

無線マルチホップネットワークに おける通信品質向上に関する研究

筑波大学審査学位論文（博士）

2009年

柳 生 智 彦

筑波大学大学院

ビジネス科学研究科 企業科学専攻

システムズ・マネジメントコース

論文概要

近年、携帯電話や無線 LAN 技術等の目覚ましい発展により、時間や場所にとらわれずユーザがコミュニケーションできるユビキタス社会が現実のものとなるうとしている。

ユビキタス社会の基盤となる通信ネットワークは、有人無人を問わず隔々の地域をカバーすることが求められる。この時、地理的、コスト的に有線網や携帯電話基地局を敷設することが困難である地域や、被災地など時間的に敷設が困難な状況において、広範囲な通信を実現するためには、無線通信装置を備えた通信ノードが自律的に中継を行う無線マルチホップネットワーク技術が有効な手段となる。無線マルチホップネットワークは、集中的な制御機構が不要であるため、既存の通信インフラが破壊された災害場所や通信インフラが存在しない場所において迅速にネットワークを開設するために利用できる。また、無線マルチホップネットワークの通信ノードは自由に移動できるため、自動車や電車など様々な移動体をネットワークに参加させることができる。このような特性を生かし、ITS(Intelligent Transport Systems) やセンサーネットワーク、災害救助、防災無線など様々なアプリケーションへの無線マルチホップネットワークの適用が期待されている。

しかし、無線リンクでは有線リンクに比べ、障害物の影響や通信ノードの移動により、通信品質の劣化が発生しやすい。ここで通信品質の劣化とは、パケットロスや遅延の増加を指している。特別な手立てを講じない限り、各リンクの通信品質が劣化した場合、無線マルチホップネットワークにおける End-to-End の通信品質は、各リンクの劣化が累積されることで、さらに悪化する。

本研究の目的は、通信品質の劣化や移動によるネットワーク構成の変化が発生しやすい無線マルチホップネットワークにおいて、遅延やパケットロスの少ない高品質な

通信を実現することである。本研究では、現在期待されているアプリケーションを想定し、既存方式では実現できない領域をカバーする方式を提案する。特に無線マルチホップネットワークで重要と考えられる次の3つの状況において、通信品質を向上するための方式を提案する。

(1) 移動の無い無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上

防災無線や電力監視などに利用される無線マルチホップネットワークでは、通信ノードは半固定的に設置され、トポロジーの変化は発生しない反面、非常に高い通信信頼性が要求される。しかし、受信電波の不安定さや、無線干渉によるパケットロスにより、既存方式で実現できるパケット到達率には限界がある。本研究では、切断許容パス、リンク瞬断状態及び無線干渉を考慮したパス経路計算方式を導入することによって、リンクが不安定な無線マルチホップネットワークにおいても End-to-End で高いパケット到達率を実現可能なマルチパス通信方式を提案する。

(2) 不均一な移動特性を持つ通信ノードで構成された無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上

災害救助活動では、作業員や自動車、ヘリコプターなど様々なものが通信を行う。これらの通信ノードは、移動しないものから高速に移動するものまで存在し、高速に移動する通信ノードの周辺では局所的なトポロジー変化が頻繁に発生する。通信ノードの移動特性に偏りがある場合、従来の経路制御方式では制御メッセージ頻度を最も速い通信ノードに合わせる必要があり、多大な制御メッセージ負荷が発生する。制御メッセージの増大は、通信品質を劣化させる原因となる。本研究では、不均一な移動特性を持つ通信ノードで構成された無線マルチホップネットワークにおいて、制御メッセージ負荷の増加を抑制し、高い通信品質を実現可能な経路制御方式を提案する。

(3) 多様なアプリケーションや利用状況が存在する無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上

オフィスや商店街、観光地、イベント会場などでアドホックに情報取得や配信を行うアプリケーションでは、頻度の低い局所的な通信が主流となる。通信は、屋内・屋外を問わず様々な場所や環境で行われる。通信環境（周囲通信ノード数、通信トラフィック等）は時間帯によって変化する。通信を行うアプリケーションも多様であり、通信要求特性（通信時間、遅延制約、パケットロス許容度、必要帯域等）は各アプリケーションに依存する。しかし、従来の経路制御方式ではアプリケーションや周囲環境に応じて最適な経路を選択することができず、十分な通信品質が得られない。本研究では、アプリケーション特性等に応じて最適経路の選択を可能とする経路制御方式を提案する。

これらの方式を適宜選択して適用することで、従来の方式では十分な通信品質が得られなかった状況においても、無線マルチホップネットワークによる高品質な通信が可能となる。

目次

第1章 序論	1
第2章 既存の通信品質向上技術	5
2.1 通信品質向上技術の概要	5
2.2 無線マルチホップネットワークにおける通信方式	7
2.2.1 プロアクティブ型経路制御方式	11
2.2.2 リアクティブ型経路制御方式	15
2.2.3 位置情報利用型経路制御方式	18
2.2.4 階層型経路制御方式	20
2.3 有線網におけるマルチパス通信方式	23
2.3.1 リルーティングとプロテクションスイッチング	24
2.3.2 プロテクションスイッチングの詳細	25
2.3.3 各方式の特徴比較	26
2.3.4 無線マルチホップネットワークにおけるマルチパス通信	27
2.4 本研究の対象領域	28
第3章 移動の無い無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上	33
3.1 緒言	33
3.2 マルチパス通信方式とその適用時の問題	34
3.3 無線マルチホップネットワーク向けマルチパス通信方式	37
3.3.1 切断許容パスの導入	37
3.3.2 リンク瞬断状態の導入	38

3.3.3	相互不干渉冗長経路の計算	40
3.4	性能評価	43
3.4.1	パケットロス発生モデル	46
3.4.2	ディスジョイント経路数の推定	47
3.4.3	パケット到達率	47
3.4.4	実験結果と考察	48
3.5	まとめ	51
第 4 章	不均一な移動特性を持つ通信ノードで構成された無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上	53
4.1	緒言	53
4.2	不均一な移動特性を持つノードで構成されたネットワークにおける経路制御の問題点	54
4.3	SMART(Scalable Mobility Adaptive Routing Techniques) の提案	57
4.3.1	SMART の動作	57
4.3.2	片方向移動通知	61
4.3.3	リンク品質に基づく経路計算	64
4.4	SMART の性能評価	68
4.4.1	シミュレーションシナリオ	68
4.4.2	プロトコルパラメータ	70
4.4.3	評価結果	70
4.5	まとめ	78
第 5 章	多様なアプリケーションや利用状況が存在する無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上	81
5.1	緒言	81
5.2	既存のリアクティブ型経路制御プロトコルの問題点	82
5.3	状況適応型メトリックを用いた経路制御方式	84

5.3.1	メトリック計算重みの導入	84
5.3.2	AODV-SAM の動作の概要	89
5.4	AODV-SAM の性能評価	90
5.4.1	通信特性に対する効果	93
5.4.2	ノード移動特性に対する効果	96
5.5	最適な重み係数の決定に関する考察	99
5.6	まとめ	100
第 6 章 結論		105
謝辞		109
参考文献		111
関連業績リスト		119

目次

1.1 広域ユビキタスネットワークにおける通信ノード収容形態	2
2.1 ブロードキャスト型通信の例	8
2.2 ユニキャスト型通信の例	8
2.3 無線マルチホップ通信技術の分類	9
2.4 OLSR Hello 交換の例	13
2.5 OLSR MPR 選択の例	15
2.6 AODV 経路構築の例	16
2.7 AODV ローカルリペアの例	16
2.8 位置情報利用型における転送先ノードの例	20
2.9 ZRP のネットワーク例	21
2.10 HSR のネットワーク例	22
2.11 LANMAR のネットワーク例	23
2.12 ローカルプロテクション動作例	26
2.13 1+1 の動作例	26
2.14 N:M(1 : 1) の動作例	27
2.15 各方式のトポロジー変化頻度と通信品質の関係	29
3.1 さらし端末問題の例	35
3.2 隠れ端末問題によるパケット衝突例	36
3.3 リンク状態遷移図	39
3.4 パス状態遷移図	39

3.5	瞬断リンクを含むパス	40
3.6	ノード重み付けの例	41
3.7	経路計算の例	43
3.8	評価ネットワーク構成	45
3.9	ノード数とディスジョイント経路数の関係	48
3.10	パケット到達率	49
3.11	リルーティング回復パス本数	50
3.12	通信途絶時間	50
4.1	Fast-OLSR のメッセージシーケンス例	56
4.2	SMART のメッセージシーケンス例	60
4.3	リンク品質に基づく経路切り替え例	67
4.4	パケット到達率	72
4.5	パケットロス原因	73
4.6	平均制御負荷	74
4.7	タイプ別制御負荷	74
4.8	ピーク制御負荷	75
4.9	平均パケット遅延	76
4.10	リンク品質に基づくルーティングのパケット到達率に対する効果	77
4.11	リンク品質に基づくルーティングの平均制御負荷に対する効果	77
4.12	リンク品質に基づくルーティングの平均パケット遅延に対する効果	78
4.13	高速移動ノード数に対するパケット到達率	79
4.14	高速移動ノード数に対する平均パケット遅延	79
4.15	高速移動ノード数に対する平均制御負荷	80
5.1	RREQ メッセージフォーマット	88
5.2	提案方式の動作例	91
5.3	通信継続時間とパケット到達率	94

5.4	通信継続時間とパケット遅延	95
5.5	通信継続時間とローカルリペア回数	96
5.6	通信継続時間と発生 RREQ 数	97
5.7	ノード移動速度とパケット到達率	98
5.8	移動間隔とパケット到達率	100
6.1	本研究のカバー領域	106

表 目 次

2.1	通信方式の定義	7
2.2	ユニキャスト通信における経路制御方式の定義	8
2.3	MPLS 障害回復方式の比較	28
3.1	シミュレーションパラメータ	46
4.1	SMART における制御メッセージ	59
4.2	リンク品質の決定方法	66
4.3	シナリオパラメータ	69
4.4	プロトコルパラメータ	71
5.1	通信可能時間を考慮したプロトコル	82
5.2	輻輳回避を考慮したプロトコル	83
5.3	RREQ に追加した情報	87
5.4	評価した重みの組み合わせ	92
5.5	正規化に用いる各メトリック要素の最良値と最悪値	93
5.6	通信継続時間に対する最適な重み係数の組み合わせ	94
5.7	移動速度に対する最適な重み係数の組み合わせ	97
5.8	移動間隔に対する最適な重み係数の組み合わせ	99
5.9	各状況におけるパケット到達率に対する最適重み係数の組み合わせ	101
5.10	各状況におけるパケット到達率の詳細	102

第1章 序論

近年、携帯電話や無線 LAN 技術等の目覚ましい発展により、時間や場所にとらわれずユーザがコミュニケーションできるユビキタス社会が現実のものとなろうとしている。ユビキタス社会の目標は、あらゆるものが連携して人間の活動をサポートする安心・安全な社会である [総務省 04]。ユビキタス社会を実現するためには、遍在するコンピュータやデバイスを自由に接続するネットワーク（ユビキタスネットワーク）が重要となる [山田 03]。ユビキタスネットワークでは特に、有人エリアだけでなく無人エリアに設置されたセンサーなどもカバーする広域性が鍵となる [斎藤 05]。斎藤らは、広域ユビキタスネットワークにおける通信ノード（無線通信端末）の收容形態として次の3つを挙げている (図 1.1)。

- 直接收容

固定電話網や The Internet、携帯電話網などを使い、端末を広域ネットワークと接続する。広域ネットワークに直接接続するため、ネットワーク上のユニークなアドレスが必要であり、End-to-End での通信機能を備えた高度な端末が必要となる。

- ゲートウェイ経由での端末收容

無線 LAN のアクセスポイントやホームルータ等を介して、端末を広域ネットワークと接続する。端末はゲートウェイとだけ通信できれば良いため、ローカルなアドレスやプロトコルを利用することが可能となる。

- ゲートウェイ経由でのネットワーク收容

無線 LAN のアクセスポイントやホームルータ等を介して、ローカルネットワー

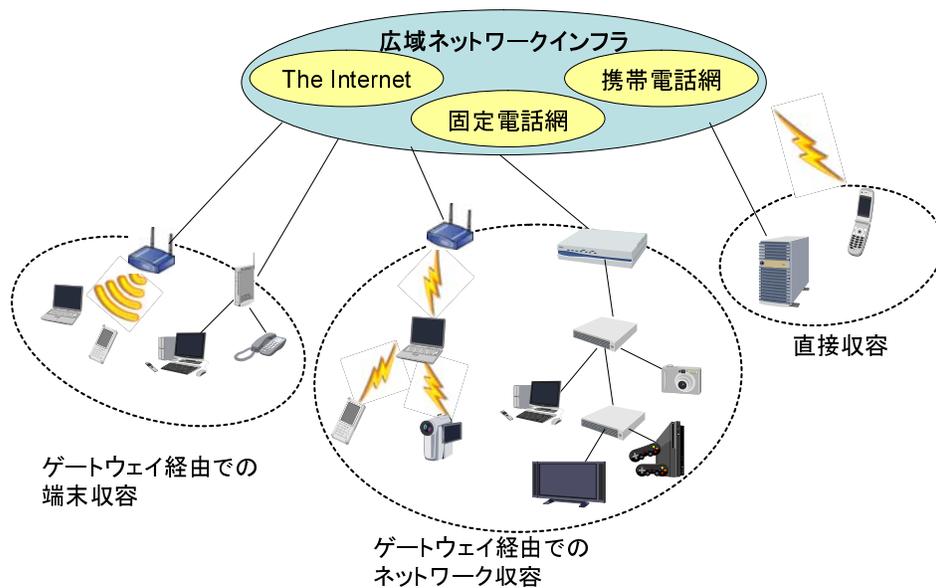


図 1.1: 広域ユビキタスネットワークにおける通信ノード収容形態

クを広域ネットワークと接続する。ゲートウェイ経由での端末収容に比べ、カバーエリアを拡大できる。端末はマルチホップ通信機能を備える必要がある。

無線マルチホップネットワークはゲートウェイ経由で収容されるネットワークの実現形態のひとつであり、後述するように、有線網や携帯電話網、無線 LAN ではカバーできないエリアにネットワークを敷設するのに不可欠な技術である。

無線マルチホップネットワークは、無線通信装置を備えた通信ノードが自律的に中継を行い End-to-End の通信を実現する。集中的な制御機構が不要であり、光ファイバーや電話線などを通信ノード間に施設する必要がないため、地理的またはコスト的に有線網や携帯電話基地局を設置することが困難である地域をカバーする有効な手段となる。また、既存の通信インフラが破壊された災害場所において迅速にネットワークを構築するためにも利用できる。さらに、無線で接続された通信ノードは自由に移動できるため、ネットワークに自動車や電車など様々な移動体を参加させることができる。こうした特性を生かし、ITS (Intelligent Transport Systems) [間瀬 06] やセンサーネットワーク [Karaki 04]、災害救助、防災無線など様々なアプリケーションが考

えられている。

ITS や防災無線、災害救助活動などのアプリケーションは重要な通信を扱うことが多く、さらに、緊急性の高い通信であるため、パケットロスによる情報欠損や再送による遅延増大は極力抑えなければならない。こうした高い信頼性を要求するアプリケーションを実現するためには、高い通信品質が不可欠である。

一方で、無線リンクでは通信品質の劣化が発生しやすいという欠点がある。通信品質の劣化とは、通信ができなくなったり、エラーが発生したり、速度が低下することを指す。通信障害やエラー、速度低下の原因は、パケットロスや輻輳であり、パケットロスや輻輳は、全体としてパケット到達率と遅延時間で測ることができる。そのため、本論文では通信品質の尺度としてパケット到達率および遅延を採用する。ここで、通信品質を引き起こすパケットロスや輻輳は、主に次のような要因で発生する。

- 障害物や天候変化（降雨）、高速移動による無線伝播状態の悪化
- 通信ノードの移動によるパケット転送経路の切断
- 他ノードとの通信干渉

特別な手立てを講じない限り、各リンクの通信品質が劣化した場合、無線マルチホップネットワークにおける End-to-End の通信品質は、各リンクのパケットロスや遅延が累積することで、さらに悪化する。

本研究の目的は、通信品質が不安定な無線リンクで構成された無線マルチホップネットワークにおいて End-to-End の通信品質を向上することである。特に本研究では、防災無線や災害救助等で想定される 100 ノード以下で構成される無線マルチホップネットワークを対象とする。

本論文の構成は以下のとおりである。第 2 章では、既存の通信品質向上技術について述べる。第 3 章では、移動の無い無線マルチホップネットワークにおいて通信品質を向上するマルチパス通信方式を提案する。第 4 章では、不均一な移動ノードで構成された無線マルチホップネットワークにおいて通信品質を向上する経路制御方式を提

案する．第5章では、多様なアプリケーションや利用状況が存在する無線マルチホップネットワークにおいて通信品質を向上する経路制御方式を提案する．最後に、第6章で本論文をまとめる．

第2章 既存の通信品質向上技術

2.1 通信品質向上技術の概要

従来、直接接続された2ノード間の通信を制御するデータリンク層、ネットワーク内の任意の2ノード間の通信経路を制御するネットワーク層、ネットワーク内の2ノード間の通信状態を制御するトランスポート層の3つの層(レイヤー)において、通信品質を向上する技術が提案されてきた。以下に、各レイヤーにおける主な技術の概要を述べる。

- データリンク層

Diffserv(Differentiate Services) [RFC2474] などで定義された優先度を使い、優先度の異なるパケットを個別のキューで管理する技術が提案されてきた。これにより、リンク輻輳時にも優先度の高いパケットのロス及び遅延増加を回避することが可能となる。また、2ノード間での送達確認を行い、再送制御を行うことでパケットロスを軽減する方法が提案されている。

- ネットワーク層

リンクの障害やネットワーク構成(トポロジー)の変化に対して、通信可能な経路を計算しパケット転送を行う技術が提案されてきた。リンク状態の変化を検知し自律分散的に経路を変更する方法は、動的経路制御と呼ばれている。インターネットに代表される有線IPネットワークにおいては、RIP (Routing Information Protocol) [RFC2453] や OSPF (Open Shortest Path First) [RFC2328]、BGP (Border Gateway Protocol) [RFC4271] などの動的経路制御プロトコルによって、リンクやノード障害から自動的に経路復旧することで通信品質を高めてい

る。これらの動的経路制御プロトコルは、リンクステート型、距離ベクトル型等の方式で経路制御を行っている [Tanenbaum 96]。距離ベクトル型は、隣接ノード同士が互いに到達可能な宛先までの距離を通知しあうことにより各宛先まで最短で到達可能な転送先ノード（ネクストホップ）を決定する方式である。リンクステート型は、ネットワーク内の全ノードがリンク情報を共有し、リンク情報から構築したグラフ（トポロジー）に基づき最短経路を計算する方式である。また、複数のパスを用いて通信を行うことで通信品質を高めるマルチパス通信方式も提案されている。

- トランスポート層

TCP (Transmission Control Protocol) [RFC793] に代表されるトランスポート層プロトコルにより、End-to-Endの通信において送信レート制御や再送制御を行う。

データリンク層の制御のみでは、通信品質が劣化したリンク上で優先制御や再送制御を行ったとしても、通信品質の改善には限界がある。トランスポート層の制御においても、通信品質が劣化したリンクを通る通信経路を使い続ける限り、通信経路の品質以上に改善することは困難である。リンクの通信品質の変化が激しい無線マルチホップネットワークにおいては、劣化したリンクを回避してパケット転送を行うネットワーク層での動的経路制御が特に重要となる。

本章では、これまで提案された無線マルチホップネットワークにおける通信方式、特にユニキャスト通信の動的経路制御方式について説明する。また、動的経路制御方式のみでは実現が困難な通信品質要求実現のために、有線網で提案されているマルチパス通信方式について説明する。

表 2.1: 通信方式の定義

方式	定義
ブロードキャスト型通信	ネットワークに存在する全通信ノードに対して同一データを送信する通信形態
ユニキャスト型通信	ネットワーク内に存在する任意の2通信ノード間においてデータを送受信する通信形態

2.2 無線マルチホップネットワークにおける通信方式

複数の無線端末を介してパケットの中継を行う無線マルチホップネットワークにおける代表的な通信形態としては、ネットワーク内の全端末にパケットを送信するブロードキャスト(図 2.1)と1対1で通信するユニキャスト(図 2.2)がある(表 2.1)。

ユニキャスト通信において、直接通信可能でない通信ノードに対してパケットを送信するためには、宛先ノードにパケットを転送可能な中継ノードを決定しなければならない。ネットワークの中継ノードを決定する経路制御方式には、動的経路制御と静的経路制御の二種類が存在する。事前に管理者や利用者がパケット転送先を各通信ノードに設定しておくことを、静的経路制御と呼ぶ。一方、通信ノード間の接続状態の変化に応じて、一定の規約(経路制御プロトコル)に基づいて適応的に経路を変更することを動的経路制御と呼ぶ(表 2.2)。図 2.3 に、無線マルチホップネットワークにおける通信方式の分類を示す。

ブロードキャスト

ブロードキャストは、複雑な経路制御を必要としないためループの発生や経路障害によるパケットロスがユニキャストに比べて少なくパケット到達率が高いという利点

表 2.2: ユニキャスト通信における経路制御方式の定義

経路制御方式	ネットワーク内に存在する任意の通信ノード宛パケットの転送先を決定する方式
静的経路制御方式	管理者等が設定を変更しない限り、経路が変化しない経路制御方式
動的経路制御方式	一定の規約(経路制御プロトコル)に基づいて適応的に経路を変更する経路制御方式

