C$  などでは、近隣通信により送信機会が大きく低下する。

## 4.2 近隣通信状況に基づくルーティング手法

本論文では、トラヒックを考慮した経路構築を行うため、既存のルーティングプロトコルに適応することが可能である手法を提案する。また、リアクティブ型の代表的な AODV を例として用いる。提案方式では、各端末が観測した帯域占有率に基づいて経路の優先度の制御を行うことで複数の安定した経路の構築を行うこ



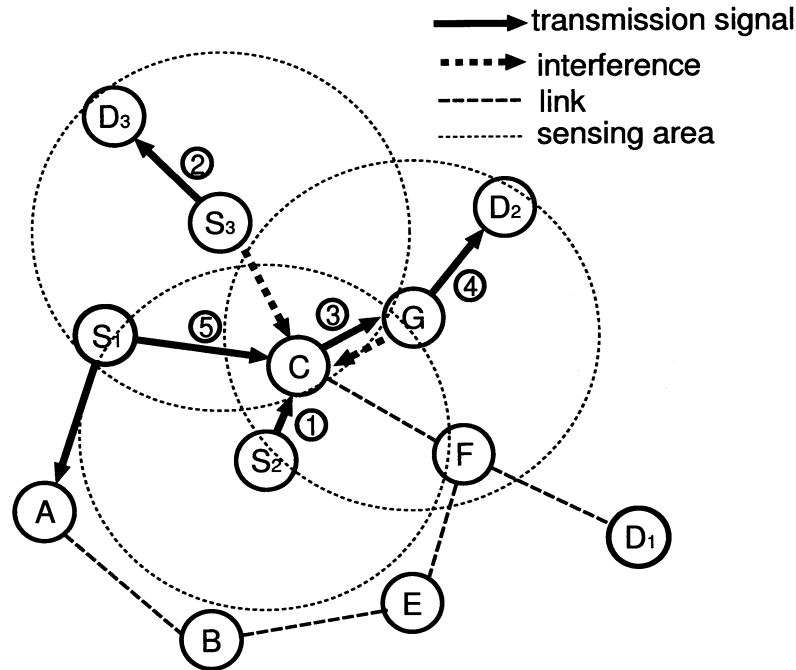


図 4.2 端末 C における信号受信例

とを目標としている。AODV では、送信先端末に最初に届いた RREQ メッセージを用いて経路構築を行うことから、提案方式では、RREQ メッセージ転送時の転送遅延量を各端末が観測した帯域占有率に基づいて制御することで、優先度の高い RREQ メッセージがより早く送信先端末に到着するように制御する。

#### 4.2.1 帯域占有率

提案方式では、各端末が利用可能な無線資源の指標として、端末が一定期間内に近隣端末からの信号を受信した期間の割合に着目する。また、この割合を帯域占有率と呼ぶものとする。帯域占有率の計算のために、端末は受信信号と受信電力の情報、コネクションの情報を保存する。帯域占有率として反映させる受信信号レベルは、CSMA/CA のセンシング閾値を用いる。また、受信信号には自らを経由するコネクションに関わる信号が含まれることから、各信号のコネクション

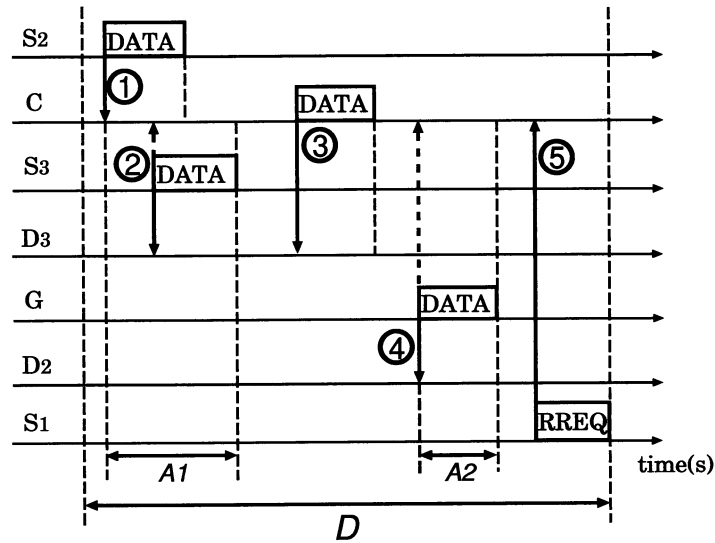


図 4.3 端末 C における受信信号のメッセージフロー

情報を利用することで自らの通信に関わる影響を除いた帯域占有率を求める。コネクション情報を判断できない場合は、他の通信に関わる信号として処理を行う。端末  $X$  が信号を信号観測期間  $D$  の間に受信した場合、受信信号を  $A$  とすると、帯域占有率  $O_X$  は、次のように表すことができる。