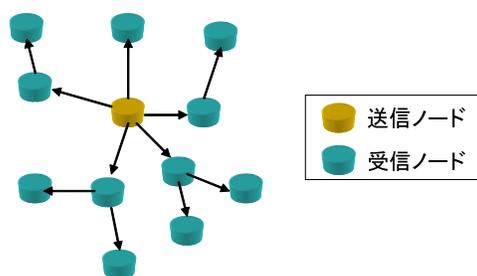


図 2.1: ブロードキャスト型通信の例

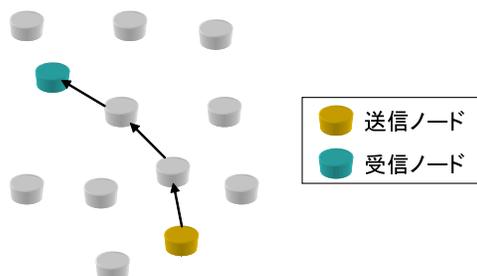


図 2.2: ユニキャスト型通信の例

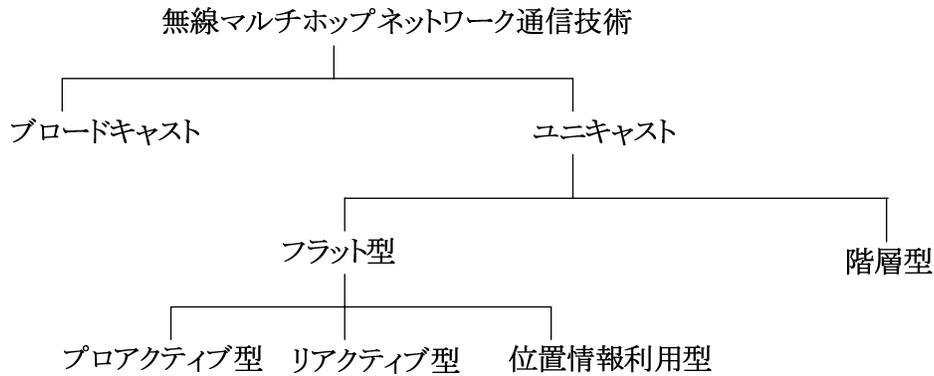


図 2.3: 無線マルチホップ通信技術の分類

がある。ブロードキャスト型通信によりメッセージをネットワーク全体に転送することを、フラッディングと呼ぶ。これまで数多くブロードキャスト通信方式が提案されており [Williams 02]、フラッディングの方法別に次の4つに大別できる。

- シンプルフラッディング

全通信ノードが、受信したパケットを転送する最も単純な方式である。パケットが無限に転送されるのを防止するため、一度転送したパケットは記録しておき、2回目以降に同じパケットを受信しても転送しない。

- 確率に基づく転送方式

パケットを受信したノードは、確率やノード毎に保持しているカウンター値に基づいて転送するかどうかを決定する。各ノードは、ランダムまたはパケットの送信元から何ホップ離れているかなどを基に転送確率を決定する [Haas 02]。カウンター値に基づく転送判断では、一定時間内に一定数以上の同一パケットを受信しなかった場合のみ転送を行う [Ni 99]。こうした転送判断を行うことで、ノードが密集したネットワークにおいて転送回数を削減することができる。しかし、転送しない通信ノードが存在することで、全ノードにパケットが到達することを保証できない。

- エリアに基づく転送方式

パケットを受信したノードは、一定時間以内に同じパケットを転送したノードとの距離やカバーエリアの差に基づいて転送するかどうかを決定する。距離に基づく判断では、転送ノードとの距離が一定以上であった場合に転送を行う。エリアに基づく判断では、GPS (Global Positioning System) によって転送ノードのカバーエリアと自分のカバーエリアの差を計算し、一定以上の差があれば転送を行う [Ni 99]。エリアに基づく転送方式も、確率に基づく転送方式と同様、転送負荷を削減できる一方、全ノードへのパケット到達を保証できない。

- 隣接ノード情報に基づく転送方式

定期的に制御パケットを送信し、隣接ノードや2ホップ先ノードの情報に基づいてパケットをネットワーク全体に転送するための転送木を構築する [Qayyum 00] [Sucec 00]。転送木を構築することで、転送負荷を削減しながら、全ノードへのパケット到達を保証できる。しかし、転送木の構築のための負荷が発生することと、構築に時間がかかるためノードの移動などの変化に弱いという欠点がある。

以上説明してきた様に、無線ネットワークのブロードキャスト型通信はネットワーク全域にパケットを転送するため通信負荷が高いという欠点を共通に持っている。そのため、事故情報など非常に緊急性が高く全員に通知が必要な限定された通信にのみ適用可能である。

ユニキャスト

ユニキャストに関しては、ノードの移動や無線リンクの帯域が狭いことを考慮し有線IPネットワークとは異なる動的経路制御方式が多数提案されてきた。ユニキャストの動的経路制御方式は、大きくフラット型 [Royer 99] [Abolhasan 04] [Mauve 01] と階層型 [Hong 02] の2種類がある。

フラット型経路制御方式では、ネットワーク内の全てのノードは同じ役割を持つ。ノードが持つ通信用アドレス（IP アドレス等）は、フラットであり構造を持たない。フラット型の長所は、全てのノードが同じ方式で経路制御を行うため方式が比較的簡単なことである。短所は、ノード数や通信量の増加に伴い経路制御に必要なメッセージ数が急速に増加する傾向があり、一般的に 100 ノード以下の小規模から中規模程度のネットワークにしか適用できない点である。さらに、フラット型経路制御方式は、プロアクティブ型、リアクティブ型および位置情報利用型に分類できる。プロアクティブ型経路制御方式とは、各通信ノードが他のノードへの矛盾の無い最新の経路情報を常に維持しようとする動的経路制御方式のことである。リアクティブ型経路制御方式とは、パケットを送信するノードが、宛先ノードまでの経路を必要とするときのみ経路を作成する動的経路制御方式のことである。位置情報利用型経路制御方式とは、宛先ノードや中継ノードの位置情報に基づいてパケットの転送先を決定する動的経路制御方式のことである。

一方、階層型経路制御方式では、一部の通信ノードは経路制御範囲を分割し、分割した経路制御範囲間のパケット転送を行う特別な役割を持つ。ネットワークで利用されるアドレスは、制御範囲やノードの役割に応じて階層的に割り当てられることが多い。階層型の長所は、フラット型よりも大規模な無線網の経路制御が可能な点である。短所は、フラット型に加え、ネットワークを分割して制御する様々な機能が必要であるため、方式が複雑となりネットワーク構成（トポロジー）の変化に弱くなる点である。

次節以降でプロアクティブ型、リアクティブ型、位置情報利用型および階層型の動的経路制御方式について説明する。

2.2.1 プロアクティブ型経路制御方式

プロアクティブ型経路制御方式では、各通信ノードが他のノードへの矛盾の無い最新の経路情報を常に維持するため、ネットワーク内の全ノードが定期的に経路制御メッセージを送信し、経路計算に必要な情報（ネットワークトポロジー等）を交換する。交換した情

報を使い各ノードが各宛先への最短経路を計算することで、全ノードが常時最適な経路を使って通信できるため、AODV(Ad-Hoc On-Demand Distance Vector:後述)等の他のフラット型ユニキャスト経路制御方式に比べ通信品質が良い [Lee 99]. 代表的なプロアクティブ型経路制御方式としては、OLSR (Optimized Link State Routing) [RFC3626]、TBRPF (Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding) [RFC3684]、FSR (Fisheye State Routing) [Pei 00] などが挙げられる。OLSR、TBRPF、FSR は、リンクステート型プロトコル [Tanenbaum 96] であり、経路制御負荷を抑え収容可能なノード数を高める工夫がそれぞれにされている。

以下、無線マルチホップネットワークにおける代表的なプロアクティブ型経路制御プロトコルである OLSR について説明する。OLSR において経路計算に必要な情報を取得する動作は、主に (1) 隣接ノードとのリンク確立、(2) MPR (Multi Point Relay) ノードの選択、(3) リンク情報の広告の 3 つに別れる。以下に各動作について概要を説明する。

(1) 隣接ノードとのリンク確立

OLSR は、定期的に Hello メッセージをブロードキャストすることで、隣接ノードの発見を行い、ローカルリンクを確立する。図 2.4 を用いて、OLSR での Hello 交換動作を説明する。ノード A,B,C の 3 台が直列に並んでおり、各ノードは定期的に Hello メッセージを隣接ノードに対して送信している。各ノードのリンク確立は、次のステップで行われる。

- (1) ノード A が Hello を送信すると、ノード B はそれを受信する。
- (2) ノード B は、ノード A の Hello に自身のノード ID が入っていないため、ノード A を片方向隣接ノード (ASYM Neighbor) として隣接ノードテーブルに記録する。
- (3) 次にノード B が Hello を送信する。ノード B の Hello には、ASYM Neighbor としてノード A の ID が入っている。
- (4) ノード B の Hello を受信したノード A は、Hello に自身の ID が入っているため、

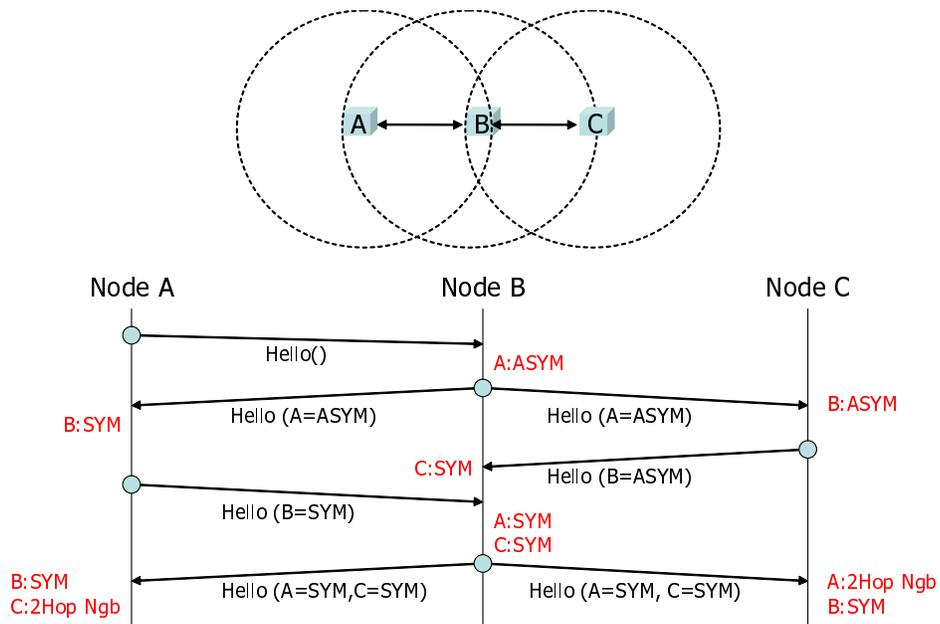


図 2.4: OLSR Hello 交換の例

ノード B を双方向隣接ノード (SYM Neighbor) として記録する。

- (5) ノード C は、Hello に自身の ID が入っていないため、ノード B を ASYM Neighbor として記録する、
- (6) 次にノード C が Hello を送信する。ノード C の Hello を受信したノード B は自身の ID が Hello に入っているため、ノード C を SYM Neighbor として記録する。

この Hello 交換を各ノードで繰り返し、隣接ノードとのローカルリンク (SYM Neighbor とのリンク) を確立する。また、自身の隣接ノードでなく、隣接ノードの隣接ノードであるノードは、2 ホップ先ノード (2-Hop Neighbor) として記録する。図の例では、ノード C はノード A の 2 ホップ先ノードである。

(2) MPR ノードの選択

OLSR の特徴は、制御メッセージの転送に MPR (Multi Point Relay) ノードを利用することである。MPR ノードとは、2 ホップ先の全ノードに制御メッセージを転送す

るために最小限必要なノードである。各ノードは隣接ノードの一部を MPR として選択する。

図 2.5 に、MPR ノード選択動作例を示す。ノード A はノード B~E の 4 つの隣接ノードと、ノード F~K の 6 つの 2 ホップ先ノードを持つ。ノード A は、全 2 ホップ先ノードをカバーできる隣接ノードのセットを MPR ノードとして選択する。ノード A の MPR ノード選択は以下のステップで行われる。

- (1) ノード F をカバーできるのはノード B のみであるため、まずノード B を MPR として選択する。
- (2) 次にノード I をカバーできる隣接ノードはノード D のみであるため、ノード D を選択する。
- (3) ノード B とノード D によってノード F~K の 6 つの 2 ホップ先ノード全てをカバーすることができるため、MPR の選択はここで終了する。

結果として、ノード A はノード B とノード D を MPR ノードとして選択する。選択した MPR ノードは、Hello によって隣接ノードに通知される。

(3) リンク情報の広告

OLSR は、MPR に選択した隣接ノードとのローカルリンク情報を TC (Topology Control) メッセージにより定期的にネットワーク全体へ広告することで、ネットワークポロジ (ネットワークの構成) を獲得する。MPR に選ばれたノードのみが、TC メッセージの生成と転送を行う。送信された TC メッセージは、MPR ノードを經由してネットワーク全体に転送される。(2) で説明したとおり、MPR ノードが転送することで必ず 2 ホップ先の全ノードが受信することができる。これを各ノードが繰り返すことでネットワーク内の全ノードがメッセージを受信することができる。制御メッセージの転送を MPR 経由に絞ることで、OLSR の制御メッセージ負荷を削減している。

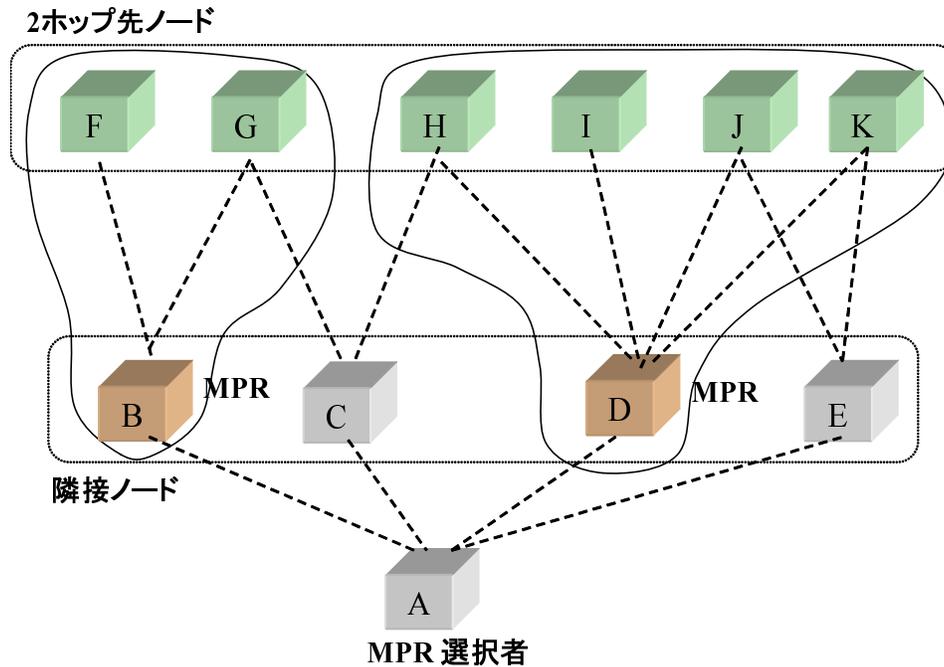


図 2.5: OLSR MPR 選択の例

2.2.2 リアクティブ型経路制御方式

リアクティブ型経路制御方式は、各ノードにおいて宛先ノードへの経路が必要となった時点で経路の探索を行う方式である。定期的に経路制御メッセージを送信する必要がないため、プロアクティブ型と比較して制御負荷を低く抑えられる [Lee 99].

代表的なリアクティブ型経路制御プロトコルである AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) [RFC3561] では、送信ノードが通信開始時に経路探索を行う。経路探索は、経路要求メッセージ (Route Request、以下 RREQ) をネットワーク全体にブロードキャストすることで行われる。RREQ を受信した宛先ノードは、経路応答メッセージ (Route Reply、以下 RREP) を RREQ と逆の経路で返す。RREP を受信した中継ノードおよび送信ノードは、送信ノードと宛先ノードへの経路を設定する。

図 2.6 の例を使い AODV の動作を説明する。

- (1) ノード S がノード D に通信を開始する場合、ノード S は宛先ノード D の識別子を

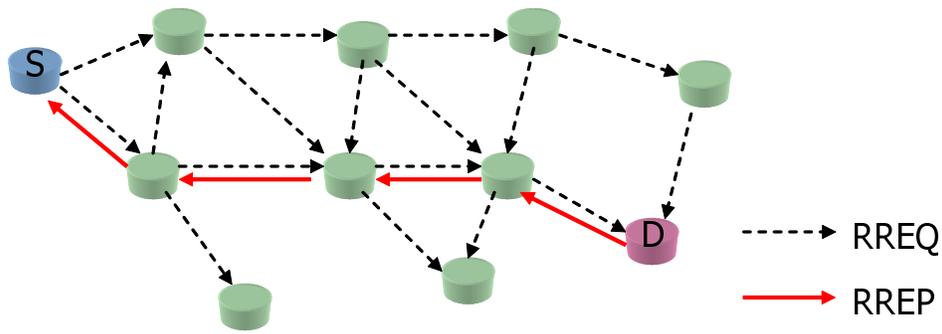


図 2.6: AODV 経路構築の例

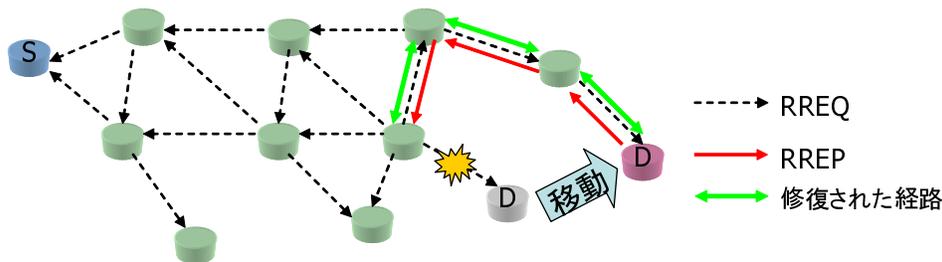


図 2.7: AODV ローカルリペアの例

入れた RREQ メッセージを送信する。

- (2) RREQ メッセージは点線で示されるように転送され、宛先ノード D に到達する。
- (3) 宛先ノード D は、最初に受信した RREQ に対して RREP を応答する。
- (4) RREP は、実線のように RREQ と逆向きに転送され、ノード S-D 間の経路が設定される。
- (5) ノード S が RREP を受信すると、ノード D へのデータパケット送信を開始する。

ノードの移動などにより経路が切れた場合は、経路の障害箇所に直接接続した通信ノード（障害端ノード）が再度 RREQ を送信して局所的に経路修復（ローカルリペア）を行う。図 2.7 の例では、宛先ノード D が移動したことで既設の経路が切れ、宛先ノードの前の障害端ノードが宛先ノード D への RREQ を送信して経路を修復している。

無線リンクでは、通信ノードの送信電力や障害物の影響により、片方向のみ通信可能な状態が発生しやすい。AODVでは、RREPの送信に失敗したリンクはBlackListに載せ、一定時間記録する。次回の経路探索以降、BlackListに載っているリンクから受信したRREQは破棄することで、片方向リンクによる経路構築失敗を防止している。しかし、経路上に片方向リンクが存在する場合、一度は必ず経路構築に失敗するため、経路構築に時間がかかるという欠点がある。DSR (Dynamic Source Routing) [RFC4728]は、経路応答メッセージを経路要求メッセージの逆経路で返さず、宛先ノードが経路応答メッセージを載せた経路要求メッセージをブロードキャストすることで、無線リンクで起こりやすい片方向通信状態においても経路が構築できる。しかし、要求メッセージを2回ブロードキャストする必要があるため、経路探索にかかる負荷はAODVよりも高くなる。

また、AODVでは中継ノードは最も早く到着したRREQを転送し、それ以降に重複して受信したRREQは破棄することで多量のRREQがネットワーク内で再転送されるブロードキャストストームを抑制している。にもかかわらず、経路探索が頻発するような通信環境においては、RREQが頻繁にネットワーク内にブロードキャストされるため制御メッセージ負荷が著しく増大する [Ni 99]。LAR (Location Aided Routing) [Ko 98]は、宛先ノードの過去の位置情報と経過時間から宛先ノードの現在の存在範囲を推定し、推定範囲と送信ノードの間に存在する中継ノードのみが経路要求メッセージを転送することで制御負荷を抑えている。しかし、事前に宛先ノードの位置が推定できない場合はAODV等と同様に全ネットワーク内にブロードキャストする必要がある。

AODV、DSR、LARでは、宛先ノードに最も早く到着した経路要求メッセージに沿って経路が構築される。言い換えれば、経路は中継ノードの状態やノード間の通信品質等を考慮せず構築される。また、一旦構築された経路は、ノードの移動などによってトポロジーが変化しても更新されないため、常に経路を最新状態に更新するプロアクティブ型よりも切れやすく、頻繁に修復や再設定が必要となる [Chin 05]。

2.2.3 位置情報利用型経路制御方式

位置情報利用型経路制御方式は、宛先ノードの位置情報に基づき、宛先ノードに最も近い隣接ノードにパケットを転送する方式である。ノードの位置に基づいてパケット転送を行うため、次の3種類の位置情報が必要となる。

1. 自ノードの位置

GPS やジャイロなど自ノードに搭載されたデバイスにより、緯度、経度、高度等の位置情報を取得する。

2. 隣接ノードの位置

自ノードの位置情報を Hello メッセージなどを用いて定期的送信することにより、隣接ノードに対して通知する。

3. 宛先ノードの位置

通信開始時にロケーションサービスに問い合わせるなどして取得する。ロケーションサービスとは、ネットワーク内に存在する任意のノードの位置情報を提供するサービスである。ロケーションサービスのスケーラビリティを高めるため、GRID を使って位置情報を管理する方式 [Stojmenovic 02] やハッシュ値を使って位置情報の管理を分散する方式 [Li 00] などが提案されている。もしくは、全ノードは自身の位置情報を定期的にネットワーク全体にフラディングする [Basagni 98]。

代表的な位置情報利用型プロトコルとしては、GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [Karp 00] や DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility) [Basagni 98] などがある。位置情報利用型プロトコルはロケーションサービスから宛先ノードの位置情報を取得し、宛先ノードにより近い隣接ノードに対してパケットを転送する。転送先ノードの決定方法としては、次のような方法が提案されている。図 2.8 を使い、転送先ノード選択方法の例を示す。

- 宛先ノードに最も距離が近いノード [Takagi 84]

図 2.8 の例では、ノード A を選択する。この選択方式では Hop 数を最小化する

ことを目的としている。

- 宛先ノードに直線的に最も距離が近いノード [Hou 86]

図 2.8 の例では、ノード B を選択する。この選択方式では、パケット転送の空間的距離を最小化することを目的としている。

- 宛先ノードに近く、かつ、転送ノードに最も近いノード [Kranakis 99]

図 2.8 の例では、ノード C を選択する。この選択方式では、各ノードが送信電力を調節できることを前提として、パケット転送における無線干渉を最小化することを目的としている。

- 宛先ノードに近いノードからランダムに選択 [Nelson 84]

図 2.8 の例では、ノード A,B,C,E のいずれかをランダムに選択する。この選択方式では、宛先ノードの位置情報の不正確さに対してパケット到達性を向上することを目的としている。

- 自ノードと宛先ノードの存在推定範囲を結ぶ範囲内に存在するすべての隣接ノード [Basagni 98]

送信ノードは宛先ノードの位置情報とその位置情報を受信した時刻情報から、現在の宛先ノードの存在範囲を推定し、自ノードとその範囲を結ぶ範囲内に存在するすべての隣接ノードにパケットを転送する。図 2.8 の例では、ノード B および E に対してパケットを転送する。

位置情報利用型では、各ノードは隣接ノードの位置情報と宛先ノードの位置情報のみを取得すれば転送できるため、あらかじめ経路を構築する必要が無くネットワークのトポロジー変化に対して強いという長所がある。その反面、End-to-End の最適経路が事前にわからないため、経路が冗長になり、その間にパケットロスする確率が高く、結果的にパケット到達率が低下するという欠点がある。また、宛先ノードの位置情報が不可欠であり、パケット到達率はその正確さに大きく影響される。

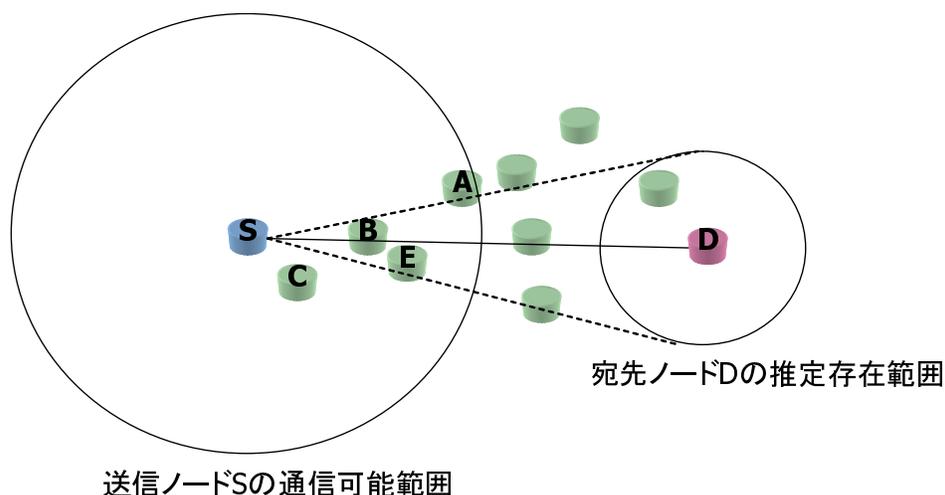


図 2.8: 位置情報利用型における転送先ノードの例

2.2.4 階層型経路制御方式

フラット型経路制御方式は、ネットワーク内の端末数が増加すると制御情報が指数的に増加し、経路制御が困難となる。そのため、100 台を超える大規模な無線マルチホップネットワークでは、経路制御を行うネットワーク範囲を分割して制御する階層型経路制御方式が必要となる。一般的に階層型経路制御方式では、近隣ノードへの経路制御と、遠方ノードへの経路制御を分離する。

階層型経路制御プロトコルとして、ZRP (Zone Routing Protocol) [Haas 01]、HSR (Hierarchical State Routing) [Pei 99]、LANMAR (Landmark Routing) [Gerla 00] 等が提案されている。

ZRP は、プロアクティブ型とリアクティブ型を組み合わせたハイブリッド型経路制御方式である。図 2.9 に、ZRP のネットワーク構成例を示す。各ノードは、自ノードから一定ホップ内に存在するノードで形成される部分ネットワークをゾーンとして扱う。ゾーン内のノードへの通信経路は、プロアクティブ型経路制御方式によって構築する。ゾーン外のノードへの通信経路は、リアクティブ形経路制御方式によって構築する。経路制御の範囲をゾーン内とゾーン外に分離することで、2 階層の経路制御を実

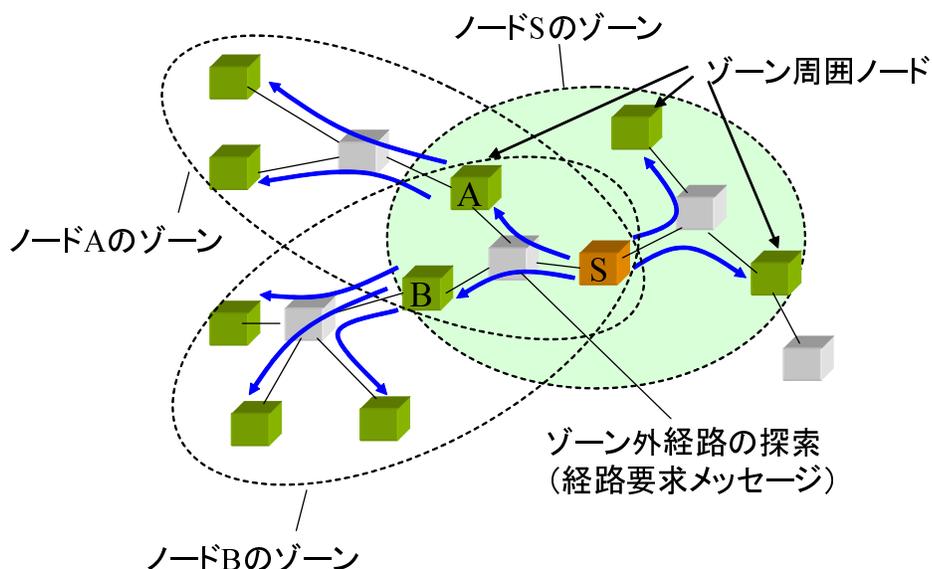


図 2.9: ZRP のネットワーク例

現している. 図の例では、自ノードから 2 ホップ以内をゾーンと規定し、3 ホップ以上先のノードの経路情報は持っていない. 経路情報の無いノードへの通信を開始する場合、ゾーン周囲ノードを介して経路要求メッセージを転送し、経路探索を行う. ゾーン外の通信はリアクティブ型を用いるため、ブロードキャストによる経路探索が必要となる. そのため、ゾーン外経路の構築ではリアクティブ型と同様の短所を持つ.

HSR は、各ノードがノード ID に基づいて自律的にクラスタヘッドを選出し、クラスタを形成する. 図 2.10 に、HSR のネットワーク例を示す. クラスタヘッドとは、クラスタを代表するノードであり、上位階層とのルーティングを行う責任を持つ. クラスタヘッドとなったノードは上位階層のクラスタメンバーとしてさらにクラスタを形成する. 各ノードは、各層のクラスタヘッドの MAC アドレスを連ねた階層化アドレスを持つ. 図中の HID は、ノードの階層化アドレスを示している. ネットワーク内には、階層化アドレスと IP アドレスの対応を管理するホームエージェントが存在する. ノード間の通信に先立ち、送信元ノードはホームエージェントに問い合わせを行い、宛先ノードの階層化アドレスを取得する. パケットは階層化アドレスに埋め込まれたクラ

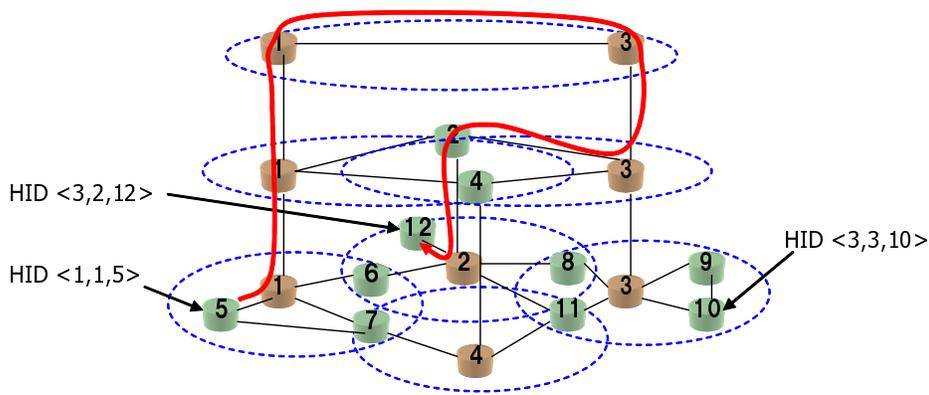


図 2.10: HSR のネットワーク例

スタヘッドに沿って転送される。HSRは、クラスタ階層の構築処理が必要であるため、トポロジーが頻繁に変化する環境には適用が困難である。

LANMARは、通信ノードはグループに属し、同一グループのノードは一緒に移動することを前提とした階層化経路制御方式である。図2.11に、LANMARのネットワーク例を示す。グループ構成およびグループのLandmarkとなるノードは、事前に静的に決定される。また、各グループには、サブネットアドレスが割り当てられる。LANMARでは、グループ内の経路制御にはFSRなどのプロアクティブ型経路制御方式が利用される。グループ内には、Landmarkノードと呼ばれる代表ノードが存在し、Landmarkノードはグループ宛の経路を距離ベクトル型経路制御方式によってグループ外のノードに伝達する。グループの異なるノード間で通信を行う場合、パケットは最初に宛先ノードの属するグループのLandmarkノードに向けて転送される。パケットが宛先ノードの属するグループ内に到達すると、FSRなどで制御された経路に沿って宛先ノードまでダイレクトに転送される。グループでの移動を前提としているため、ノードの移動に制約があり、適用可能なアプリケーションが限定される。

階層型経路制御方式のベースは、フラットなプロアクティブ型またはリアクティブ型の組み合わせであり、基本的に同様の長所、短所を持つ。また、階層的な経路制御を実現するにあたりグループ移動という制約条件や階層構築処理などが存在し、柔軟なトポロジー変化に対応することが難しい方式である。無線マルチホップネットワー

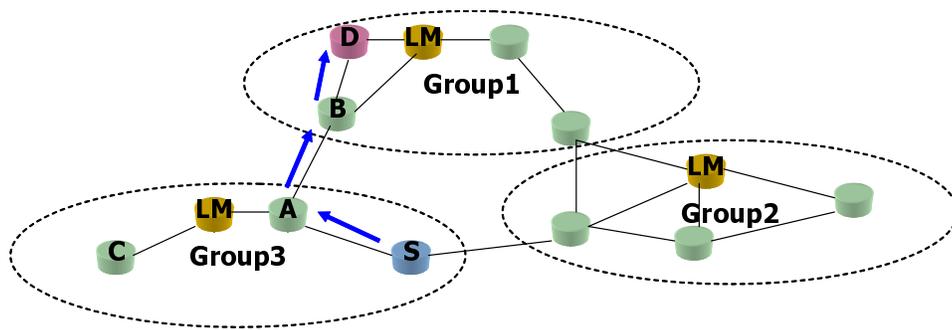


図 2.11: LANMAR のネットワーク例

クの大規模化には、こうした階層的な経路制御方式が必要となる。しかし、本研究では 100 ノード以下の無線マルチホップネットワークを対象とするため、階層型経路制御方式については扱わない。

2.3 有線網におけるマルチパス通信方式

従来、インターネットで使われてきた動的経路制御プロトコルは、障害復旧に数秒～数十秒、最悪の場合数十分という復旧時間がかかる。近年、次のような理由から動的経路制御プロトコルだけでは要求される障害復旧時間を満たすことができなくなった。

- インターネット上での商業活動の増加
- ネットワークの規模増大と構成の複雑化
- IP 電話などリアルタイムアプリケーションの登場

こうした要求を背景に、MPLS(Multi Protocol Label Switching) [RFC3031] を利用した高信頼通信方式が提案された。MPLS は、パケットヘッダにラベルを付け、ラベルに基づいてパケット転送を行う技術である。主に、帯域保証による QoS (Quality of Service) サービスの提供や特定拠点間で仮想専用網を提供する VPN (Virtual Private Network) サービス [RFC4364]、ネットワークに流れるトラフィックを調整する TE (Traffic Engineering) [RFC3272] のために利用されている。MPLS による高信頼通信

の実現を目指し、標準化団体 IETF (Internet Engineering Task Force) では障害回復方式のフレームワークが整理された [RFC3469].

文献 [RFC3469] で示される障害回復方式は、主にリルーティングとプロテクションスイッチングの二つに分類される。次節に、リルーティングとプロテクションスイッチングの概要を説明する。

2.3.1 リルーティングとプロテクションスイッチング

一般に、パス設定等のために制御信号を交換することをシグナリング、信号交換規約のことをシグナリングプロトコルと呼ぶ。また、パスはパケットの送信元から送信先までのパケット転送経路を意味し、ルータやスイッチなどの装置間を接続するリンク(回線)とは区別して呼ぶ。本論文では、通常状態でトラフィックを転送するパスを現用パス、現用パスに障害が発生した場合にトラフィックを転送するパスを予備パスと呼ぶ。

リルーティングとは、障害が発生した事後に、パス全体またはパスの障害発生部分を迂回する予備パスを動的に設定する方式である。プロテクションスイッチングとは、予備パスをあらかじめ設定しておき、障害発生時に現用パスから予備パスへ切り替える方式である。

切り替え時間については、プロテクションスイッチングの方がリルーティングよりも高速である。しかし、あらかじめ予備帯域などのリソースを確保する必要があるため、通常プロテクションスイッチングは仮想専用線サービスなど高い信頼性が求められるサービスにのみ適用される。これに対しリルーティングでは、切り替え時間は遅くなるものの、障害が発生するまで予備パスのリソースを準備しておく必要がなく、リソースの利用効率が高い。そのため、通常リルーティングはベストエフォートのような厳しい信頼性を要求されないトラフィックに適用される。

次節に、プロテクションスイッチングの詳細について説明する。

2.3.2 プロテクションスイッチングの詳細

プロテクションスイッチングとは、予備パスをあらかじめ設定しておき、障害発生時に現用パスから予備パスへ切り替える方式である。大きくローカル回復（障害端切り替え）とグローバル回復（パス端切り替え）に分類される。

ローカル回復

ローカル回復は、現用パス上のノードやリンクの障害に対して、それぞれ予備パスを作成しておき、障害発生時に障害端ノードが現用パスから予備パスへ切り替える方式である（図 2.12）[RFC4090]。

グローバル回復

グローバル回復では、あらかじめディスジョイントなパスを 2 本用意する。パスがディスジョイントであるとは、同じリンクもしくは同じノードを通らないことを意味する。2 本のパスには、通常時に使われる現用パスと、現用パスの障害時に使われる予備パスがある。現用パス上に発生した障害を障害端ノードが検出した後、パスの始点ノードまたは終点ノードに対して障害通知を行い、通知を受けた始点または終点ノードが現用パスから予備パスへ切り替える。グローバル回復において現用パスと予備パスを割り当てる方式として 1+1 と N:M（通常は 1:1）の 2 種類が存在する。

1+1 では、リンクディスジョイント（同じリンクを通らない）またはノードディスジョイント（同じノードを通らない）である 2 本のパスを設定し、両方のパスに同じトラフィックを流す（図 2.13）。どちらのトラフィックを受信するか、つまり、どちらを現用パスにするかは終点ノードで決定し、現用パスに障害が発生した時点で、終点ノードは予備パス（もう一本のパス）からのトラフィック受信に切り替える。1+1 では、現用パスを構成するノードやリンクの多重障害を回復できる。しかし、現用パスと予備パスの双方が同時に障害となる多重障害を救うことはできない。

N:M は、リンクディスジョイントまたはノードディスジョイントな N 本の現用パス

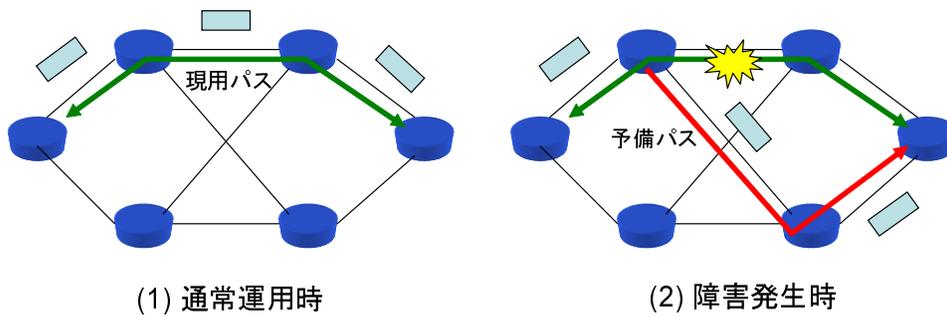


図 2.12: ローカルプロテクション動作例

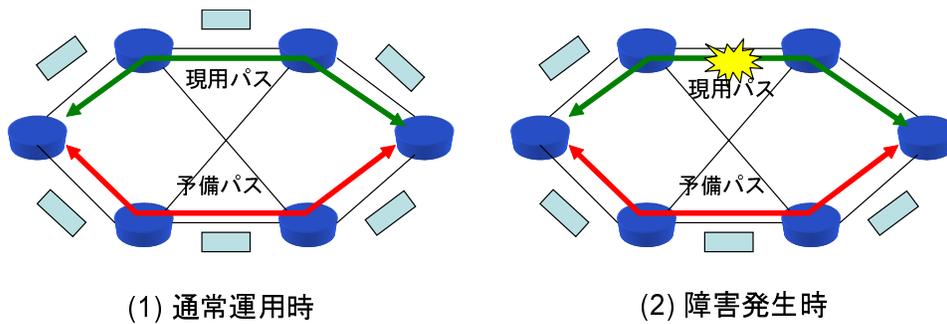


図 2.13: 1+1 の動作例

に対し、M 本の予備パスを用意する (図 2.14)。通常時は現用パスだけにトラフィックを送信し、障害発生時に始点ノードと終点ノードがトラフィックの送受信を予備パスへと切り替える。現用パスが M 本同時に障害となっても回復できる。

2.3.3 各方式の特徴比較

文献 [RFC3469] では、障害回復における基準として以下の項目を挙げている。

- リソースの最適化
- 切り替え時間の短縮
- 予備パスを維持するオーバーヘッドの最小化
- 障害通知や予備パスを設定するシグナリングオーバーヘッドの最小化

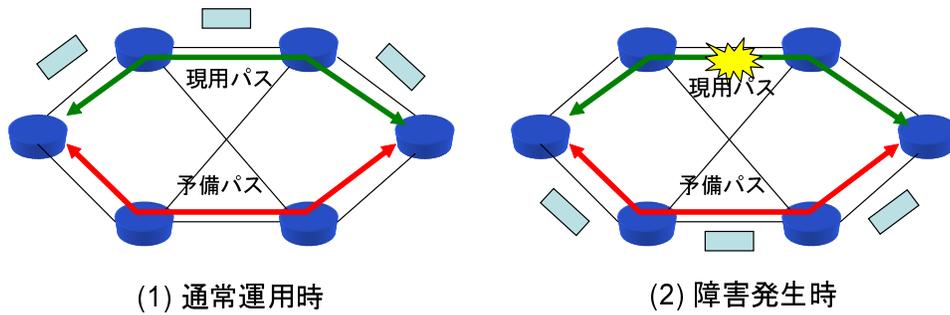


図 2.14: N:M(1 : 1) の動作例

これらの基準ごとに各方式の比較を表 2.3 にまとめる。これらの項目は、基本的にトレードオフの関係にある。例えば、リソース最小化の観点ではリルーティングが最適だが、切り替え時間は他の方式よりも遅くなる。逆にプロテクションスイッチングのローカル回復は切り替え時間こそ速いが、多くの予備パスを必要とするためリソースの利用効率が悪い。障害発生時における動的な予備パス設定（シグナリング）のオーバーヘッドについては、リルーティングは予備パスのシグナリングが必要なため最も大きく、ローカル回復は障害端で予備パスへ切り替えるため、障害通知やシグナリングが不要となり最も低い。同じくグローバル回復では、シグナリングは不要であるがパスの始点ノードまたは終点ノードに対して障害の通知が必要であるため、ローカル回復よりは負荷が高い。

2.3.4 無線マルチホップネットワークにおけるマルチパス通信

上記のとおり、有線網では予備パスを利用したマルチパス通信方式によって、通信の信頼性を高めることができる。無線マルチホップネットワークにおいてもマルチパスで通信することで、経路切断時のパケットロスを軽減する方式は数多く提案されている [Marina 01] [Lee 01-1] [Leung 01] [Raja 99] [Lee 00]。しかし、無線網でマルチパスを用いる場合、無線リンクの不安定さや干渉が問題となり [蓮池 02]、十分な通信品質を得ることは困難である [Wang 04] [Pearlman 00]。

		切替時間	リソース 利用効率	予備パス 維持負荷	予備パス 設定負荷
リルーティング	ローカル	△	○	◎	△
	グローバル	×	◎	◎	×
プロテクション スイッチング	ローカル	◎	×	×	◎
	グロー バル	1+1	○	△	△
		N:M	○	○	△

表 2.3: MPLS 障害回復方式の比較

2.4 本研究の対象領域

図 2.15 に、有線網および無線マルチホップネットワークにおける動的経路制御方式とその高信頼通信方式について、リンク障害、通信劣化、ノード移動などに起因するトポロジー変化頻度と通信品質の関係に着目して整理した。現在または将来想定されるアプリケーションの要求通信品質を考慮した場合、既存方式では実現できない領域が存在する。図 2.15 の丸で示すように、(1) トポロジー変化の無い状況で高い通信品質が要求される領域、(2) トポロジー変化が発生する状況で高い通信品質を要求される領域、(3) トポロジー変化が発生する状況で中程度の通信品質が求められる領域である。

(1) の領域のアプリケーションとしては、固定的な無線通信ノードで構築された防災無線網などが挙げられる。(2) の領域のアプリケーションとしては、災害救助活動における作業員や車両間の通信ネットワーク等がある。(3) の領域では、観光地や博物館、商店街での情報配信などが考えられる。本研究では、無線マルチホップネットワークで特に重要と考えられるこれら 3 つの領域において、通信品質を向上するための方式を提案する。

- (1) 移動の無い無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上

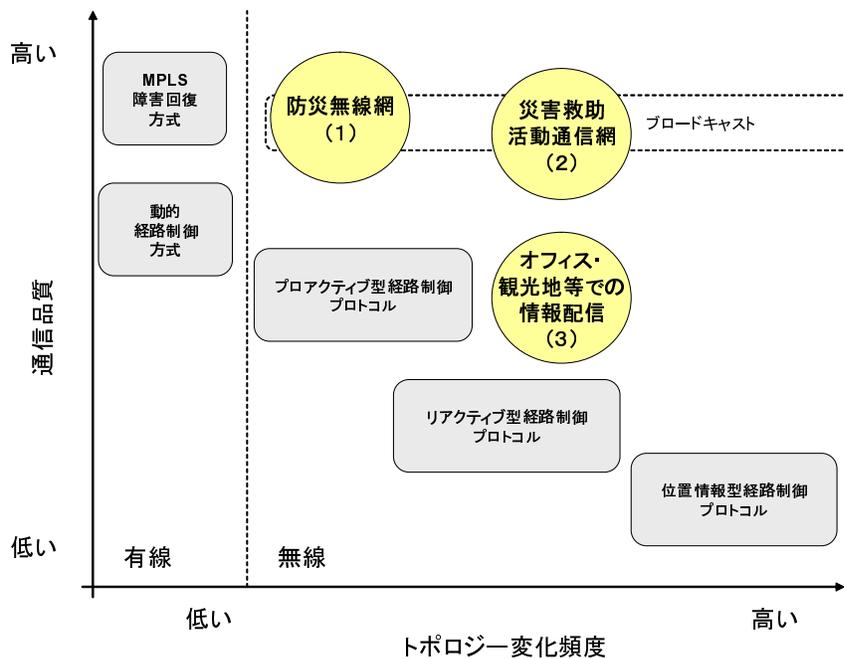


図 2.15: 各方式のトポロジー変化頻度と通信品質の関係

防災無線や電力監視網などに利用される無線マルチホップネットワークでは、高い通信信頼性が要求される。また、通信ノードは通常半固定的に設置される。このような移動の無い網では、最適な経路を計算して保持するプロアクティブ型が適している。さらに通信劣化やリンク障害が多重発生する状況でも高いパケット到達率を維持するためには、MPLS 障害回復方式の 1+1 のようにマルチパスを用いた通信が有効である。しかし、無線特有の無線干渉等によるパケットロスの頻発により、有線網のマルチパス通信方式をそのまま無線マルチホップネットワークに適用することは困難である。

本論文の第 3 章において、無線干渉等のパケットロスによりリンクが不安定な状況下においても End-to-End で高いパケット到達率を実現するマルチパス通信方式を提案する [柳生 06]

- (2) 不均一に移動するノードで構成された無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上

災害救助活動などでは、作業員や自動車、ヘリコプターなど様々なものが通信を行う。これらの通信ノードは、移動しないものから高速に移動するものまで存在し、高速に移動するノードの周辺では局所的なトポロジー変化が頻繁に発生する。緊急性を要する通信が多い災害救助活動では、通信開始に時間を要せずパケット到達率の高いプロアクティブ型経路制御が望ましい。しかし、移動特性にこうした偏りがある場合、従来のプロアクティブ型経路制御ではメッセージ頻度を最も速いノードに合わせる必要があり、多大な制御メッセージ負荷が発生する。

本論文の第4章では、制御負荷の増加を抑制しながら、不均一な移動特性を持つノードで構成された無線マルチホップネットワークの経路制御を実現可能なプロアクティブ型経路制御プロトコルを提案する [Yagyu 07-1] [Yagyu 07-2].