$$O_X = \frac{(\sum_{n=1}^n A_n)}{D} \quad (4.1)$$

図 4.2 に端末  $C$  の信号受信例を示す。また、その際のパケット受信のタイミングを図 4.3 に示す。

端末  $S_2$  が信号を送信する場合、CSMA/CA により近隣の通信状況の確認を行う。一方、端末  $S_3$  も信号を送信するために近隣通信状況の確認を行うが、端末  $S_2$ ,  $S_3$  は互いのセンシング範囲より外側に存在するため同時に信号を送信している。端末  $C$  では、端末  $S_2$  からの信号と、干渉として  $S_3$  からの信号を受信するため、信号の衝突が起こる。そのため、端末  $C$  では受信した信号のコネクション情報の判断はできない。図 4.3 より、端末  $C$  では端末  $S_2$  の信号の受信開始から、干渉として受信した端末  $S_3$  の信号の受信終了までの時間が受信信号  $A_1$  となる。その後、

端末  $C$  では、端末  $G$  が端末  $D_2$  に送信した信号を干渉として受信し、この信号が受信信号  $A_2$  となる。また、端末  $S_1$  から信号を受信するが、端末  $S_1$  からの信号は端末  $C$  が自らの通信に関わる信号であるため、帯域占有率の計算には含めない。よって、端末  $C$  が端末  $S_1$  から RREQ メッセージを受信した時の帯域占有率  $O_C$  は次のように表される。

$$O_C = \frac{A_1 + A_2}{D} \quad (4.2)$$

帯域占有率を指標として採用することにより、端末は実際に送信可能な無線信号の時間割合を知ることができ、送信可能な時間割合が多い端末を優先する経路構築が実現可能となる。

#### 4.2.2 提案方式における経路探索手順

図 4.4 に、RREQ メッセージを受信した際の中継端末と送信先端末の動作を示す。また、図 4.5 に、端末での負荷算出の動作を示す。

##### 経路探索手順

送信要求が発生した場合、AODV と同様に送信元端末は新たに RREQ メッセージを生成し、ネットワーク全体にフラッディングを行う。また、一定時間を待っても RREP メッセージを受信できない場合には、RREQ メッセージのシーケンス番号を増加させたのち、再び RREQ メッセージのフラッディングを行う。RREQ メッセージを受信した近隣端末は、自端末のアドレスが送信先端末として指定されていないのかを確認する。自端末宛の RREQ メッセージではない端末は、中継端末となり送信元端末からのホップ数を記録するとともに、コネクション情報の確認を行い、受信信号から自らの関与したコネクションに関する信号を除く。そして、端末は自端末が利用可能な無線資源の時間割合を考慮するために、RREQ メッセージ受信前の一定期間の帯域占有率を計算する。また、端末は帯域占有率に応じた RREQ メッセージの転送遅延時間を設定することで、経路構築に関わる積極性を変更する。AODV では最初に送信先端末に到着した RREQ メッセージが経由した