(3) 多様なアプリケーションや利用状況が存在する無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上

オフィスや商店街、観光地、イベント会場などで情報の取得や配信を行うアプリケーションでは、頻度の低い局所的な通信が主流となる。さらに、防災無線や災害救助ほど高い通信品質は必要でない。利用環境は、屋内から屋外まで様々な場所や環境で利用されることが想定され、朝、昼、夜など時間帯によっても通信環境（周囲ノード数、通信トラフィック等）が変化する。例えば、隣接ノードが頻繁に移動する状況や、障害物が多くパケットロスが頻発する場合などが考えられ、さらにそうした状況が時間や利用場所によって変化する。利用するアプリケーションも多様であり、通信要求特性（通信時間、遅延制約、パケットロス許容度、必要帯域等）は各アプリケーションに依存する。たとえば、テキストとビデオでは通信時間や遅延要求、必要帯域などすべての通信特性が異なるため、最適な中継ノードも異なる。中継ノードの選択は、パケット到達率や遅延などに影響し、アプリケーションの性能も左右する。

一時的かつ局所的な通信には、定常的な経路情報交換や位置情報の管理が不要で、送信者が適時経路を探索するリアクティブ型経路制御方式が適している。しかし、従来のリアクティブ型経路制御方式は単一のメトリックでの経路選択しかできな

いため、アプリケーションや周囲環境に応じて最適な経路を選択することができない。ここでメトリックとは、経路を選択するための指標として使われる数値である。通信開始時にアプリケーションや周囲環境に応じた適切な経路を選択するには、適切な経路選択メトリックを状況に応じて使い分ける必要がある。

本論文の第5章では、アプリケーション特性等に応じて経路選択のためのメトリックの重み付けが可能なリアクティブ型経路制御プロトコルを提案する [柳生 07]。

これらの研究課題を解決することで、既存方式では実現が困難なアプリケーションに対して無線マルチホップネットワーク技術を適用することが可能となる。

第3章 移動の無い無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上

3.1 緒言

無線マルチホップネットワークの適用先として防災無線網や電力監視網などがある。こうした用途向けの無線ネットワークには、次のような特徴がある。

- 通信ノードは半固定的に設置されておりトポロジー変化が少ない
- 通信には非常に高い通信信頼性が要求される
- 緊急性が高いため再送が困難である

このような特徴に対しては、特にプロアクティブ型経路制御プロトコルが無線マルチホップネットワークの経路制御に適している。その理由として、以下のようなものが挙げられる。

- 無線のため回線断などが無く災害に強い
- 山間部など回線を敷設しにくい地域でも広いエリアをカバーできる
- 有線網のバックアップとして比較的安価に設置できる
- 常時最適な経路を保持するためパケット到達率が高い
- 通信開始時に経路探索等の処理遅延が無い

しかし、無線マルチホップネットワークでは、障害物や天候による受信電波の不安定さや、無線干渉によるパケットロスにより、既存方式によって実現できるパケット到達率には限界がある。

再送を抑制し高いパケット到達率を実現するためには、2.3 で述べた MPLS 網で利用される 1+1 方式のようなマルチパスを用いた通信が有効である。しかし、単純に無線マルチホップネットワークにマルチパス通信方式を適用しても、3.2 節で後述するように現用パスと予備パスの同時障害や無線干渉により、十分な通信品質を得ることが困難である。本章では、無線干渉等による障害でリンクが不安定な状況下においても End-to-End で高いパケット到達率を実現するための無線マルチホップネットワークに適したマルチパス通信方式を提案する。

3.2 マルチパス通信方式とその適用時の問題

再送を抑制し高いパケット到達率を実現するためには、MPLS 網で利用される 1+1 方式が有効である。1+1 方式は、同じパケットを現用パスと予備パスの異なる経路の 2 本のパスで送信する方式である。通常は受信側で現用パスからのパケットのみを受信する。現用パスに障害が発生した場合、受信側は予備パスからパケットを受信するようパスを切り替える。無線マルチホップネットワークにおけるマルチパス通信方式においても、1+1 方式が適していると考えられる。その理由は、以下の 2 点である。

- パケットをコピーして送信するため、パケットロス率の高いリンクが複数同時に存在してもパケット到達率の低下を防ぐことができる
- 他の方式に比べて切り替え時の動作が簡素であり、低帯域の無線ネットワークにおいて制御メッセージ負荷を低く抑えることができる

しかし、有線網で考案された 1+1 方式を無線マルチホップネットワークにそのまま適用すると、以下の問題が生じる。

(1) パケットロスの頻発

無線リンク¹は通常、有線リンクに比べて帯域が狭い。その上、近隣ノードの通信によって自身の通信も干渉を受けるため、無線マルチホップネットワークでは、1 ホッ

¹ここでの無線リンクのメディアアクセス制御 (MAC) は、802.11 無線 LAN CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 方式 [守倉 05] を想定する

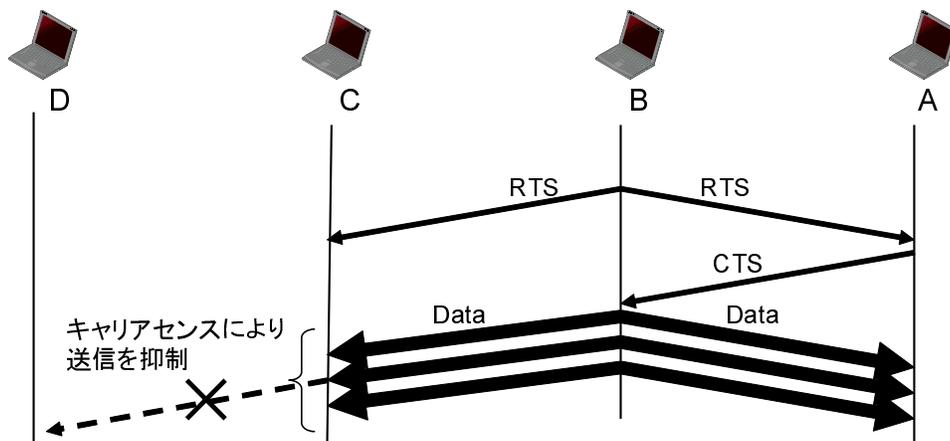


図 3.1: さらし端末問題の例

プの通信に比べて複数ホップの通信はスループットが低下する．図 3.1 に示す例では、端末 B が端末 A にパケットを送信している間は、端末 C は端末 D にパケットを送信しようとしても、端末 B からの電波を受信し、干渉を避けるため送信を抑制する．これを一般にさらし端末問題、端末 C をさらし端末と呼ぶ。

さらに、無線マルチホップネットワークではさらし端末以外にも衝突によるパケットロスが存在する．図 3.2 の例では、端末 D の送信要求 (RTS:Request To Send) に対して端末 C は受信準備完了 (CTS:Clear To Send) を応答する．しかし、それと同時に端末 B が RTS を送信すると、端末 B は端末 C の CTS を受信できず、端末 B と端末 D のデータパケットが衝突する．これを一般に隠れ端末問題、端末 B と端末 D の関係を隠れ端末と呼ぶ [Toh 03]．

これらの理由により、有線網に比べて無線マルチホップネットワークでは、トラフィックが増加するとパケットロスが発生しやすくなる．隠れ端末問題による衝突は端末 B と端末 C が同時に RTS と CTS を送信する時のみ発生するため、さらし端末問題よりも発生する確率は低く、さらし端末問題が特に大きな問題である。

(2) 多重パス障害

有線網のようにリンクの信頼性が高い場合、リソース利用効率の観点から現用パスに対して主に 1 本の予備パスを準備する方式が主流である．

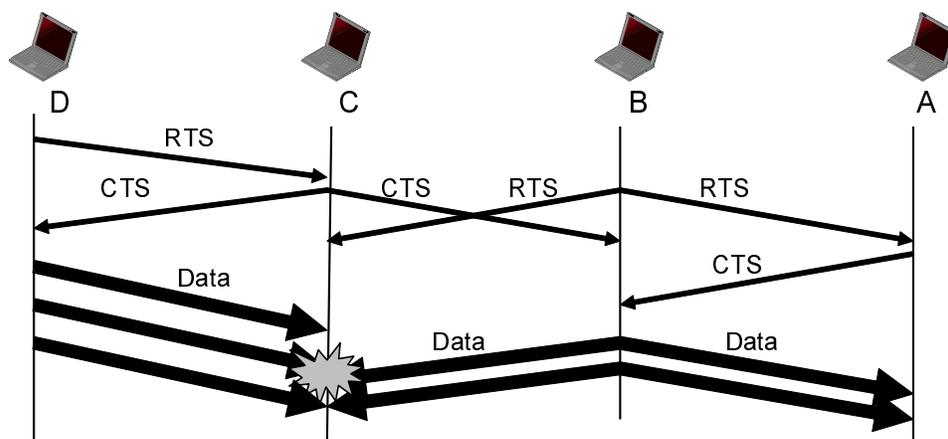


図 3.2: 隠れ端末問題によるパケット衝突例

しかし、無線リンクでは前述のようにパケットロスが起りやすく、現用パスと予備パスで同時にパケットロスが発生する可能性が高い。従来のプロテクションスイッチング方式では、現用パスと予備パスの両方に対して同時に障害が発生する多重障害には対応できない。このような多重パス障害に対応するには、障害の発生状況を考慮しながらリルーティングで予備パスを設定する必要がある。

リルーティングでは、パスを構成するリンク上でパケットロスにより障害が検知されると、そのパスを通信不能と見なしパス回復動作を開始する。パケットロスが頻発するネットワークでリルーティングによるパス回復を行うと、パス設定のための制御メッセージが大量に発生し、ノードや通信帯域の負荷を増加させてしまう。多重ロスや制御メッセージの輻輳により制御メッセージが喪失し、予備パスの設定が失敗する危険性も存在する。従って、通信の安定性や障害回復の信頼性という観点からは、通信中のリルーティングはなるべく行わないようにする必要がある。

(3) マルチパスによる無線干渉の助長

パケットロスが頻発する網においてパケット到達率を高めるためには、同一パケットを異なるパスで複数同時に送信するマルチパス通信方式が有効である。しかし、有線網におけるマルチパス経路方式は無線による干渉を考慮していないため、パケットを冗長化して送信する場合、現用パスの通信により予備パスを構成するノードがさら

し端末となり、無線干渉によるパケットロスを助長する可能性が高くなる。

無線マルチホップネットワークでマルチパス通信により通信品質を向上するためには、上記 (1) ~ (3) の問題を克服しなければならない。

3.3 無線マルチホップネットワーク向けマルチパス通信方式

本節は、3.2 で述べた無線マルチホップネットワークにおけるマルチパス通信方式の制約を克服し、高信頼通信を実現するためのマルチパス通信方式を提案する。

本提案では、従来方式である 1+1 方式を以下の 3 点において改良する。

- 切断許容パスの導入
- リンク瞬断状態の導入
- 相互不干渉冗長経路の計算

以下ではこれらの改良点について説明する。

3.3.1 切断許容パスの導入

前述のように、無線マルチホップネットワークにおいては多重障害の可能性が高いため、マルチパス本数は 2 本よりも多く設定する必要がある。また、制御負荷を軽減し通信品質を安定的に維持するためには、リルーティングはできるだけ避けることが望ましい。そこで、本提案方式では、通信開始時に複数本のパスを設定しておき、切断パスが一定以上になった時にはじめてリルーティングによりパス回復を行うことで、多重障害に対応しながらリルーティングの発生を抑制する方式を導入する。切断しても回復動作を猶予するパスを切断許容パスと呼ぶこととする。

初期設定するパス本数 N_{max} は、最小維持パス本数 N_{min} と切断許容パス本数 N_{buf} の和とする。

$$N_{max} = N_{min} + N_{buf}$$

パスの障害を検知した場合、パス回復制御の負荷を軽減するため、以下の条件を満たす場合はパスの回復動作を抑制する。ここで、 N_{avail} は現時点で通信可能なパスの本数を表す。

$$N_{avail} \geq N_{min} \quad (3.1)$$

これにより、パケットロスにより一時的に障害となるパスの存在を許容し、回復動作を抑制することで障害回復のための制御負荷を軽減する。通信冗長性を継続的に確保するため、3.1の条件を満たさなくなった場合は、リルーティングによるパスの回復動作を開始する。回復動作は $N_{avail} = N_{max}$ になるまで継続される。

3.3.2 リンク瞬断状態の導入

隣接ノードとの間に通信障害が発生した場合、それが無線干渉等に伴う短期的なパケットロスの増加なのか、ハードウェア故障などによる永続的な障害なのかをその時点で区別することは困難である。ハードウェア障害であれば通信維持のためにパスの再設定を行う必要がある。一方、無線干渉が短時間で解消すればパスの再設定を行う必要がないため、制御負荷を減らすことができる。有線網のマルチパス通信方式では、短期的な障害と永続的な障害を区別せず障害検知時に即座にパス切り替えやリルーティングを行う。そのため、短期的障害が頻繁に発生する場合、パス切り替えやリルーティングが頻繁に行われ、制御負荷の増加やパス切り替えによる通信瞬断などの悪影響を及ぼす。そこで、本提案方式では、無線干渉などに伴う短期的なパケットロスの可能性がある間はパス回復動作を抑制し、不必要なパス切り替えを削減する。

図 3.3 で示すように、ノードが管理するリンク状態に瞬断状態を導入し、リンク毎に障害状態を管理する。提案方式では閾値以上のパケットロスが発生すると、障害端ノードがリンク瞬断通知をパスの始点ノードに送信する。一定時間内にパケットロス状

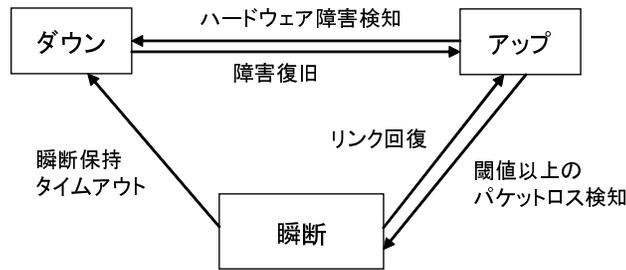


図 3.3: リンク状態遷移図

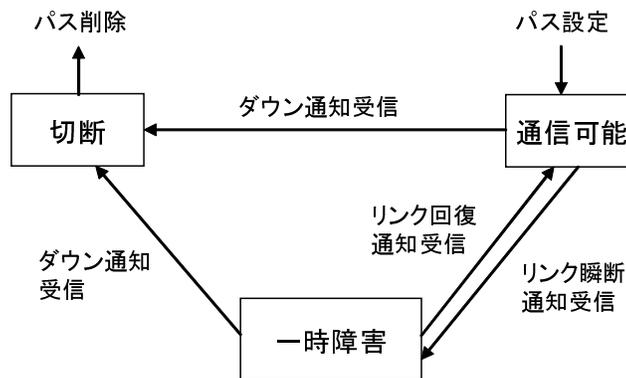


図 3.4: パス状態遷移図

状態改善を障害端ノードが検知すると、始点ノードに対してリンク回復を通知する。一方、パケットロスが一定時間を越えても改善しない場合は、障害端ノードは当該リンクをダウンとして始点ノードに通知する。

リンク瞬断状態の導入に伴い、図 3.4 に示すようにパスの一時障害状態も管理する。図 3.5 に、瞬断状態のリンクを含むパスの例を示す。リンク瞬断を通知された始点ノードは、そのリンクを通るパスを一時障害状態として扱う。リンク回復通知を受信すると、始点ノードはパスを一時障害状態から通信可能状態に遷移する。これにより、切断許容パス本数未満の一時障害であればリンク瞬断が復旧した場合に、パスを再設定することなく通信可能状態へ戻して継続して利用することができる。始点ノードがダウン通知を受信すると、そのリンクを利用するパスをダウン状態に遷移する。ダウン状態に遷移したパスは削除される。

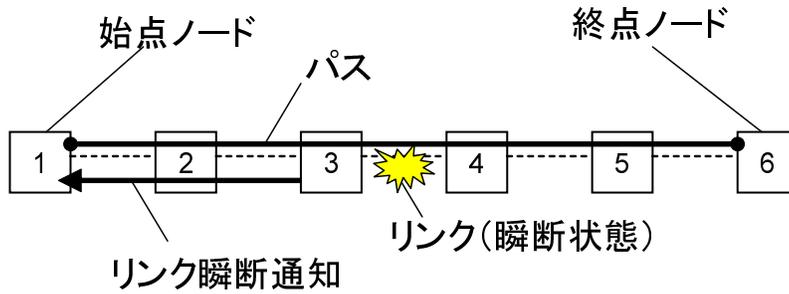


図 3.5: 瞬断リンクを含むパス

3.3.3 相互干渉冗長経路の計算

無線マルチホップネットワークでマルチパスを設定して同時にパケットを送信する場合、マルチパス間で無線干渉が発生する可能性がある。そのため、無線マルチホップネットワークで効率的なマルチパスを設定するには互いに干渉しない経路の計算が必要となる。本提案方式では、ノードおよびリンクに対して干渉コストを課し、コストの低い経路を計算することで干渉の少ない経路を選択する。具体的には、以下のように経路を計算する。

(1) ノードの重み付け

無線リンク上で隣接ノードの多いノードは、自身の通信によって多くのノードに無線干渉を及ぼす。従って、ノードが有する隣接ノード数をそのノードの転送コストと定義し、ノード k の転送コスト C_{node}^k を以下のように計算する。

$$C_{node}^k = w_1 \times N_{ngb}^k$$

w_1 は重み付け定数、 N_{ngb}^k はノード k の隣接ノード数を表す。

図 3.6 の例では、ノード 1 からノード 8 への経路をノードの転送コストのみを用いて計算する場合を考える。図中の四角は通信ノード、点線は無線リンク、ノードの上の数字は $w_1 = 10$ の場合のノード転送コストである。ノード 4、5 には隣接ノードが 4 個存在するため、ノード 2、3、6、7 よりも転送コストが大きい。よって、ノード 1

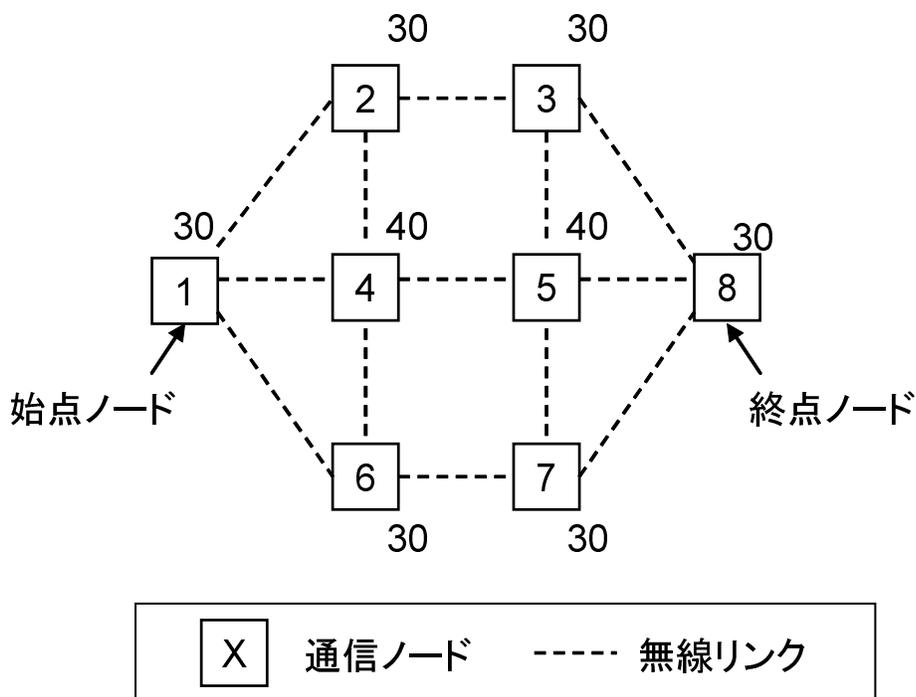


図 3.6: ノード重み付けの例

りコストの低い良い経路として選択される。

(2) 干渉するリンクの排除

パス間の干渉を考慮して経路を計算するため、現用パスから予備パスの順に順次計算を行う。計算済みの現用パスおよび予備パスとなるべく干渉しない経路を計算するため、他の計算済みパスを構成するノードの通信時にさらに端末として干渉される無線リンクを抽出し、それらのリンク転送コストに干渉コストを加算して総転送コストとする。リンクの総転送コストは以下のように計算する。

$$C_{route}^{x,y} = C_{trans}^{x,y} + C_{intf}^{x,y}$$

$C_{route}^{x,y}$ は、隣接するノード x とノード y 間のリンクの総転送コスト、 $C_{trans}^{x,y}$ はリンクの転送コスト、 $C_{intf}^{x,y}$ は干渉コストを表す。