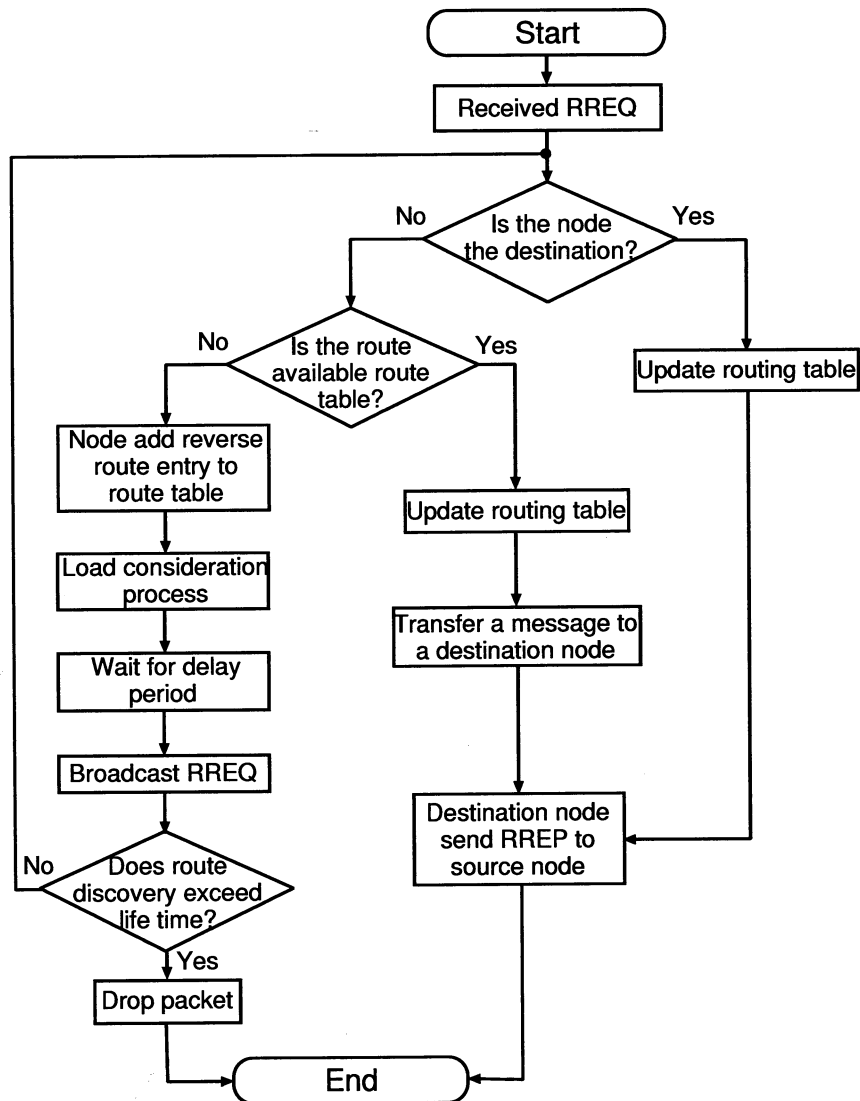


図 4.4 提案方式における RREQ メッセージのフローチャート

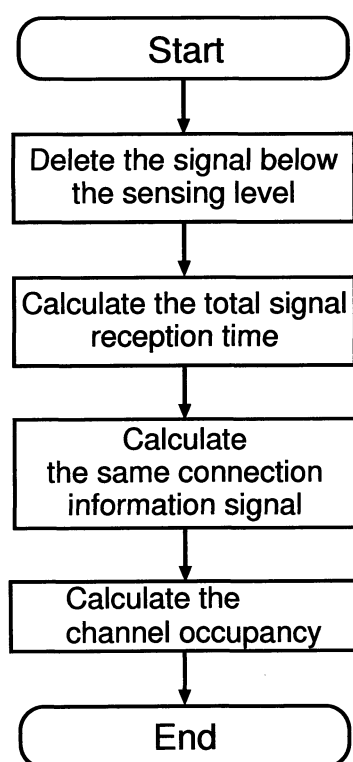


図 4.5 提案方式における負荷計算のフローチャート

経路を構築するため、転送遅延時間は帯域占有率が高いほど長い時間が設定されるものとする。端末は設定された遅延時間後、RREQメッセージのフラッディングを行う。なお、端末が同一シーケンス番号を含むRREQメッセージを複数受信した場合、最初に到着したRREQメッセージのみの転送処理を行うものとする。

#### 経路確定手順

受信したRREQメッセージの送信先端末アドレスと端末のアドレスが一致した場合、端末はRREPメッセージを生成し、RREQメッセージが経由してきた経路を用いてユニキャストで送信元端末にRREPメッセージの送信を行う。

#### 4.2.3 データパケットの配送

送信元端末はRREPメッセージを受信したことにより経路構築が完了したことを検出し、データパケットの送信を開始する。提案方式では、高トラヒックとなっている領域に存在する端末に対して長い転送遅延を設定し、経路構築に積極的に参加させないことで帯域占有率の低い端末を経路として選択する。そのためAODVと比較して、複数の通信が行われている場合にもデータパケットを安定して送信できる可能性が高くなる。

### 4.3 動作例

図4.6に、提案方式による経路構築の動作例を示す。また、その際のパケット送信タイミングを図4.7に示す。図4.6の動作例では、端末 $S_2$ と端末 $D_2$ 、端末 $S_3$ と端末 $D_3$ が既に通信を行っており、新たに端末 $S_1$ から端末 $D_1$ への通信を行うための経路構築を行う状況を考える。

#### 経路探索手順

端末 $S_1$ はRREQメッセージを生成し、送信先端末の探索のため、ネットワーク全体にフラッディングを開始する。RREQメッセージがフラッディングされると、中

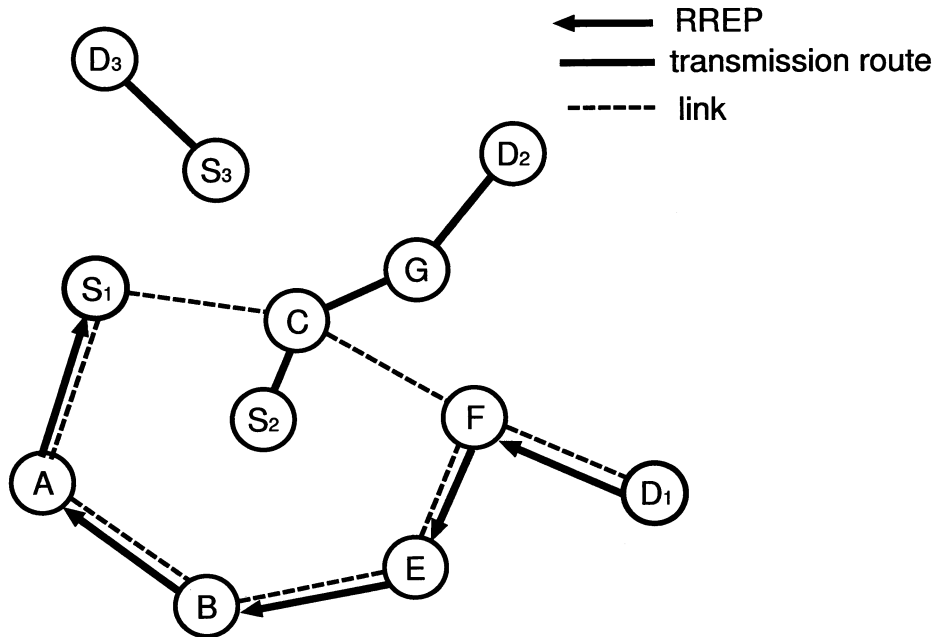


図 4.6 提案方式の経路構築例

継端末である端末  $A, B, C, E, F$  は、受信した RREQ メッセージを再転送し、経路を構築する。端末  $A, C$  が RREQ メッセージを受信すると、RREQ メッセージを再転送する前に端末の帯域占有率を計算する。この時、端末  $C$  では近隣通信の影響により帯域が混雑しているため帯域占有率が高くなり、混雑した帯域を避けるために図 4.7 に示される長い遅延量が設定される。一方、端末  $A$  では近隣で通信が行われていないため、帯域占有率が低くなることによる短い遅延量が設定される。同様に、端末  $B, E, F$  においても、RREQ メッセージを受信すると帯域占有率に基づいた転送が行われる。図 4.7 に示されるように、帯域占有率に基づいた遅延量を各端末が設定することにより、近隣通信の影響が少ない端末  $A, B, E, F$  を経由した RREQ メッセージが最初に送信先端末に到達する。

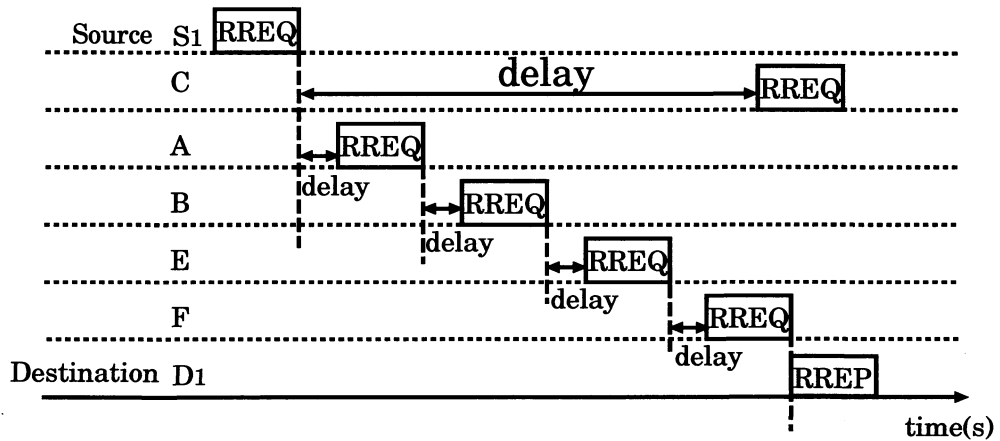


図 4.7 経路構築時の制御メッセージフロー

#### 経路確定手順

送信先端末が RREQ メッセージを受信すると、AODV と同様に最初に送信先端末に到達した RREQ メッセージに対して RREP メッセージの生成を行う。よって、端末 A, B, E, F を経由する経路が構築される。

#### 4.4 計算機シミュレーションによる特性評価

提案方式の有効性を明らかにするために、ネットワークシミュレータ Qualnet を利用したコンピュータシミュレーションを実施した。表 4.1 にシミュレーションパラメータを示す。

また、提案方式の帯域占有率に対する RREQ の転送遅延時間は表 4.2 を利用した。転送遅延時間は、帯域占有率が 1%上昇するのに対して、1[ms] 線形に増加させる。一方、高トラヒック領域に存在する端末の経路積極性を下げるため、帯域占有率が 21%以上では、伝送遅延時間を 10[ms] 線形に増加させる。また、帯域占有率が 41%以上では、伝送遅延時間を 600[ms] に固定した。



表 4.1 シミュレーションパラメータ

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Simulator                    | Qualnet                                 |
| Simulation time              | 500[s]                                  |
| Network area                 | 11000[m] × 11000[m]                     |
| Number of nodes              | 200                                     |
| Node placement               | Uniform                                 |
| Call generation              | Poisson distribution<br>5~20connections |
| Data packet size             | 1024[byte]                              |
| Average signal continue time | exponential distribution<br>20[s]       |
| Traffic                      | 64K[byte/s]                             |
| Physical layer               | IEEE802.11g                             |
| Data rate                    | 6M[bps]                                 |
| Propagation pathloss model   | FREE-SPACE                              |
| Application                  | CBR                                     |
| Routing protocol             | AODV                                    |
| Number of trials             | 50th                                    |