干渉コスト $C_{intf}^{x,y}$ は以下のように計算される。

$$C_{intf}^{x,y} = w_2 \times (N_{hop}^x + N_{hop}^y)$$

w_2 は干渉コストの重み付け定数、 N_{hop}^x はノード x の隣接ノードの中でパスの転送経路として選択されているノード（ただし、始点と終点ノードは除く）数を表す。始点ノードと終点ノードが有する無線リンクについては干渉コストの加算を行わない。

ノード転送コストとリンク総転送コストを用いて最短経路を計算することにより、なるべく互いに干渉しない様選択したノードとリンクから構成された複数の冗長パスを構築できる。

図 3.7 を用いて $N_{max} = 3$ のパス（現用パスと 2 本の予備パス）を計算する場合を考える。始点ノードはノード 3、終点ノードはノード 13 とする。各ノード間の点線は無線リンクを表している。経路計算に先立ち、ノードが有する無線リンク上の隣接ノード数から、ノード k の転送コスト C_{node}^k を計算する。 $w_1 = 10$ とすると、 $C_{node}^i = 20$ ($i = 1, 5, 11, 15$), $C_{node}^j = 30$ ($j = 2, 3, 4, 6, 10, 12, 13, 14$), $C_{node}^k = 40$ ($k = 7, 8, 9$) となる。

各ノードの転送コスト計算の後、現用パスの経路計算を行う。ここでは、各リンクの転送コスト $C_{trans}^{i,j}$ ($1 \leq i, j \leq 15$) = 1 とする。現用パスの経路計算では、リンクの総転送コストはリンクの転送コストに等しい ($C_{route}^{i,j} = C_{trans}^{i,j}$)。そのため、ノード 3 からノード 13 への最短経路は、ノード 3 → 8 → 13 (合計コスト $C_{route}^{3,8} + C_{node}^8 + C_{route}^{8,13} = 42$) となる。

現用パス計算後、現用パスによって発生する干渉コストを経路計算コストに加算する。図 3.7 の場合、ノード 8 が有する無線リンクと、ノード 8 の隣接ノード（ノード 7, 9）が有する全ての無線リンクが対象となる。例えば、 $w_2 = 1000$ とすると、 $C_{intf}^{7,2} = w_2 \times (N_{hop}^7 (= 1) + N_{hop}^2 (= 0)) = 1000$ となる。

次に 1 本目の予備パスの経路計算を行う。ここでは、現用パスが通る無線リンクは除いて経路計算を行う。図中では、現用パスが通る無線リンクの転送コストを ∞ としている。ここでは、ノード 7, 9 を通る経路は干渉コストにより合計コストが高くなる

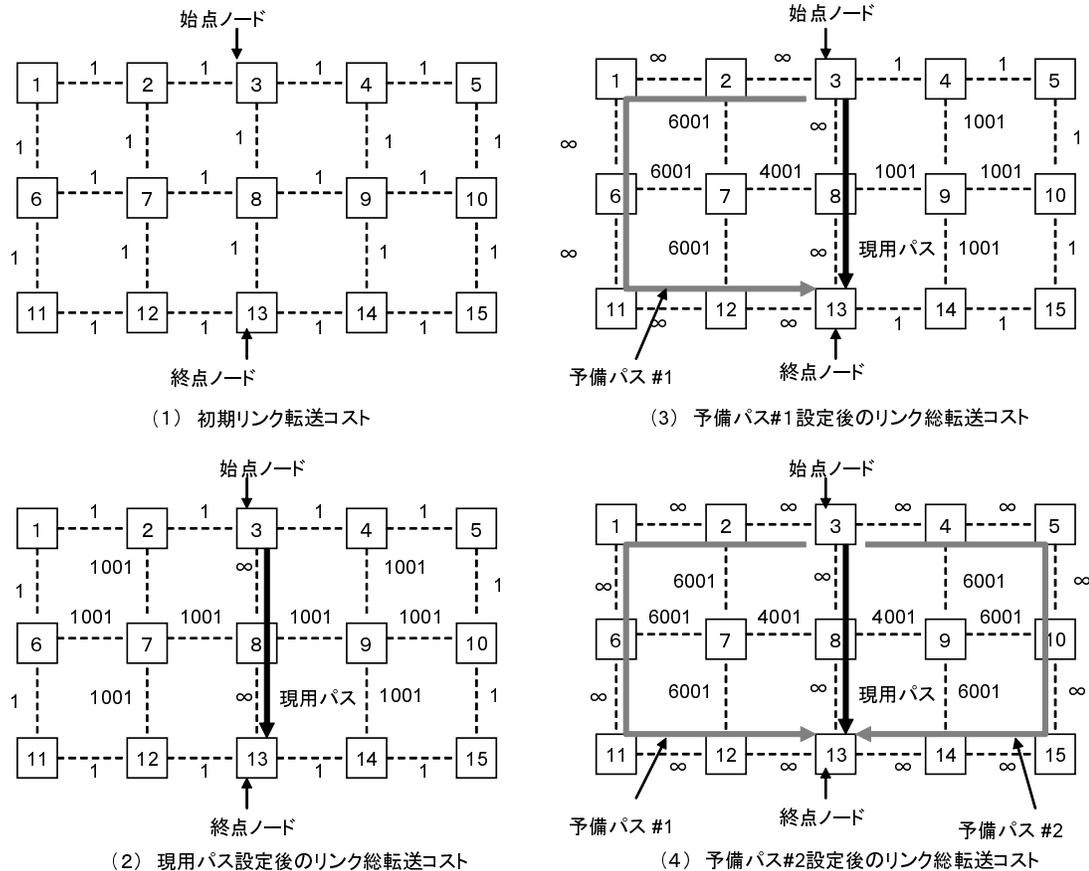


図 3.7: 経路計算の例

ため選択されない。予備パスの経路としては、ノード 3 2 1 6 11 12 13 が選択される。1 本目の予備パス計算後、予備パス上のノード（ノード 1, 2, 6, 11, 12）およびそれらのノードの隣接ノード（ノード 7）が有する無線リンクの経路計算コストは干渉コストを加算して更新される。

2 本目以降の予備パスの経路計算も、1 本目と同様に繰り返す。

3.4 性能評価

本評価は、防災無線網を想定して、シミュレーションによる提案方式の評価を行った。想定環境として、次のような前提を置いた。

- 通信ノードは固定的に設置されている
- 通信ノードは計画的に配置することができる

図 3.8 に評価ネットワークの構成を示す。評価では、格子状に 10×10 のノードを配置し、各ノードは上下左右の 4 ノードと通信可能な構成とした。実線の円は無線で通信できる範囲を表している。防災無線網が利用される市町村は、大きくても 1000 平方 Km 程度である。デジタル防災無線に利用される 260MHz 帯は数 Km 程度は届くため、この規模のネットワークがあれば山間部を含む全ての市町村をカバーすることができる。

シミュレーションで使用したパラメータを表 3.1 に示す。無線リンクの帯域は 128Kbps (現状の防災無線システムの 4 倍程度) とした。図 3.8 の評価ネットワーク上でランダムに選択した 2 ノード間で提案方式及び従来方式による通信を行い、End-to-End でのパケット到達率、リルーティングを行ったパス本数、通信可能なパスが存在しない通信途絶時間を計測した。

シミュレーションでは、評価ネットワーク内の任意の 2 ノード間にバックグラウンドトラフィックがランダムに発生し、さらし端末問題によりパケットロス率の上昇を引き起こす状況を想定した。バックグラウンドトラフィックはマルチパスで送信されず、単一の最短経路に沿って転送される。[総務省 05] によると、通常の携帯電話による通話時間は 30 秒程度が最も多い。さらに、災害時には写真などのデータ転送を通話とともに行うことが多くなると仮定した。写真等のデータサイズを 300Kbyte 程度とすると、16Kbps では 150 秒程度で送信できる。従って、バックグラウンドトラフィックの通信継続時間は平均値を 180 秒とした。バックグラウンドトラフィックの発生間隔はポアソン分布 (平均 5 秒) に従い、通信継続時間は指数分布に従うと仮定した。個々のトラフィックは 16Kbps の一定帯域とした。リンク瞬断状態保持時間は 120 秒とした。

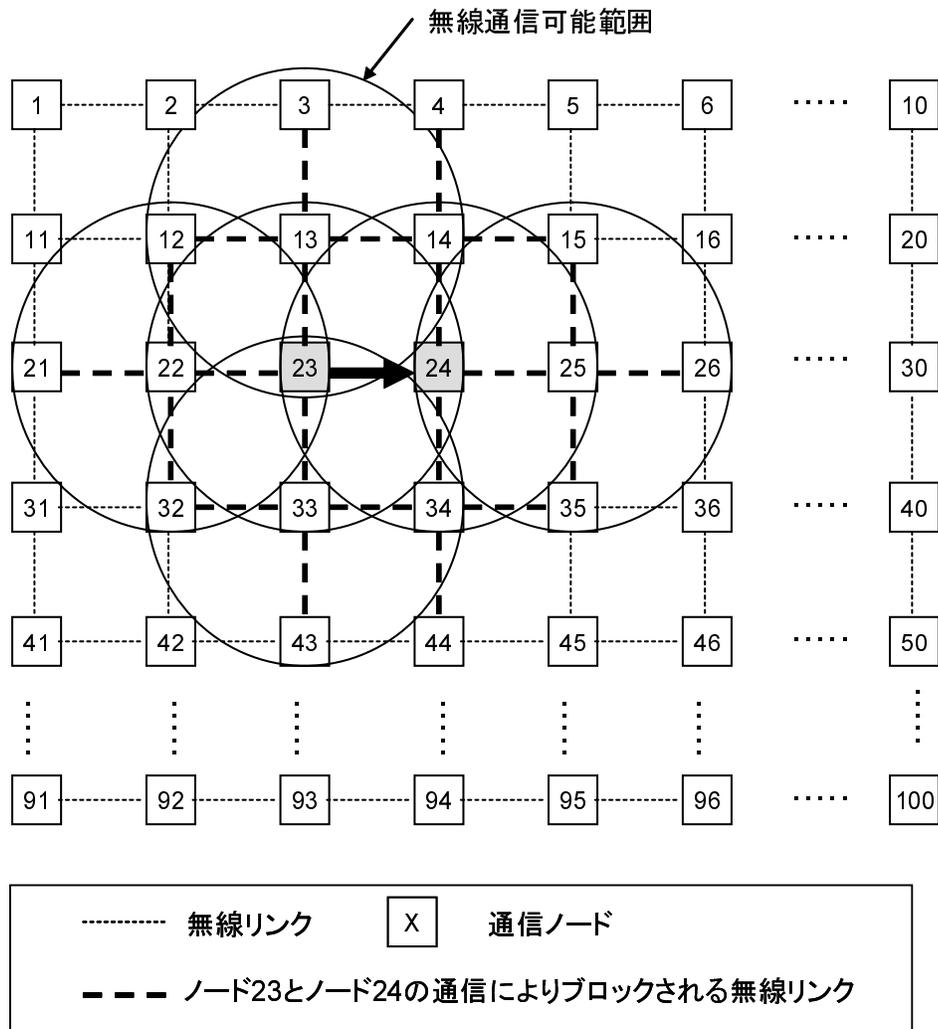


図 3.8: 評価ネットワーク構成

表 3.1: シミュレーションパラメータ

parameter	value
バックグラウンドトラフィックの平均発生間隔	5 秒
バックグラウンドトラフィックの平均継続時間	180 秒
リンク瞬断状態保持時間	120 秒
リンク瞬断のペケットロス閾値	10%
ノード転送コストの重み係数 (w_1)	10
干渉コストの重み係数 (w_2)	1000

3.4.1 パケットロス発生モデル

文献 [Bianchi 00] によれば、通信範囲内に存在する端末数が 5 個の場合、RTS/CTS メカニズムを用いることで端末の送信確率が高くなっても最大スループットはそれほど低下せず、83%程度になる。そこで本評価では、最大スループットは無線リンクの帯域の 80%とし、それ以上の送信ペケットがリンク上に発生した場合は、そのペケットは損失するとした。

また、さらし端末によって送受信ができなくなる無線リンクについて考慮した。図 3.8 のノード 23 から ノード 24 へユニキャストで送信が行われている間は、点線で示される無線リンクで他のノードは通信できない。

隠れ端末については、さらし端末に比べて発生確率が低いため本評価では影響を考慮しないこととした。

また、ペケットロスの別の原因として、降雨や障害物による無線リンクの品質劣化が挙げられる。しかし、降雨や障害物を適切なモデルでシミュレーションすることは困難であるため、本研究では外的要因を除いた提案方式の性能評価を行うこととした。

3.4.2 ディスジョイント経路数の推定

ノード数を 5×5 (総計 25) ~ 15×15 (同 225) まで変化させながら図 3.8 と同じく格子状に配置し、任意の 2 ノード間に存在するノードディスジョイント (始点ノードと終点ノード以外は同じノードを通らない) な経路数の平均値を計算した。ノード数と平均ディスジョイント経路数の関係を図 3.9 に示す。評価ネットワークでは、ディスジョイント経路数が平均で 3 本程度であった。この結果より、本評価では以下の 2 つの方式を比較することとした。

- (1) 提案方式： $N_{max} = 3, N_{buf} = 1$
- (2) 従来方式： 1+1 方式とリルーティング

(1) は最初に 3 本のパスを設定し、2 本 ($N_{buf} + 1$) 以上のパスが一時障害または切断すると N_{max} 本までリルーティングによりパス回復を行う、切断猶予パスを考慮した提案方式である。(2) は、従来の 1+1 とリルーティングを合わせた方式である。従来方式では、最初に設定した 2 本のパス (現用パスおよび予備パス) が両方とも一時障害または切断すると、リルーティングにより新しいパスを設定する。

3.4.3 パケット到達率

従来方式 (1+1) では、現用パス正常時は現用パスからのみパケットを受信し、予備パスから到着したパケットは受信しないため、パケット到達率は現用パス上での到達率に等しくなる。一方、提案方式では、全パスからのパケット受信を前提とする。従って、本評価では比較を公平に行うため、従来方式でも現用パスと予備パスの両方からパケットを受信し、どちらか一方からだけでもパケットが届けばパケットを受信したとする前提でパケット到達率を計算した。

本提案方式における End-to-End でのパケット到達率は、次のように計算した。通信可能なパスが N 本存在し、 k 本目のパス P_k は l_k 本のリンクで構成されているとする。 P_k を構成する m 番目のリンクにおけるパケットロス率を E_m^k とすると、 P_k に対する

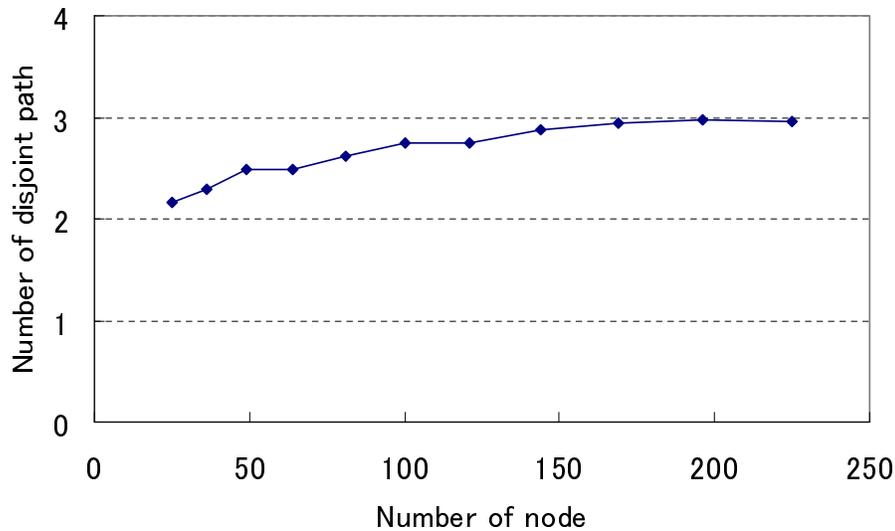


図 3.9: ノード数とディスジョイント経路数の関係

End-to-End のパケット到達率 R_k は、

$$R_k = \prod_{n=1}^{l_k} (1 - E_n^k)$$

となる。よって、N 本の通信可能パスにおける End-to-End でのトータルのパケット到達率 R は、以下の式で表される。

$$R = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - R_n)$$

3.4.4 実験結果と考察

上記の条件において、従来方式と提案方式でマルチパス通信を行う場合のパケット到達率、リルーティング回復パス本数および通信途絶時間をシミュレーションにより比較した。

通信継続時間とパケット到達率との関係を図 3.10 に示す。通信継続時間が 100 秒を超えると、従来方式では通信が途絶してリルーティングが行われ始め、パケット到達

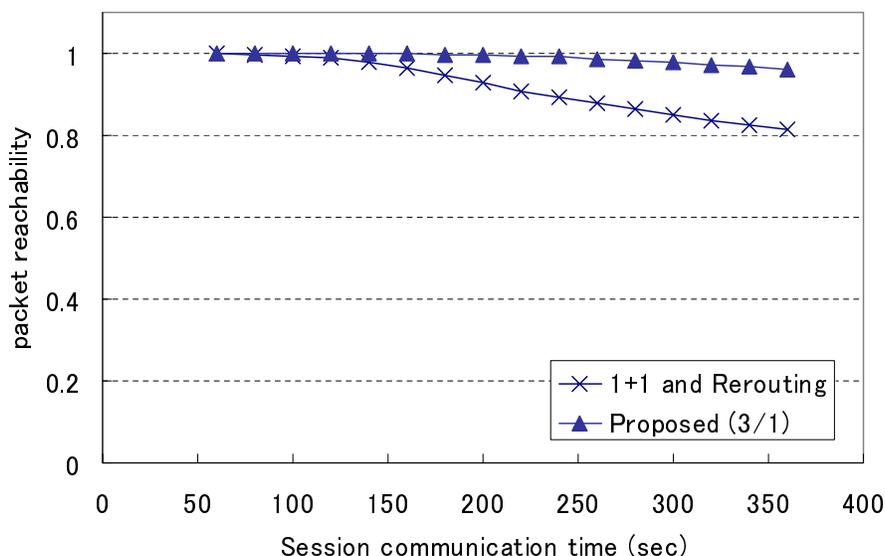


図 3.10: パケット到達率

率が低下する．一方、提案方式では全通信継続時間に渡って、従来方式よりも 15%程度高い 95%以上のパケット到達率が確保できた．

リルーティングによるパス回復も従来方式に比べて 10 分の 1 以下に抑えられている (図 3.11)．通信の途絶時間も、従来方式に比べ 30 分の 1 以下となっている (図 3.12)．これらは、リンク瞬断状態の導入によるパス回復の抑制と、切断猶予パスによる通信継続の効果による．

従来方式では、パスの一時障害を切断とみなして回復動作 (予備パスへの切り替え及びリルーティング) を開始する．これにより長時間通信が継続する場合はリルーティングが頻発し、通信途絶時間の増加とパケット到達率の低下が発生する．本提案方式では、バックグラウンドトラフィックの影響による一時的なパケットロスの増加を、瞬断状態と切断猶予パスで制御することによって、通信を維持しながらパス回復動作を抑制することに成功している．

本評価では、ネットワークポロジやバックグラウンドトラフィック等の条件を固定し、初期設定パス本数や切断許容パス本数、リンク瞬断状態保持時間等のパラメー

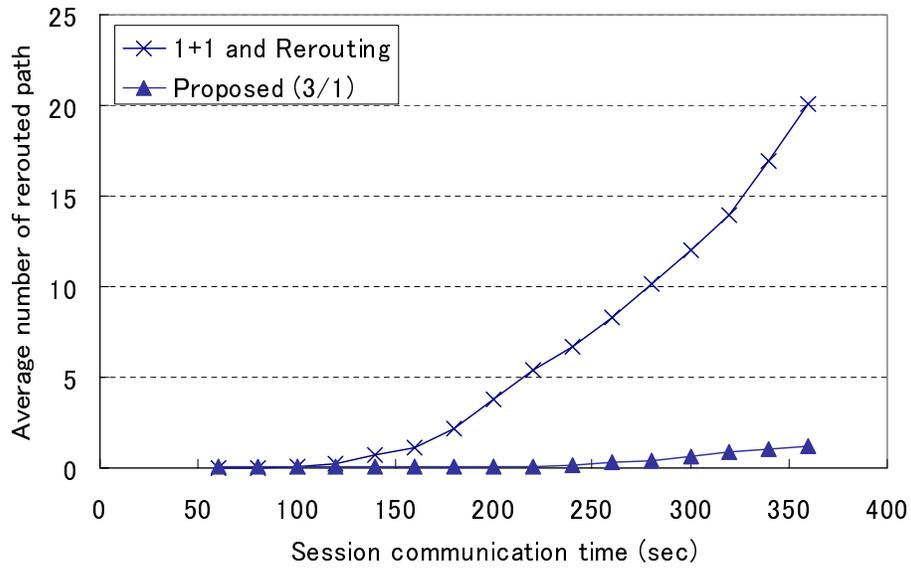


図 3.11: リルーティング回復パス本数

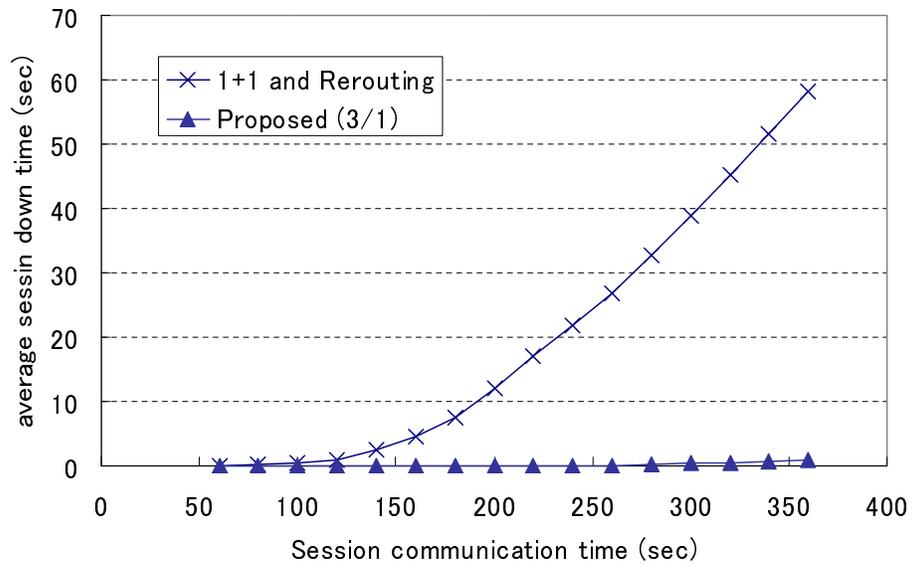


図 3.12: 通信途絶時間

タを実験的に適切な値に設定した。ネットワークポロジはあらかじめ知ることができるが、リンクの通信品質変化状況や発生トラフィックの特性などは時間や状況により変化することが考えられる。従って、実環境に適用する場合、リンクの通信品質変化状況やトラフィック特性等に応じて、初期設定パス本数や切断許容パス本数、リンク瞬断状態保持時間等のパラメータの最適値を決定する方法が必要である。