#### 4.4.1 経路構築遅延時間

図 4.8 に、平均コネクション数に対する経路構築遅延時間を示す。遅延時間は、送信元端末より経路要求が発生し、データパケットが送信されるまでの時間を示す。結果より、帯域占有率を用いた提案方式は低トラヒック環境では AODV と同等の性能となるものの、高トラヒック環境では経路構築遅延時間を削減していることが確認できる。AODV では、最短ホップで経路を構築するため、高トラヒックとなる帯域での送信機会が減少し、経路構築遅延時間も大きくなったと考えられ

表 4.2 帯域占有率に基づく転送遅延

| 帯域占有率 | 転送遅延（増分）         |
|-------|------------------|
| 1～20  | 10ms～29ms（1ms）   |
| 21～40 | 30ms～220ms（10ms） |
| 41    | 600ms            |

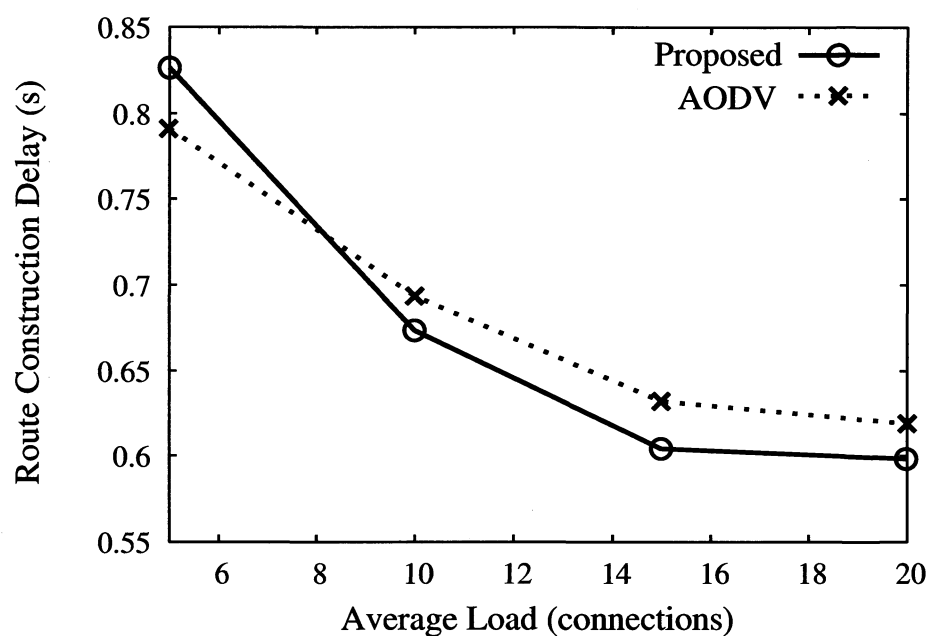


図 4.8 経路構築遅延時間

る。一方，提案方式では近隣通信を避けた経路の構築を行うことでパケットの送信機会が増え，遅延時間が向上したと考えられる。

#### 4.4.2 総端末数に対するスループット特性

図 4.9 に，平均コネクション数に対するパケット到着率を示す。結果より，AODV のパケット到着率はトラヒックの増加に対して劣化することが確認できる。AODV では，最短ホップで経路を構築するため近隣通信の影響を大きく受けたためであ

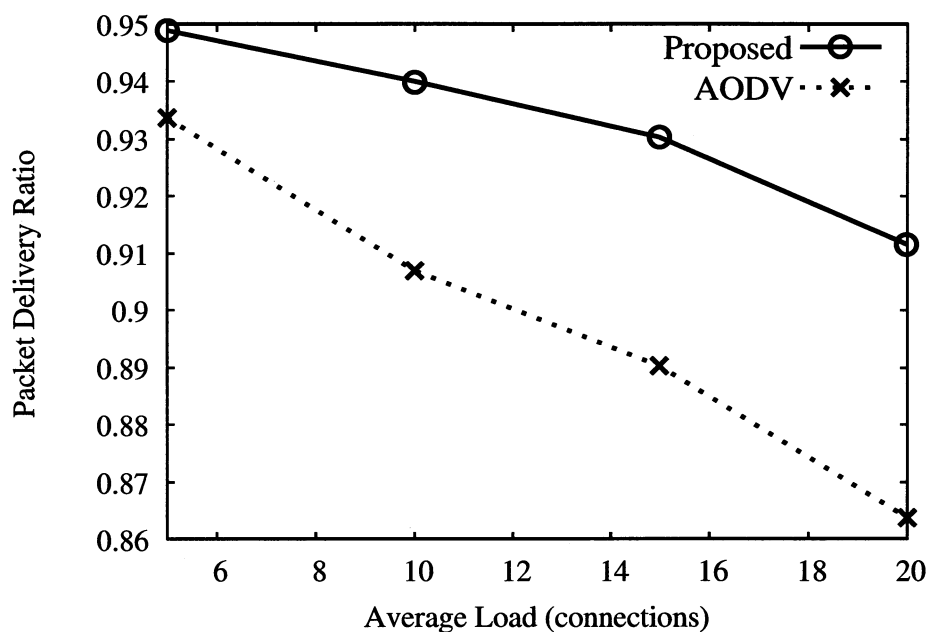


図 4.9 パケット到着率

ると考えられる。一方、提案方式は高トラヒックの状況においても、パケット到着率の劣化を抑えていることがわかる。これは、提案方式では低トラヒック領域に存在する端末が積極的に経路構築に関与しているため、近隣通信の影響を受けにくい経路が構築されているためであると考えられる。

#### 4.4.3 正規化リンク切断数

図 4.10 に、平均コネクション数に対する正規化リンク切断数を示す。正規化リンク切断数は、リンク切断数を送受信データパケット数で正規化した値である。結果より、提案方式におけるリンク切断が減少していることが分かる。AODVでは、リンク切断はデータリンク層のパケット損失により発生する。そのため、図 4.9 と同様に、高トラヒックとなっている帯域に存在する端末を避けることで、近隣通信による影響が減少したためであると考えられる。

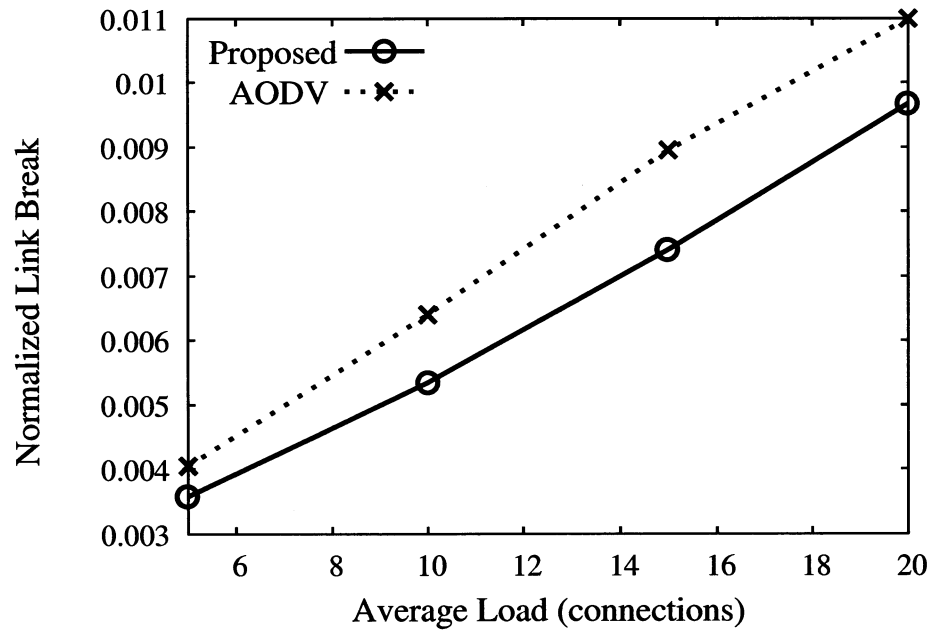


図 4.10 正規化リンク切断数

#### 4.4.4 正規化 RREQ メッセージ数

図 4.11 に、平均コネクション数に対する正規化 RREQ メッセージ数を示す。正規化 RREQ メッセージ数は、RREQ メッセージ数を送受信データパケット数で正規化した値である。結果より、総端末数が増加するに伴い、制御パケット数は増加する傾向があることが分かる。しかし、AODV に対して提案方式の RREQ メッセージ数が削減されていることが確認できる。特に、平均呼量が 15, 20 の時、提案方式は約 20 % 程度の RREQ メッセージを削減している。RREQ メッセージは、経路構築における制御メッセージの多くを占めるパケットであるため、RREQ メッセージの削減は意義があると思われる。