また、本評価では、ほとんどのノードで3本以上のディスジョイントパスが設定可能な格子状のネットワークにおいて評価を行った。こうした前提は、計画的に通信ノードが設置可能な防災無線などのアプリケーションでは実現可能であると考えられる。しかし、疎なネットワークにおいては、ディスジョイントパスを複数本設定することが困難であり本提案方式は適用できないという制限がある。

3.5 まとめ

本章では、無線マルチホップネットワークに適用可能なマルチパス通信方式を提案した。本提案方式により、無線干渉等によりパケットロスが頻発する無線マルチホップネットワークにおいても End-to-End で高信頼な通信を実現できることをシミュレーションにより確認した。提案方式の特徴は以下の3点である。

- 切断許容パス本数を考慮して初期設定パス本数を決定し、切断許容パス本数以内のパス切断についてはパス回復動作を抑制する。
- リンク瞬断状態の導入により、パケットロスの増加を一定時間許容してパス回復を抑制する。
- 干渉を考慮してマルチパス経路を計算することにより、互いに干渉しにくいマルチパス通信を実現する。

防災無線網を想定した100台の固定無線通信ノードからなるシミュレーションにより、通信継続時間が360秒の場合、次の知見を得られた。

- 提案方式は従来方式と比べ、通信途絶時間を30分の1以下に抑えることができた

- 提案方式は従来方式と比べ、パケット到達率を最大 15%程度向上できた
- 提案方式は従来方式と比べ、パス回復動作を 10 分の 1 以下に抑えることができた

ネットワークポロジやリンクの通信品質変化状況に応じて、初期設定パス本数や切断許容パス本数、リンク瞬断状態保持時間等のパラメータの最適値を決定する方法が必要である。また、パケットロスの原因として降雨や障害物等の外的要因を考慮した場合の提案方式の評価は今後の課題である。

第4章 不均一な移動特性を持つ通信ノード で構成された無線マルチホップネット ワークにおける通信品質の向上

4.1 緒言

大規模災害時においては、既設の携帯電話網などの通信インフラは利用できない可能性がある。その場合、災害救助活動において無線マルチホップネットワーク等を利用して通信手段を確保する必要がある。災害救助活動では、作業員や車両、ヘリコプターなど様々なものが活動に参加し、通信ノードとして互いに通信を行う。緊急性を要する通信が多いため、通信開始に時間を要さずパケット到達率の高いプロアクティブ型経路制御が適している。これらの通信ノードは、移動しないものから高速に移動するものまで様々存在し、高速に移動するノードの周辺では局所的なトポロジー変化が頻繁に発生する。移動特性にこうした偏りがある場合、OLSRなど従来のプロアクティブ型経路制御プロトコルでは制御メッセージ送信頻度を最も速いノードに合わせる必要があり、高い制御メッセージ負荷が発生する。制御メッセージの増大は、パケットの衝突やキュー長の増加を引き起こし、結果的にパケット到達率や遅延を悪化させる。これに対して、プロアクティブ型経路制御プロトコルの改良も提案されているが上記の状況では十分な通信品質が得られない(4.4 参照)。

本章では、制御負荷の増加を抑制しながら、不均一な移動特性を持つノードで構成された無線マルチホップネットワークで高い通信品質を実現可能なプロアクティブ型経路制御プロトコルを提案する。

4.2 不均一な移動特性を持つノードで構成されたネットワーク における経路制御の問題点

2.2.1で説明した OLSR は、均一な移動特性を持つ通信ノードで構成された無線マルチホップネットワークでは効率的に動作する。しかし、不均一な移動特性を持つノードで構成された網では改善の余地がある。具体的には、OLSR は経路制御メッセージの送信インターバルが固定であるため、ノードの移動速度などが異なる場合、最も速いノードにインターバルをあわせて短くする必要があり、経路制御メッセージの量が增大するため、高い制御負荷が発生する。こうした制御負荷は、データパケットの到達率や遅延を悪化させる。この制御負荷と移動への追従のトレードオフは、経路制御プロトコルの本質的な問題であり、通信品質を劣化させる主要な原因である。

トポロジー変化にすばやく追従し、通信品質を向上する方法としては (1) 経路が切れる前に劣化した経路からより良い経路へと切り替える方法と、(2) リンクの確立や切断を早く検知し、タイムリーに広告する方法の 2 種類がある。

(1) に関しては、現在の携帯電話網や無線 LAN アクセスポイントにおいて信号強度やビットエラーレートなどの物理レイヤー特性に基づいたソフトハンドオーバー技術が存在する [Pahlavan 00]。しかし、基地局やアクセスポイントなど集中管理的な機能を持った制御ノードが必要であり、こうしたノードを持たない自律分散型の無線マルチホップ環境では、既存のソフトハンドオーバー技術をそのまま適用することは困難である。

(2) に関しては、Benzaid らが Fast-OLSR [Benzaid 02] [Benzaid 03] と呼ばれる OLSR の拡張方式を提案している。Fast-OLSR では、移動ノードとの間のリンク変化をすばやく検知するため、閾値以上の速度で移動しているノード（以下、移動ノード）は、Fast-Hello と呼ばれるメッセージを通常の Hello よりも短いインターバルで送信する。移動ノードの Fast-Hello メッセージには MPR 情報のみが含まれ、移動ノードから MPR に選ばれた隣接ノード及び初めて Fast-Hello を受信した隣接ノードは空の Fast-Hello メッセージを応答する。移動ノードは、Fast-Hello を応答した最初の N 台

の隣接ノードを MPR として登録する。制御メッセージ負荷を減らすため、Fast-OLSR の移動ノードは Fast-Hello に含める MPR 数を少なく限定している。Fast-OLSR における移動ノードの MPR 選択方法は、2 ホップ先ノードを考慮していないため、不十分もしくは冗長な MPR を選択する。その結果、リンク情報の不一致による不正確な経路計算によりパケットロスが発生する可能性が高い。また、移動ノードの隣接ノードは、リンク変化を検知すると即座に TC メッセージをネットワーク全体に広告する。そのため、大量の TC メッセージが転送され、制御メッセージ負荷が増大する。

図 4.1 を用いて Fast-OLSR の動作例を説明する。

- 時刻 t_0 においてノード A は移動を始め、Fast-Hello の送信を開始する。
- ノード A は移動前からノード B を MPR として選択しているため、Fast-Hello にはノード B が MPR として入っている。
- ノード A から Fast-Hello を受信したノード B は Fast-Hello を応答する。
- ノード B から Fast-Hello を受信したノード A は、ノード B を MPR として選択する。
- ノード A はさらに移動を継続し、時刻 t_1 においてノード C もノード A から Fast-Hello を受信する。
- ノード C は Fast-Hello を応答する。
- ノード A はノード C も MPR として選択する。
- ノード A が次の Fast-Hello を送信すると、ノード C はノード A と双方向隣接ノード (SYM) となり、ローカルリンクを確立する。
- ノード A とローカルリンクを確立したノード C は、そのリンク情報を TC メッセージにより広告する。
- ノード A がさらに移動を継続し、時刻 t_2 においてノード B と通信できない距離まで離れると、ノード B からの Fast-Hello の応答を受信できなくなる。

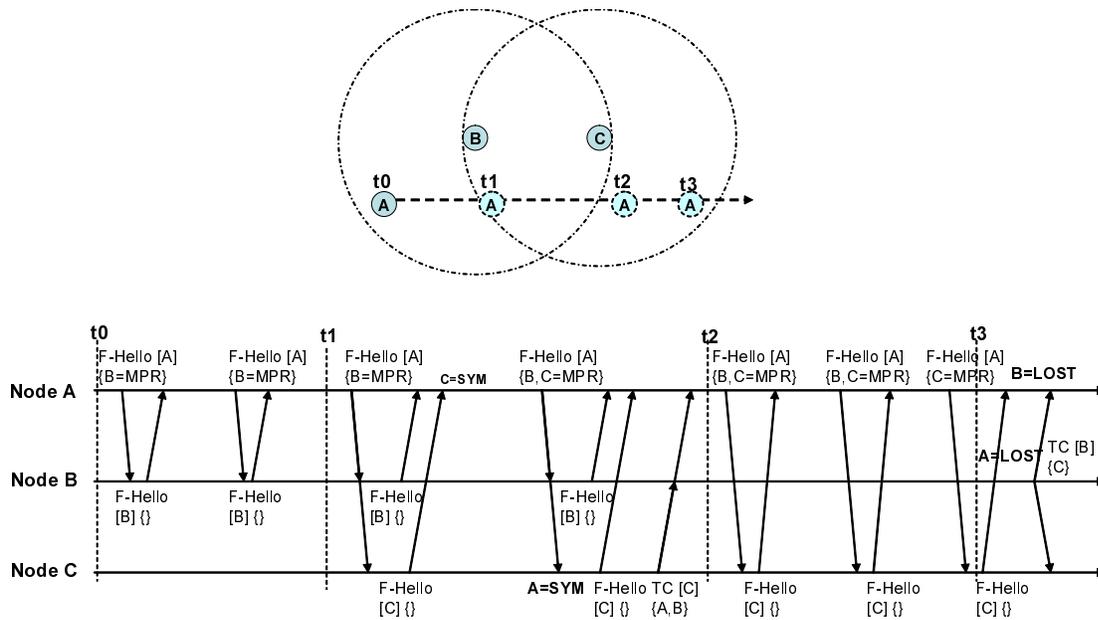


図 4.1: Fast-OLSR のメッセージシーケンス例

- ノード B はノード A の Fast-Hello を受信できなくなるため、時刻 t3 で Fast-Hello の有効期間のタイムアウトによりノード A とのローカルリンクの切断を検知する。
- ノード A とのリンク切断 (LOST) を検知したノード B は、TC メッセージによりリンク切断を広告する。

Fast-OLSR では、ノード B とノード C はノード A からの Fast-Hello を受信するたびに Fast-Hello を応答する。つまり、移動ノードとその隣接ノードは双方向で Fast-Hello メッセージを交換する。そのため、Fast-OLSR では MPR の数に比例して高い Fast-Hello メッセージの負荷が発生する。文献 [Benzaid 02] では、シンプルな移動パターンにおいて Fast-OLSR が効果的に経路制御を行うことが報告されている。しかし、Fast-OLSR はシンプルな移動パターンを想定しているため、後述する災害救助活動などの複雑な移動パターンを持つネットワークに適用することはできない。

4.3 SMART(Scalable Mobility Adaptive Routing Techniques) の提案

本節では、4.2節の課題を解決するため、SMART(Scalable Mobility Adaptive Routing Techniques) を提案する。SMART は、不均一な移動パターンを持つノードで構成された無線マルチホップネットワークで通信品質を向上するための従来の OLSR を拡張したプロアクティブ型経路制御プロトコルである。

次節のシミュレーション結果で示すように、従来の OLSR や Fast-OLSR では十分な通信品質、つまりパケット到達率と遅延、を得ることができなかった。その理由は、次のようなものであった。

- 隣接ノードとのリンクの確立や切断検知の遅さ
- リンク切断が発生した後の経路切り替えの遅さ
- 制御メッセージ負荷によるパケット衝突、干渉の頻発

SMART では、パケット衝突や干渉を防ぐため制御負荷を低く抑えながら素早くリンクの確立・切断を検知する片方向移動通知機能と、リンク切断前に経路を切り替えるためリンク品質に基づく経路計算機能を導入する。以下に、SMART で拡張した片方向移動通知機能とリンク品質に基づく経路計算機能の詳細について説明する。

4.3.1 SMART の動作

SMART では、MN(Movement Notification)、MR(Movement Notification Reply)、TU(Topology Update) の 3 つの新たなメッセージを導入している。表 4.1 に、SMART で利用する制御メッセージをまとめる。移動ノードは、閾値速度を超えて移動すると、自身の移動を隣接ノードに通知するため自 ID を含めた MN メッセージを送信する。その MN メッセージを受信することで、隣接ノードは移動ノードとの新たなリンク接続を検知することができる。また、MN メッセージのタイムアウトにより移動ノードと

のリンク切断を検知することができる。MN メッセージには、移動ノードが MR メッセージを受信した隣接ノードの ID も含まれている。MR メッセージは、隣接ノードが MN メッセージに回答して移動ノードとリンクを確立するために隣接ノードによって送信される。MR メッセージは、リンクを確立しようとしている移動ノードの ID を含んでいる。TU メッセージは、移動ノードの移動により生じたリンク状態やリンク品質の変化を広告するためのメッセージである。TU メッセージは、ノード ID とリンク状態 (SYMMETRIC または LOST) および次節で述べるリンク品質から成るリンク情報を含んでいる。SMART は、TU メッセージによってトポロジー情報の差分更新機能を実現している。さらに、既存の TC メッセージもリンク状態とリンク品質を広告できるよう拡張されている。

図 4.2 を用いて、SAMRT の動作例を説明する。ただし、ここでは説明を簡単にするためリンク品質については省略する。

- 移動ノード A とノード B は、ノード A が移動開始する前にすでにローカルリンクを確立している。
- ノード C とノード A はローカルリンクを確立していない。
- 時刻 t_0 にノード A が移動を開始し、それに伴い MN メッセージの送信を開始する。
- ノード B は、すでにノード A とローカルリンクを確立しているため、ノード A から MN メッセージを受信しても応答しない。
- 時刻 t_1 においてノード C が MN メッセージを受信すると、ノード C はノード A とローカルリンクを確立するために MR メッセージを応答する。
- ノード A はノード C から MR を受信することでノード C とローカルリンク確立を完了し、TU メッセージを送信してそのリンク情報を広告する。
- ノード C は、次に自身のノード ID が入った MN メッセージをノード A から受

表 4.1: SMART における制御メッセージ

<i>Type</i>	<i>Description</i>
Hello	Hello はもともとの OLSR が持つ、隣接ノードとリンク確立を行うための制御メッセージである。SMART では、リンク品質情報とノードの位置情報を交換するために拡張している。
TC	TC は、もともとの OLSR が持つ、定期的にリンク情報をネットワーク全体に広告するための制御メッセージである。SMART では、リンク品質情報を広告するよう拡張している。
MN	MN は SMART で新たに導入された制御メッセージである。移動ノードとのリンク接続維持のために使用される。移動ノードがリンクを確立しようとする隣接ノードの ID と移動ノードの位置情報を含んでいる。
MR	MR は SMART で新たに導入された制御メッセージである。隣接ノードが移動ノードに対して応答を返すために使用される。隣接ノードがリンクを確立しようとする移動ノードの ID を含む。
TU	TU は SMART で新たに導入された制御メッセージである。移動ノードとのリンクの状態や品質の変化をネットワーク全体に広告するために使用される。ノード ID、リンク状態、リンク品質を含む。

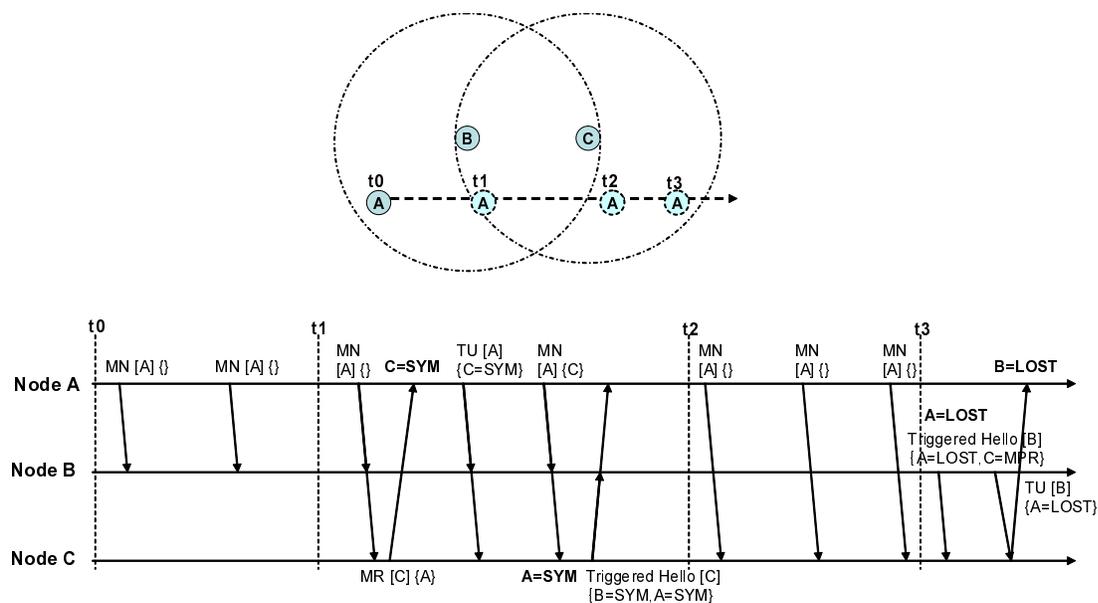


図 4.2: SMART のメッセージシーケンス例

信すると、ノード A とローカルリンクを確立し、Triggered Hello (後述) を送信する。

- 時刻 t_2 においてノード B はノード A から MN メッセージを受信できなくなる。
- その結果、ノード B は時刻 t_3 で MN メッセージのタイムアウトによりノード A とのリンク切断を検知する。
- ノード B は、ノード A とのリンク切断を TU メッセージによって広告する。
- ノード A が、ノード C を介してノード B が作成した TU メッセージを受信することで、ノード B とのリンクが切断したことを検知する。

図 4.1 と図 4.2 を比較すると、SMART では移動ノード (ノード A) の MN メッセージに対して隣接ノード (ノード B およびノード C) から毎回応答が無いことでメッセージ数が減っていることがわかる。

4.3.2 片方向移動通知

不均一な移動ノードで構成されたネットワークでは、移動ノードが短いインターバルでメッセージを送信することでリンク状態の変化を検知する方法が有効である。Fast-OLSR では、Fast-Hello メッセージによって高速なリンク状態の変化検知を実現している。さらに Fast-OLSR では、リンク状態が変化すると即座に TC メッセージによってトポロジー変化をネットワーク全体に広告して、全ノードに経路の再計算を促す。しかし、4.4 で後述するように、Fast-OLSR では不均一な移動ノードで構成されたネットワークにおいて、十分な通信品質を実現することができない。その理由のひとつは、制御メッセージ負荷の高さである。Fast-OLSR では、双方向での Fast-Hello メッセージ交換負荷を減らすため、隣接ノード情報を省略している。そのため、移動ノードは適切な MPR を選択することができず、TC メッセージの転送に余計な負荷が発生する。最悪の場合、一部のノードに TC メッセージが届かず経路ループが発生することもあり得る。

SMART は、移動ノードのみが経路制御メッセージを送信する片方向移動通知機能を導入することで、Fast-OLSR における双方向での移動通知による制御負荷の欠点を克服する。片方向移動通知は、次の 3 つの機能から構成される。

- 双方向のメッセージ交換を回避するための間接的なリンク切断検知機能の導入
- 効率的なトポロジー変更通知を実現する TU メッセージの導入
- TU メッセージの広告に最適な MPR の選択を維持するため Triggered Hello の導入

以下に各機能の詳細を説明する。

間接的なリンク切断検知

SMART では、Fast-OLSR の様な移動ノードとその隣接ノード間の双方向メッセージ交換を回避するため、間接的なリンク切断検知機能を導入している。ノードが閾値以

上の速度で移動を開始すると、そのノードは短い間隔で MN メッセージの送信を開始する。MN と MR メッセージは、移動ノードとその隣接ノード間でリンクを確立するために使用される。移動ノードとリンクを確立していない隣接ノードのみが、MR メッセージによって移動ノードの MN メッセージに応答する。すべての隣接ノードが移動ノードとリンクを持っている場合は、隣接ノードは何も応答しないため、移動ノードは隣接ノードから常時メッセージを受信することはない。隣接ノードはリンク確立時に一度だけ MR メッセージの送信を行う。

上記の隣接ノードの応答を抑制する方式には、移動ノードが隣接ノードとのリンク切断を検知できなくなるという欠点がある。この欠点を補うため、SMART では TU メッセージを利用する (TU メッセージの詳細は次節で説明する)。隣接ノードが MN メッセージのタイムアウトにより移動ノードとのリンク切断を検知すると、隣接ノードはリンク切断を広告するために TU メッセージを送信する。移動ノードが他のノードを介して転送されてきた TU メッセージを受信すると、移動ノードはその隣接ノードとのリンク切断を認識する。

図 4.2 の例では、時刻 t_3 においてノード B が MN メッセージのタイムアウトにより移動ノード A とのリンク切断を検知した後、ノード B は TU メッセージを作成して送信する。ノード B が作成した TU メッセージはノード A には直接届かないが、ノード C が転送することでノード A も受信することができる。ノード A は、自身の隣接ノードであるノード B からリンク切断情報が入った TU メッセージを受信することで、ノード B と通信できなくなったことを知ることができる。

TU メッセージによるトポロジー変更通知

Fast-OLSR では、リンク状態の変化に対して常に TC メッセージを広告する。TC メッセージは、全リンク情報が含まれているためメッセージサイズが大きく、ネットワーク全体に広告する負荷が高い。SMART ではトポロジーの変更通知の負荷を削減するため、トポロジーの差分情報のみを含む TU メッセージを、以下のいずれかの条

件でのみ作成する。

1. 移動ノードが隣接ノードと新たなリンクを確立した場合
2. 隣接ノードが MN メッセージのタイムアウトによって移動ノードとのリンク切断を検知した場合
3. 隣接ノードが移動ノードとのリンク品質変化を検知した場合¹.