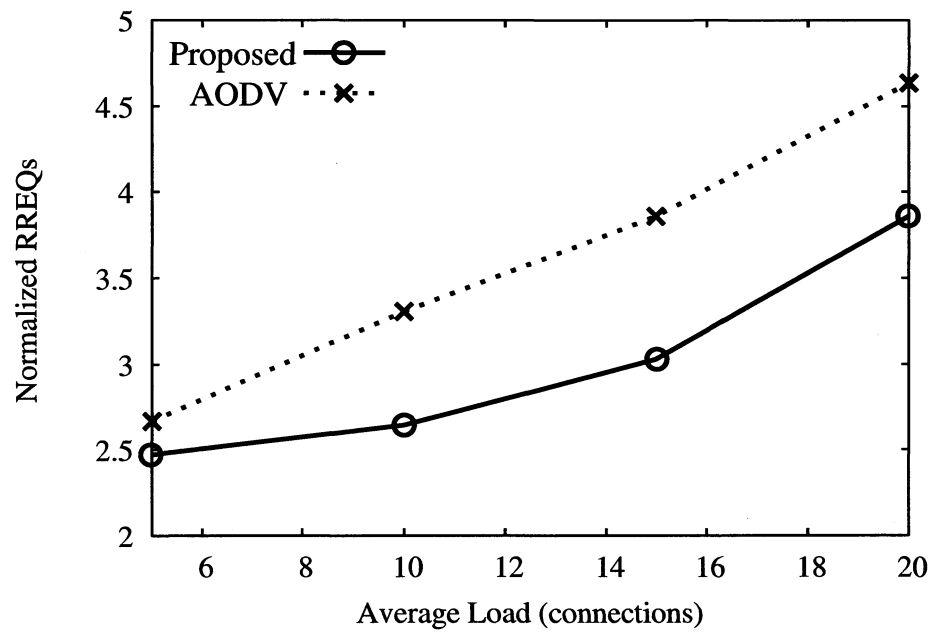


図 4.11 正規化 RREQ メッセージ数

## 第5章

### 結論

#### 5.1 本研究のまとめ

アドホックネットワーク用ルーティングプロトコルは多数あるが、AODV(Ad-Hoc On Demand Distance Vector)などの多くのプロトコルは、最小ホップルーティングを採用しており、送信先端末までの経路ホップ数が最小となる経路選択を行う。一方、アドホックネットワークでは、複数の端末が同時に通信を行うことが想定されるため、端末のトラヒック状態を考慮することにより、特定の経路へのトラヒックの集中を防ぐ負荷分散型ルーティングも近年研究されている。負荷分散型ルーティングを利用することにより、ネットワーク内の総スループットを改善可能であることが知られている。しかし、正確なトラヒック量の把握と、各経路上の負荷情報を収集することによるオーバーヘッドの増大が問題点として挙げられている。本論文では、互いの無線信号が到達しない経路を複数構築することにより、空間的に無線資源の有効利用を可能とし、安定した経路構築を行った。そこで、端末が受信する近隣通信量に着目することにより、自端末が利用可能な無線資源の推定を行い、利用可能な無線資源に応じて端末の経路構築に関わる積極性を変化させるルーティングプロトコルの提案を行った。提案方式では、高トラヒック領域に存在する端末の経路構築への積極性を引き下げ、低トラヒック領域に存在する端末の経路構築への積極性を引き上げる。結果として、提案方式では経路構築の際に新たな制御メッセージの収集を行うことなく、高トラヒック領域を迂回する経路を構築可能となる。提案方式は様々なルーティングプロトコルの拡張として実装

可能であるが、本論文では、代表的なアドホックネットワーク用ルーティングプロトコルである AODV を拡張することにより評価を行った。数値例より、提案方式を用いることにより、特に高トラヒック時の経路構築遅延時間、パケット到着率、RREQ メッセージ数が改善可能であることを示した。また、提案方式では各端末が自律的に収集した帯域占有率に基づき自律的に経路構築に関わる積極性を更新することから、オーバーヘッドが増加することなくトラヒック状況を考慮可能な経路構築を実現可能である。

## 参考文献

- [1] E.-M.Royer and C.-K.Toh, “ A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks,” IEEE Pers. Commun, Vol.6, No.2, pp.46-55, April 1999.
- [2] Andrea Goldsmith, “ ワイヤレス通信工学,” 丸善, August 2007.
- [3] C.-K.Toh, “ 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, June 2003.
- [4] 総務省, “平成 21 年版 情報通信白書,” 2009.
- [5] 蓮池和夫, B.Somprakash, 植田哲郎, “ アドホックネットワークの技術的課題,” 信学論 (B), Vol.J85-B, No.12, pp.2007-2014, 2002.
- [6] S.Corson and J.Macker, “ Mobile ad hoc networking(MANET) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations,” IETF, RFC 2501, Jan 1999.
- [7] S.-R.Das, R.Castaneda, and J.Yan, “ Simulation-based performance evaluation of routing protocols for mobile ad hoc networks,” Mobile Networks and Applications (MONET), Vol.5, No.3, pp.179-189, September 2000.
- [8] H.-Y.Hsieh and R.Sivakumar, “ Performance comparison of cellular and multi-hop wireless networks: A quantitative study,” Proc. ACM SIGMETRICS, pp.113-122, Boston, MA, USA, June 2001.
- [9] B.O'Hara, and A.Petrick, “ The IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion,” Standards Information Network IEEE Press, 2005.
- [10] D.-A.Gratton, “ Bluetooth Profiles: The Definitive Guide,” Prentice Hall, 2002.



- [11] J.Broch, D.-A.Maltz, D.-B.Johnson, Y.-C.Hu and J.Jetcheva, "A performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols," Proc. of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), pp.85-97, October 1998.
- [12] 斉藤匡人, "無線アドホックネットワーク," 2003.
- [13] C.P..P.Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," Proc. ACM SIGCOMM'94, pp.234-244, September 1994.
- [14] T.Clausen and P.jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol ," IRFC3626, October 2003.
- [15] D.Johnson, Y.-C.Hu and D.Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," RFC-4728, IETF Network Working Group, 2007.
- [16] S.-R.Das, C.-E.Perkins, and E.-M.Royer, "Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks," IEEE Conference on Computer Communications, Vol.1, pp.3-12, 2000.
- [17] C.-E.Perkins, E.-M.Royer and S.-R.Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC-3561, IETF Network Working Group, 2003.
- [18] AODV Public Implementations, "AODV Public Implementations," <http://moment.cs.ucsb.edu/AODV/aodv.htm#Implementations>.
- [19] Z.-J.Haas ,et al., "The Zone Routing Protocol (ZRP)for Ad Hoc Networks," IETF Internet Draft, July 2002.
- [20] Eun-Sun.Jung and N.-H.Vaidya, "A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks," Proc. ACM MobiCom'02, pp.36-47, Atlanta, USA, September 2002.
- [21] S.Singh, M.Woo, and C.-S.Raghavendra, "Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks," Proc. MobiCom'98, pp.181-190, 1998.

- [22] C.-K.Toh, "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp.138-147, 2001.
- [23] A.Misra, and S.Banerjee, "MRPC: Maximizing Network Lifetime for Reliable Routing in Wireless Environments," *Proc. WCNC'02*, Vol.2, pp.800-806, 2002.
- [24] A.Rani and M.Dave, "Load Balanced Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks," *Communication, Network and System Sciences*, pp.627-635, October 2009.
- [25] Z.-J.Hass, J.-Y.Halpern, and Li Li, "Gossip-Based Ad Hoc Routing," *Proc. IEEE INFOCOM*, pp.1707-1716, June 2002.
- [26] A.Rani and M.Dave, "Performance Evaluation of Modified AODV for Load Balancing," *Journal of Computer Science*, Science Publications, pp.863-868, November 2007.
- [27] S.Lee and M.Gerla, "Dynamic load-aware routing in ad hoc networks," *IEEE Int'l Conference on Communications*, Vol.10, pp.3206-3210, 2001.
- [28] V.Saigal, A.-K.Nayak, S.-K.Pradhan, and R.Mall, "Load balanced routing in mobile ad hoc networks," *Elsevier Computer Communications*, Vol.27, pp.295-305, February 2004.
- [29] H.Hassanein, and A.Zhou, "Routing with Load Balancing in Wireless Ad Hoc Networks," *Proc. ACM MSWiM*, Rome, Italy, pp.89-96, 2001.
- [30] J.Hakoda, H.Uehara and M.Yokoyama, "Performance Evaluation of Mobile Ad Hoc Routing Protocols Based on Link Expiration Time and Load of Node," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.J85B, No.12, pp.2108-2118, 2002.
- [31] S.Takahashi, J.Hakoda, H.Uehara and M.Yokoyama, "A Load Balanced Routing Scheme for Mobile Ad Hoc Networks," *ISITA*, Parma, Italy, October 2004.

- [32] J.Song, V.Wong, and V.Leung, " Load-aware on-demand routing (LAOR) protocol for mobile ad hoc networks," Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), Vol.3, pp.1753-1757, April 2003.
- [33] Y.-J.Lee, and G.-F.Riley, " A Workload-Based Adaptive Load-Balancing Technique for Mobile Ad Hoc Networks," IEEE Communication Society, WCNC, Vol.4, pp.2002-2007, March 2005.
- [34] S.Jung, N.Hundewale and A.Zelikovsky, " Energy Efficiency of Load Balancing in MANET Routing Protocols," SNPD/SAWN, pp.476-483, May 2005.
- [35] Y.-S.Kim, Y.-J.Cho, K.Kang, " An Enhanced Load-balancing Approach Using Detour in Ad-hoc Networks," Wireless Communications and Networking Conference, pp.1-5, April 2009.
- [36] J.-H.-Song, V.-W.-S.Wong and V.-C.-M.Leung, " Efficient on-demand routing for mobile ad hoc wireless access networks," IEEE journal on selected Areas in Communications, pp.1374-1383, September 2004.
- [37] Robert.-E.Kahn, Steven.-A.Gronemeyer, J.Burchfiel, and R.Kunzelman, " Advances in Packet Radio Technology," Proc. IEEE, Vol.66, No.11, pp.1468-1496, Nov 1978.
- [38] F.-A.Tobagi, and L.Kleinrock, " Packet Switching in Radio Channels:Part -the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access models and the busy-ono solution," IEEE Trans.Comm., Vol.COM-23, No.12, pp.1417-1433, 1975.
- [39] J.Jubin, and J.-D.Tornow, " The DARPA Packet Radio Network Protocols," Proc.IEEE, Vol.75, No.1, pp.21-32, Jan 1987.
- [40] Network Simulator QualNet is <http://www.scalable-networks.com/>

## 謝 辞

本論文を進めるにあたり，小林英雄教授，森香津夫准教授，内藤克浩助教には適切な御助言を賜りならびに御指導をしていただき，感謝の意を表します。そして，貴重なお時間をさいて本修士論文の査読をしていただきました三重大学大学院工学研究科電気電子工専攻の川中普晴助教に深く感謝いたします。最後に，常に完璧な研究設備の環境を整えてくださった山本好弘技官，ならびに通信工学研究室の院生，学部生に深く感謝致します。