TU メッセージは、TC メッセージと同様に MPR ノードを介してネットワーク全体に広告される。また、TU メッセージは差分情報のみを含むため、全リンク情報を含む TC メッセージに比べメッセージサイズを削減できる。

図 4.2 の例では、時刻 t1 の後に移動ノード A がノード C とリンクを確立したことで条件 1. により、新たなリンクを広告するため TU メッセージを作成している。また、時刻 t3 の後、ノード B がノード A とのリンク切断を検知したことで条件 3. により、リンクの切断を広告するため TU メッセージを作成している。

Triggered Hello

MPR を適切に選択し、TU メッセージを確実に転送するために、以下のいずれかの条件において Triggered Hello を送信する。

1. 移動ノードが MR メッセージを受信して新たなリンクを確立し、かつ、MPR の変更が生じた場合
2. 隣接ノードが MN メッセージを受信して新たなリンクを確立した場合
3. 隣接ノードが MN メッセージのタイムアウトによりリンク切断を検知し、かつ、MPR の変化が生じた場合

この Triggered Hello は、Fast-Hello と異なり全隣接ノード情報を含んでいる。そのため、移動ノード及び隣接ノードは適切な MPR を選択することができ、SMART では

¹リンク品質については次節で詳細を述べる

Fast-OLSRにおけるTCメッセージの様に冗長もしくは不完全にTUメッセージが転送されることがない。

図4.2の例では、時刻 t_1 の後にノードCが移動ノードAとリンク確立したことで、条件2.によりTriggered Helloを送信している。このTriggered Helloにより、時刻 t_3 の後ノードBがノードAとのリンク切断を検知したときに、ノードAはノードBの2ホップ先ノードとして認識され、ノードCがMPRに選択されることになる。時刻 t_3 の後ノードBが移動ノードAとのリンク切断を検知し、それによってノードCが新たにノードBのMPRに選択されるため、条件3.によりTriggered Helloを送信している。

4.3.3 リンク品質に基づく経路計算

もしノードがリンク状態の変化検知をHelloやMNメッセージのタイムアウトだけに頼るならば、経路が切断してから新たな経路に切り替えるまでの間パケットロスと遅延が発生する。こうした経路切替中のパケットロスと遅延を防ぐため、ノードは現在利用中の経路に障害が発生する前に、より良い経路に切り替える必要がある。SMARTではリンク品質情報を導入することで、起こりうる障害の前に経路切り替えを実現する。SMARTでは、3種類のリンク品質、*Fine*(良好)、*Degraded*(品質低下) および *Lost*(切断)を用いる。リンク品質は、HelloおよびMNメッセージ受信時のノード間の距離によって決定される。MNおよびHelloメッセージは、GPSなどのデバイスによって取得した位置情報を含んでいる。さらに、SMARTのHelloメッセージは隣接ノード毎のリンク受信品質を含んでいる。リンク受信品質は、以下のように決定する。

$$q_{Rx} = \begin{cases} \text{Degraded} & (d_{t1} < d) \\ \text{Degraded} & (d_{t2} < d \leq d_{t1} \wedge \\ & \text{current quality} = \text{Degraded}) \\ \text{Fine} & (d_{t2} < d \leq d_{t1} \wedge \\ & \text{current quality} \neq \text{Degraded}) \\ \text{Fine} & (d \leq d_{t2}) \end{cases}$$

q_{Rx} はリンク受信品質、 d は Hello および MN メッセージの位置情報から計算されたノード間の距離である。リンク品質状態の振動を防ぐため、2つの閾値を導入する。 d_{t1} は、品質劣化を決定する距離の閾値である。 d_{t2} は、品質回復の閾値である。距離情報の代わりに、受信電波強度を用いてリンク受信品質を決定することも可能である。多数の障害物が存在する環境では、電波強度や S/N 比等を用いるほうが実用的であるかもしれない。本研究では、シミュレーション評価の都合上、距離によりリンク品質を決定した。

リンク送信品質もリンク受信品質と同様、MN および Hello メッセージに含まれる位置情報から計算する。ノードが MN メッセージを受信した場合、リンク送信品質は以下のように決定する。

$$q_{Tx} = \begin{cases} \text{Lost} & (d_{max} < d) \\ \text{Degraded} & (d_{t1} < d \leq d_{max}) \\ \text{Degraded} & (d_{t2} < d \leq d_{t1} \wedge \\ & \text{current quality} = \text{Degraded}) \\ \text{Fine} & (d_{t2} < d \leq d_{t1} \wedge \\ & \text{current quality} \neq \text{Degraded}) \\ \text{Fine} & (d \leq d_{t2}) \end{cases}$$

q_{Tx} はリンク送信品質、 d_{max} は電波送信範囲の最大距離である。ノードが Hello メッセージを受信した場合、そこに含まれる自身のリンク受信品質情報を自身からその隣接ノードへのリンク送信品質として取得する。経路計算で使用する総合的なリンク品

表 4.2: リンク品質の決定方法

q_{Rx} / q_{Tx}	<i>Fine</i>	<i>Degraded</i>	<i>Lost</i>
<i>Fine</i>	Fine	Degraded	Lost
<i>Degraded</i>	Degraded	Degraded	Lost

質情報は、リンク受信品質とリンク送信品質から、表 4.2 にしたがって決定する。

移動ノードの隣接ノードは、ランダムに遅延を入れて TU メッセージを送信することでリンク品質の変化を広告する。ランダムな遅延は制御メッセージの衝突を緩和するためのものである。TU メッセージを受信することで、他のノードは経路計算を開始する。経路計算は次のシーケンスで行う。

1. 最初に、*Fine* リンクのみを使って最短経路を計算する。
2. もし *Fine* リンクのみで到達不能なノードがある場合は、利用可能なすべてのリンクを使って計算を行う。

図 4.3 を用いて、リンク品質に基づく経路切り替えの動作例を説明する。

- 図の (1) では、ノード A が移動しており、ノード B がノード A とリンクを確立している。ノード A とノード D は、ノード B を経由して通信を行う経路を保持している。
- (2) において、ノード C も移動ノード A とリンクを確立する。しかし、ノード C はノード A の MN メッセージに含まれる位置情報から距離を計算し、リンク品質を *Degraded* とする。ノード C は、ノード A と確立したリンク情報をリンク品質とともに広告する。ノード A 及びノード D は、ノード C 経由の経路はリンク品質が悪いため、ノード B 経由の経路を使い続ける。
- (3) の状態において、ノード A はノード C に接近してノード C とのリンク品質

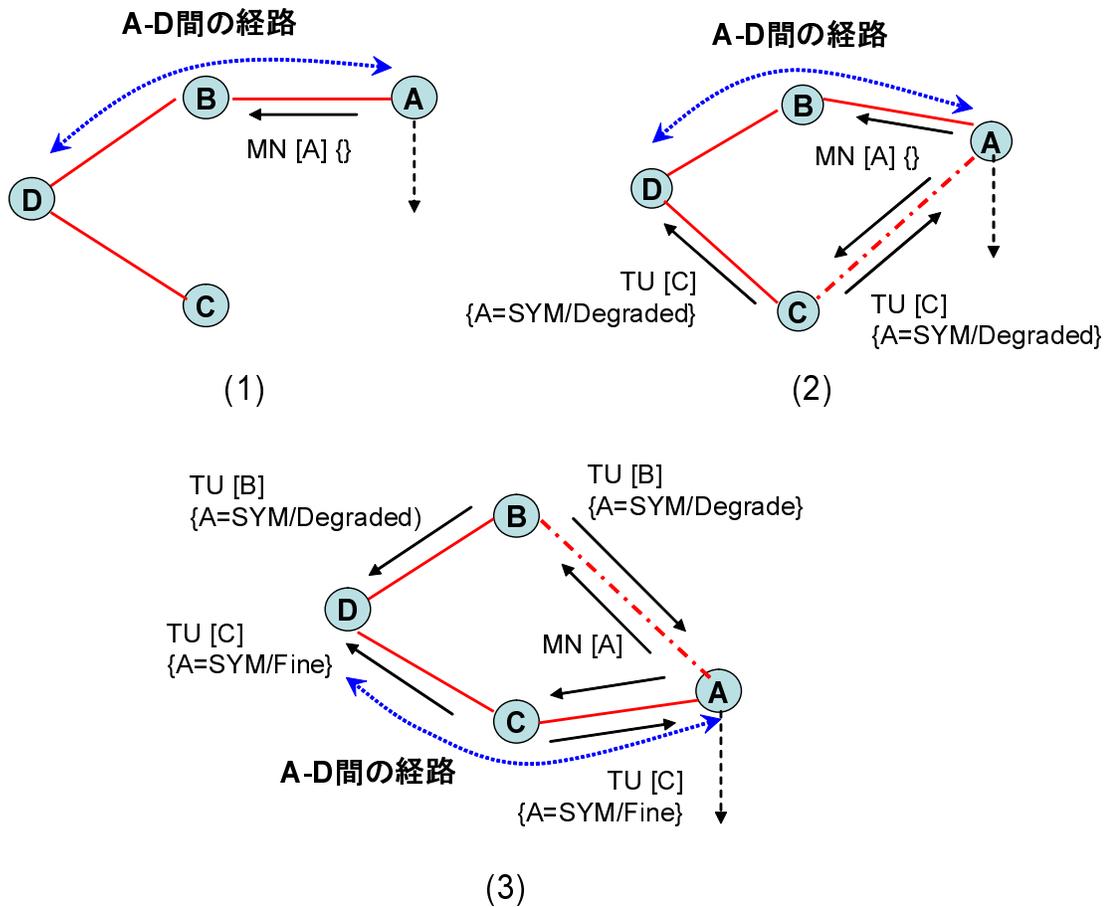


図 4.3: リンク品質に基づく経路切り替え例

が Fine へと変化し、一方ノード B から遠ざかることによってノード B とのリンク品質が Degraded に落ちる。ノード B とノード C はそれぞれリンク品質の変化を TU メッセージによって広告する。TU メッセージを受信したノード A 及びノード D は、互いへの経路をノード C 経由に切り替える。

4.4 SMARTの性能評価

4.4.1 シミュレーションシナリオ

シミュレーションによる評価の枠組みとして、実際の救助活動を模擬することにした。1999年の台湾地震における国際救助活動のレポート [消防庁 99] によると、台湾地震の時は救助チームとして110名が活動に従事した。彼らは3つのグループに別れ、それぞれのグループはトラックとバスを1台ずつ利用した。それとは別にチームリーダーはマイクロバスを使い、全部で7台の車両が利用された。さらに、孤立した地域へ物資や人を運ぶためにヘリコプターが使われた。彼らは、お互いの通信および日本の本部と連絡するために、トランシーバ、携帯電話、INMARSAT、衛星電話 (IRIDIUM) を利用した。しかし、しばしば通信状態が悪く連絡できない状況が発生するなどの問題が発生した。彼らが遭遇した通信に関する困難の詳細は、レポート [消防庁 99] に述べられている。

本評価では、上記の救助活動を模した状況でシミュレーションを行った。シナリオの各パラメータを表4.3に示す。我々のシナリオでは、多数の作業者が負傷者の救助などの作業を行い、救急車やトラックなど数台の車両が利用される状況を想定した。リーダーとメンバー間の通信がもっとも重要かつ頻繁に行われ、リーダーは車両での移動を頻繁に行うとした。多くの通信は音声通話であり、その他はテキストや写真などのデータであるとした。

このようなシナリオを基に、限定された範囲において少数の高速移動ノード (リーダー) と多数の低速移動ノード (メンバー) を仮定した。全ノード数を100台とし、高速に移動するノード5台は車両を想定し、低速に移動する他の95台のノードは作業者を想定した。ノードの移動はランダムウェイポイントモデル [Camp 02] に従う。低速移動ノードは歩行者程度と同等の1 m/s から 2 m/s (3.6Km/h ~ 7.2km/h) の間でランダムに選択された速度で移動を行う。低速移動ノードの停止間隔は10秒から30秒の間でランダムに選択する。高速移動ノードは自動車と同等の5,10,15,20 m/s (18km/h ~ 72Km/h) で移動を行う。高速移動ノードの停止間隔は10秒から120秒の間でラン

表 4.3: シナリオパラメータ

parameter	value
シミュレーション時間	600 (sec)
領域	1000 x 1000 (m)
高速移動ノード数	5 (台)
低速移動ノード数	95 (台)
高速移動ノードの移動スピード	5, 10, 15, 20 (m/sec)
低速移動ノードの移動スピード	1 ~ 2 (m/sec)
高速移動ノードの停止間隔	10 ~ 120 (sec)
低速移動ノードの停止間隔	10 ~ 30 (sec)
通信トラフィック	CBR 16Kbps
平均通信発生間隔	60 (sec)
平均通信継続時間	180 (sec)

ダムに選択する.

各ノードは 11Mbps の IEEE802.11b 無線 LAN インターフェイスを備えており、送信範囲は 200m とした. シミュレーションの領域は 1000m × 1000m とした. ランダムに選択した低速移動ノードと高速移動ノードの間で双方向に通信を行う.

音声通信を想定し、データトラフィックは CBR(Constant Bit Rate) とした. データレートは各方向で 16Kbps(1 通信は双方向で 32Kbps) とした. 通信の発生間隔は平均 60 秒の指数分布に従うとした. 通信継続時間は平均 180 秒の指数分布に従うとした. 平均で、3 通信が同時に行われる.

異なる 10 パターンの移動パターンとトラフィックパターンをランダムに作成し、それぞれのパターンでシミュレーションを 600 秒行った. 全てのパターンにおいて結果の絶対値に多少の差はあるものの、方式毎の傾向および方式間の優劣については同様であったため、全てのパターンの結果の平均を取った.

4.4.2 プロトコルパラメータ

我々は、シミュレーションによってオリジナルの OLSR、Fast-OLSR、SMART のパフォーマンスを比較した。シミュレーションには、NS-2 [NS2] および OOLSR [OOLSR] を利用し、Fast-OLSR および SMART は OOLSR をベースとして実装した。本評価では、次の 5 つについて比較を行った。

- original OLSR (Hello Int.=2sec, TC Int.=5sec)
- original OLSR (Hello Int.=1sec, TC Int.=5sec)
- original OLSR (Hello Int.=5sec, TC Int.=12.5sec)
- fast-OLSR (Hello Int.=5sec, TC Int.=12.5sec)
- SMART (Hello Int.=5sec, TC Int.=12.5sec)

オリジナルの OLSR については、標準仕様 [RFC3626] で規定された Hello および TC メッセージインターバルのデフォルト値、2 秒と 5 秒を用いた。さらに、短いインターバルである 1 秒と 5 秒、長いインターバルである 5 秒と 12.5 秒についても試行した。Fast-OLST と SMART については、デフォルト値では制御メッセージ負荷が高すぎたため、より長いインターバルである 5 秒と 12.5 秒を用いた。Fast-OLSR の Fast-Hello と、SMART の MN メッセージのインターバルは、共に 1 秒とした。Fast-OLSR の最大 MPR 数は 4 とした。他のプロトコルパラメータを表 4.4 に示す。

4.4.3 評価結果

図 4.4 に、各方式でのパケット到達率を示す。SMART は、どの方式よりも高く音声通信に十分な 90% 以上のパケット到達率を達成している。一方 Fast-OLSR では、同じインターバルのオリジナル OLSR と比べて、ほとんど改善されていない。この結果は、単純な移動を仮定した Fast-OLSR では、本シナリオのような自由な移動環境をサポートすることができないことを示している。図 4.5 に、パケットロスの原因を示す。

表 4.4: プロトコルパラメータ

parameter	value
移動通知送信の閾値スピード	5 (m/sec)
電波送信範囲の最大距離 (d_{max})	200 (m)
品質劣化の距離閾値 (d_{t1})	180 (m)
品質回復の距離閾値 (d_{t2})	170 (m)

この図から、パケットロスのほとんどの原因は ARP の失敗 (IFQ-ARP) と MAC の再送回数超過 (MAC-RET) であることがわかる。この 2 つの失敗は次の 2 つの状況で発生する。

- 経路更新の遅延：経路の更新が遅く、ノードは既に存在しない Next Hop に対して転送を試みている。
- 衝突：他のノードとの送信衝突によりパケットがロスする、もしくは、送信を遅延する。

SMART では他の方式と比べて、IFP-ARP、MAC-RET 双方のロスが少なくなっている。これは、SMART では早期の経路切り替えをより少ない送信衝突で行えているためであると考えられる。また、Fast-OLSR では、有効な経路の不在 (RTR-NRTE) によるパケットロスが他の方式に比べて多い。これは、パケットの衝突や不完全な MPR により TC メッセージが全ノードに受信されず、経路計算が失敗したことが原因であると考えられる。一方、SMART ではルーティングループ (RTR-LOOP) と TTL 超過 (RTR-TTL) によるパケット破棄が発生している。これらは 2 つの理由が考えられる。

- 高速移動ノードは、隣接ノードとのリンク切断を TU メッセージを介して間接的に検知するため、経路計算にタイムラグが存在する。
- SMART では、リンク品質に基づいた経路計算を行うため、TU メッセージの喪失によるリンク品質情報の不一致が、経路ループを引き起こす。

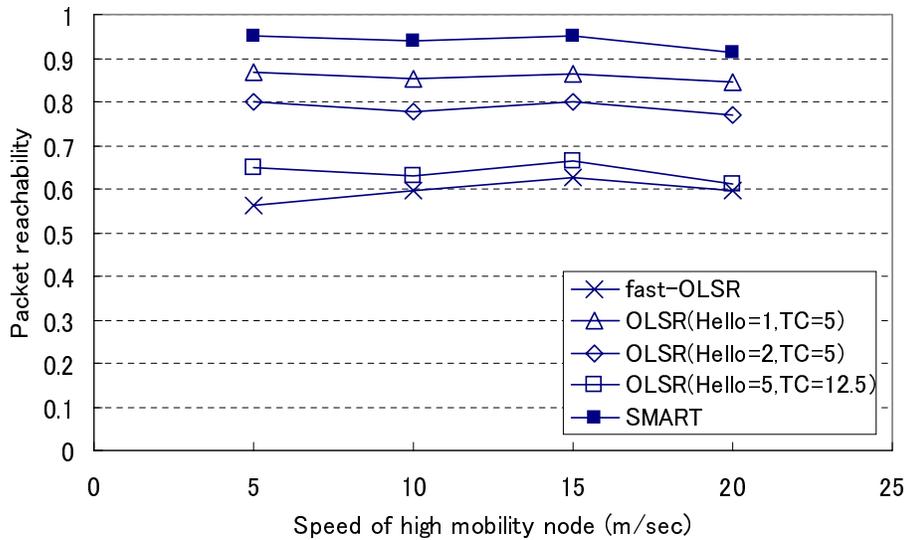


図 4.4: パケット到達率

しかし、実験ではこれらの現象は稀であり、全体的なパケット到達率に深刻な影響を与えていない。短い Hello インターバルのオリジナル OLSR は、他のインターバルのオリジナル OLSR よりも高いパケット到達率を達成している。このことは、Hello メッセージの負荷は、TC メッセージに比べパケット到達率に与える影響が小さいことを示している。

平均制御負荷を図 4.6 に示す。ここでは制御負荷の指標として、1 秒あたりにネットワーク全体で発生した制御メッセージのバイトサイズの合計を用いている。この結果から、SMART の平均制御負荷は、Fast-OLSR やデフォルトインターバルおよび短いインターバルのオリジナル OLSR よりも低いことがわかる。

図 4.7 では、より詳細な制御負荷の内容の比較を示す。オリジナルの OLSR では、全情報を持つ Hello メッセージを定期的に交換するため、他の方式に比べ Hello メッセージ負荷が約 3 倍になっている。SMART の Hello オーバーヘッドは、MN メッセージや MR メッセージおよび Triggered Hello の影響により、Fast-OLSR よりも 30% 多くなっている。しかし、Triggered Hello は最適 MPR を維持するために必要であり、ト

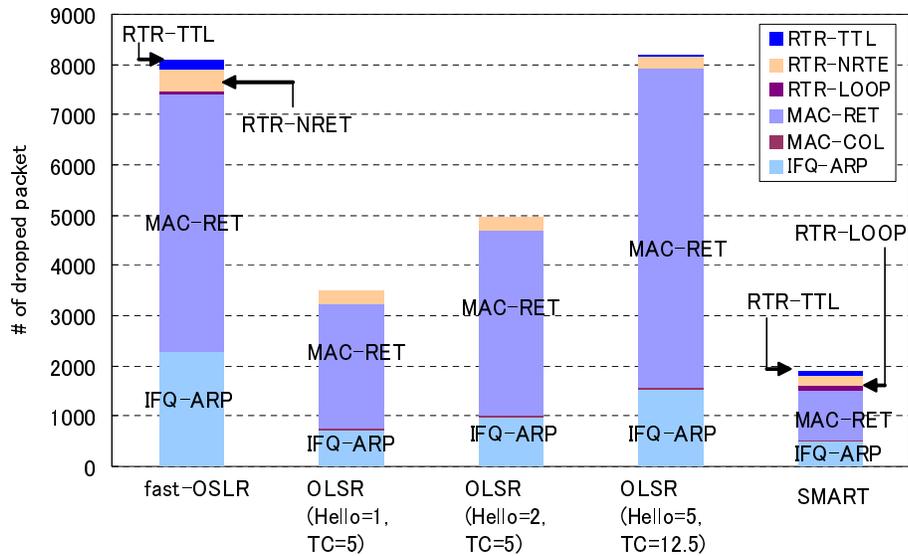


図 4.5: パケットロス原因

ポロジ更新の負荷を下げるために不可欠である。SMARTでは、Fast-OLSRに比べてポロジ更新の負荷（TCまたはTUメッセージの負荷）が約18%低い。全体では、SMARTはFast-OLSRに比べ平均で約14%の制御負荷を削減できている。

片方向移動通知は、いくつかの機能で構成されている。間接的リンク切断検知は、双方向でのメッセージ交換を回避することでTriggered Helloの負荷を相殺している。Triggered Helloは、最適なMPRを維持することで、TUメッセージの転送負荷を軽減している。差分トポロジ広告のためのメッセージ生成ルールは、余分なTUメッセージを抑制している。これらの機能の総合的な効果によりSMARTの全体的な制御負荷が削減されている。

図 4.8 に、ピーク制御負荷を示す。ピーク制御負荷は、1秒間にネットワーク内で発生した制御メッセージの合計サイズの最大値である。OLSRと異なり、状態変化に応じたトポロジ広告機能を持つFast-OLSRとSMARTでは、制御メッセージ負荷が動的に変化する。制御メッセージが増加すると、パケット衝突もより頻繁に発生する。それゆえ、ピーク制御負荷を減らすことは重要である。この結果から、SMARTのピー

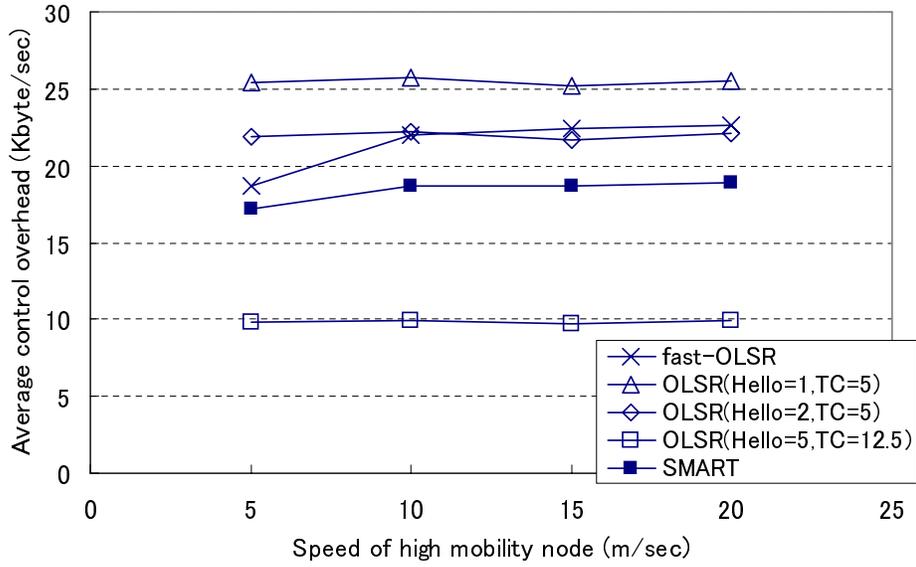


図 4.6: 平均制御負荷

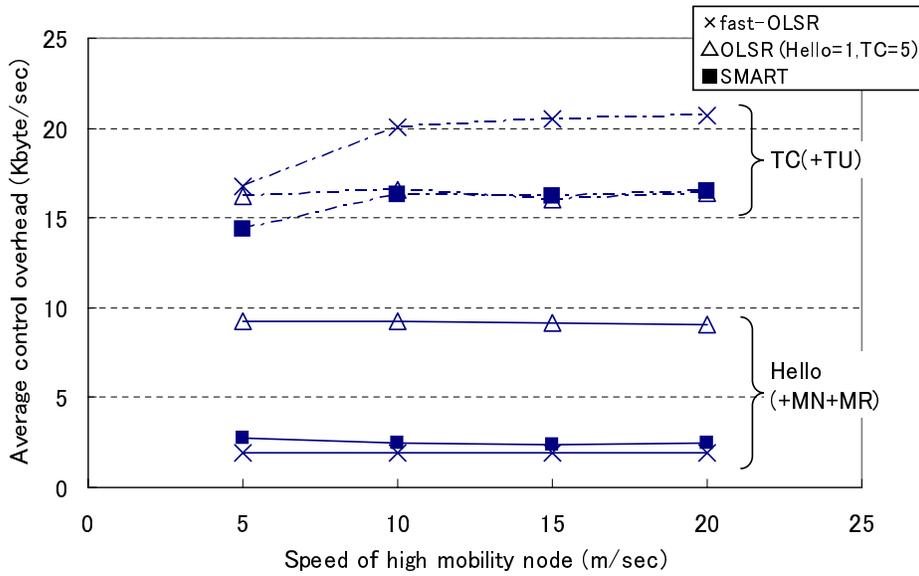


図 4.7: タイプ別制御負荷

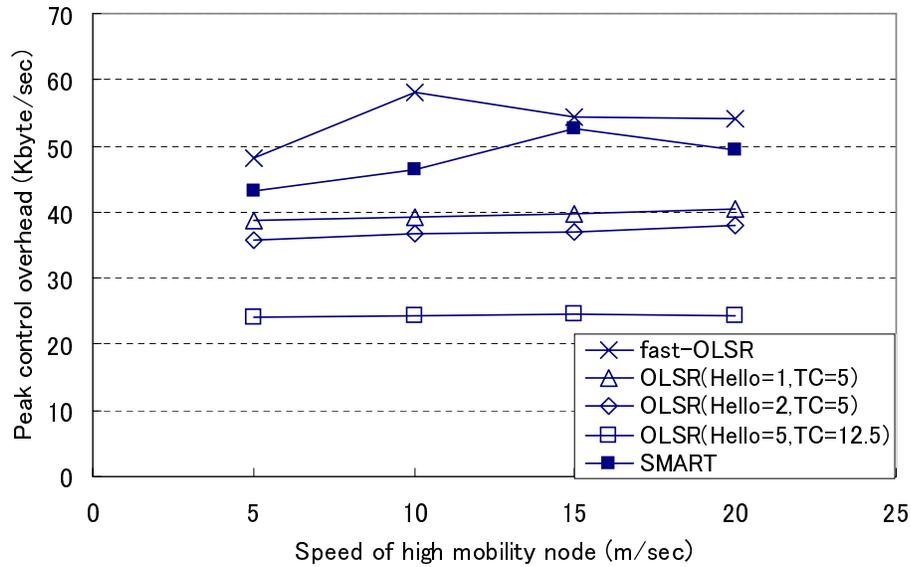


図 4.8: ピーク制御負荷

ク制御負荷は、平均で 10%Fast-OSLR よりも低いことがわかる。さらに、実環境ではピーク制御負荷はネットワークの帯域容量よりも低くなければならない。ここで示される SMART のピーク制御負荷は、無線 LAN ネットワークにおいては許容できる範囲である。

図 4.9 に、平均パケット遅延を示す。SMART では低遅延を維持している一方、Fast-OLSR では、送信衝突による頻繁な再送によって音声通信では許容できない遅延が発生している。また、片方向移動通知によって送信衝突を減らすことにより、SMART では短いインターバルの OLSR よりも遅延の増加が抑制されている。

リンク品質に基づく経路計算の効果

我々はさらに、リンク品質に基づく経路切り替えの効果を評価するため、SMART においてリンク品質に基づく経路切り替えを行った場合と行わなかった場合について比較を行った。パケット到達率と平均制御負荷を、それぞれ図 4.10 と図 4.11 に示す。これらの結果から、リンク品質に基づく経路切り替えは、10%の制御負荷増加により、

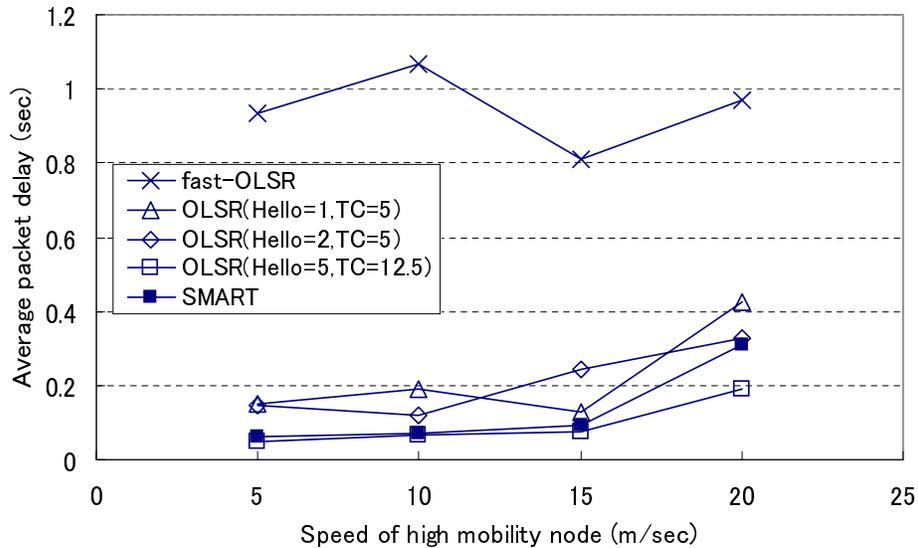


図 4.9: 平均パケット遅延

20%のパケット到達率向上を実現していることがわかる。図 4.12 で示すパケット遅延の結果から、リンク品質に基づく経路計算はパケット遅延に影響を与えず、経路切り替えを速くすることでむしろ遅延を減少していることがわかる。

SMART の適用可能範囲の評価

オリジナルの OLSR と異なり、より多くの高速移動ノードが存在する環境では、SMART の制御負荷はさらに増加する。そのため、高速移動ノードの数は、SMART の性能に影響を及ぼす。SMART は、被災地での救助活動などへの利用にフォーカスしているため、このような限界を知ることは重要である。SMART の限界を評価するため、高速移動ノードの数を変化させて SMART、Fast-OLSR、オリジナル OLSR の性能評価を行った。シミュレーションでは、高速移動ノードを 5 台から 20 台まで変化させた。他のパラメータは、4.4.2 と同様である。シミュレーション結果のパケット到達率、平均パケット遅延、平均制御負荷をそれぞれ図 4.13、図 4.14、図 4.15 に示す。

Fast-OLSR のパケット到達率は、高速移動ノードが増えるにつれ急速に悪化する。

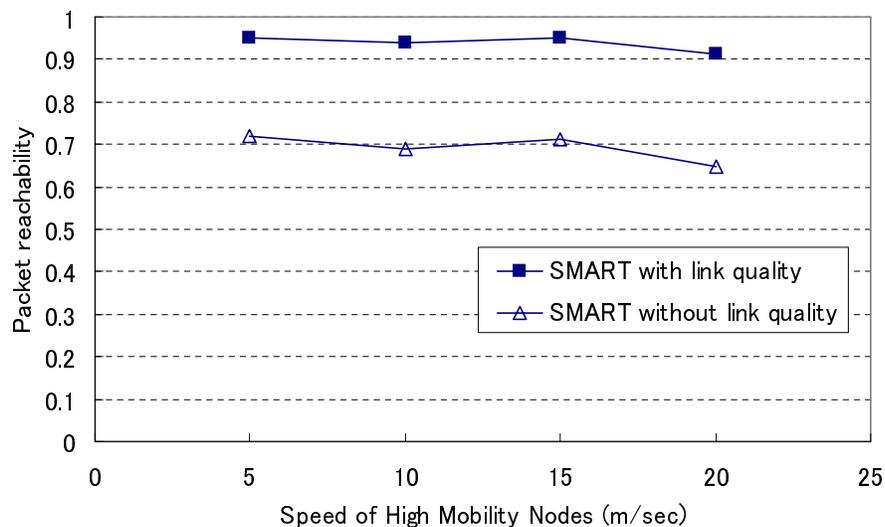


図 4.10: リンク品質に基づくルーティングのパケット到達率に対する効果

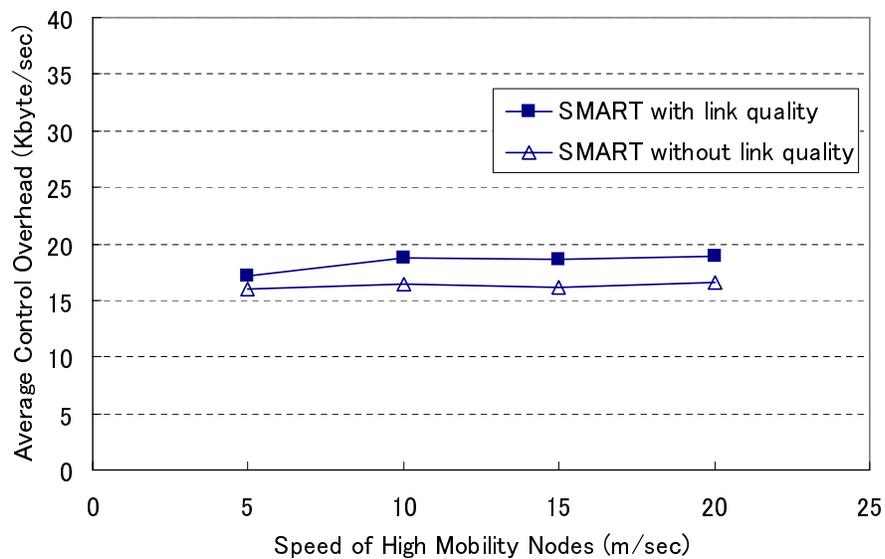


図 4.11: リンク品質に基づくルーティングの平均制御負荷に対する効果

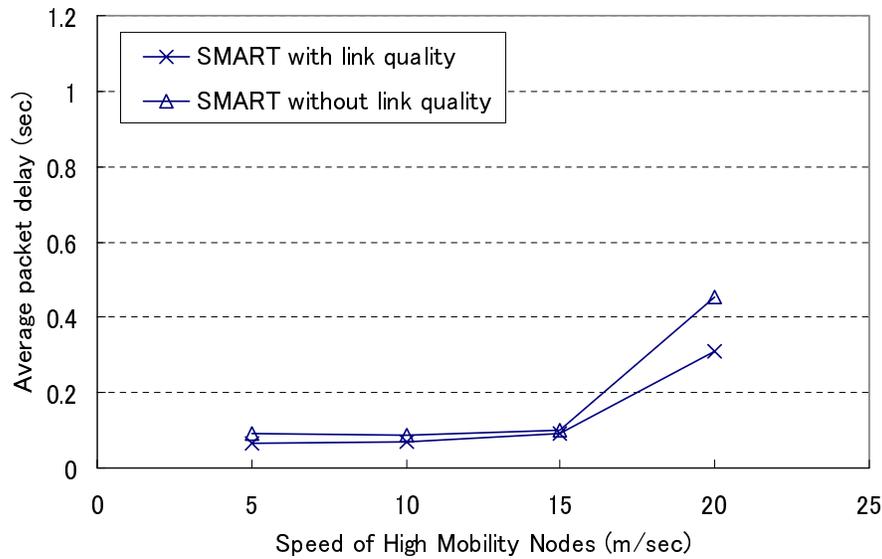


図 4.12: リンク品質に基づくルーティングの平均パケット遅延に対する効果

SMART は、Fast-OLSR やオリジナルの OLSR に比べて常に良いパケット到達率を実現している。しかし、SMART でのパケット遅延は高速移動ノード数が 20 の場合、急速に悪くなる。15 台の高速移動ノードの場合、SMART の制御負荷はオリジナルの OLSR を超える。これらの結果から、SMART では高速移動ノードが全体 15% 程度のネットワークにおいて通信品質を向上可能であると言える。高速移動ノードが 20% を超える環境では、ネットワークの均一的側面が強調され、SMART の適用範囲を超える。そのような状況では、オリジナルの OLSR でメッセージインターバルを短くする方が適していると言える。

4.5 まとめ

本章では、不均一な移動特性を持つノードで構成された無線マルチホップネットワークにおいて通信品質を向上するためのプロアクティブ型経路制御方式として SMART を提案した。SMART では、OLSR をベースとして片方向移動通知機能とリンク品質に基づく経路計算機能を導入することで、制御負荷を低く抑えながら通信品質の向上

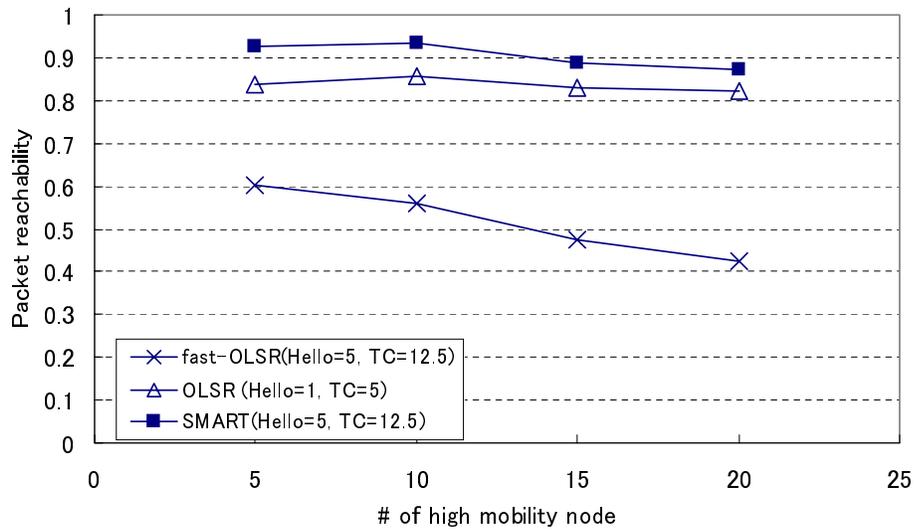


図 4.13: 高速移動ノード数に対するパケット到達率

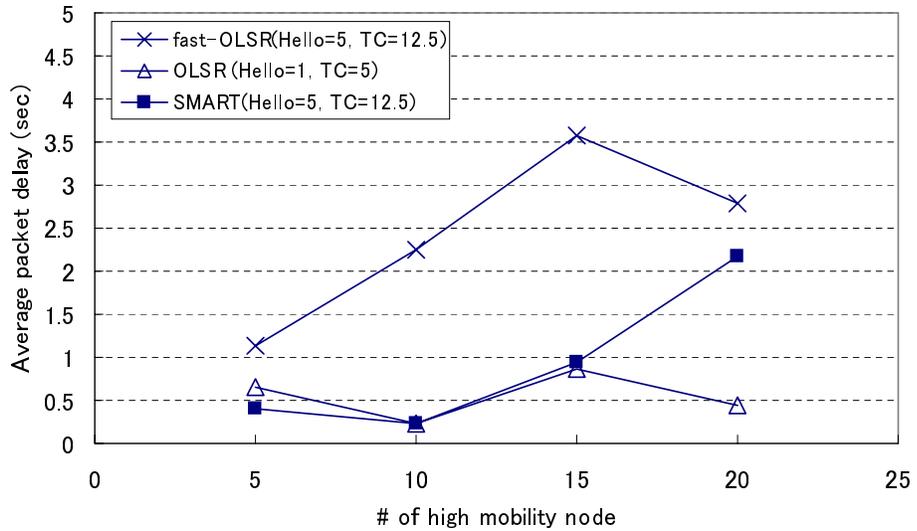


図 4.14: 高速移動ノード数に対する平均パケット遅延

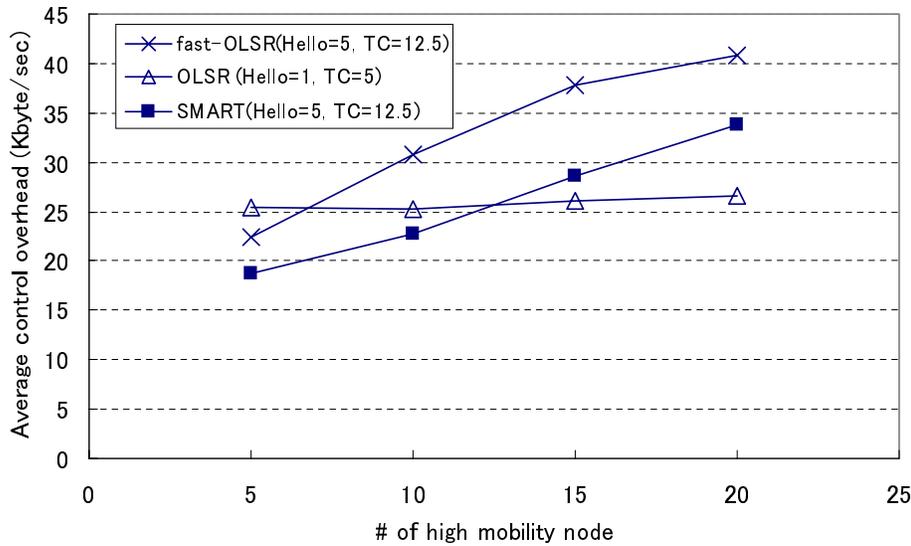


図 4.15: 高速移動ノード数に対する平均制御負荷

を実現した。

- 片方向移動通知は、間接的なリンク切断機能と差分トポロジー広告のための効率的なメッセージ生成ルールによって全体の制御負荷を削減する。制御負荷の削減は、送信衝突を回避し、遅延増加の抑制に寄与している。
- リンク品質に基づく経路計算は、使用中の経路が切れる前により良い経路に切り替えることで、高いパケット到達率に寄与している。

実際の救助活動を想定したシミュレーションにおいて、SMART は従来方式に比べ 14%低い制御負荷で、遅延を悪化させることなく 90%以上のパケット到達率を実現できることを示した。さらに、高速移動ノードが 20%を超える環境では、ネットワークの均一的側面が強調され、SMART よりもオリジナルの OLSR でインターバルを短くしたものの方が適していることを明らかにした。

第5章 多様なアプリケーションや利用状況 が存在する無線マルチホップネット ワークにおける通信品質の向上

5.1 緒言

商店街、観光地、イベント会場、博物館などで情報の取得や配信を行うアプリケーションが考案されている。利用者は、小型端末を持ち歩くことで、場所や状況に応じた情報（店のクーポン、観光案内、展示物の説明など）の取得が可能となる。取得する情報は、テキスト、写真、ビデオなど様々な形態で提供される。こうしたアプリケーションでは、頻度の低い局所的な通信が主流となる。また、前述の防災無線網や災害救助用通信網ほど高い通信品質は必要ない。アプリケーションは、屋内から屋外まで様々な場所で利用されることが想定され、利用場所や時間帯によって通信環境、例えば、隣接ノードの数や移動頻度、周囲の障害物状況、などが変化する。アプリケーションの種類も多様であり、通信要求特性（通信時間、遅延制約、パケットロス許容度、必要帯域等）は各アプリケーションに依存する。例えば、テキストとビデオでは通信時間や遅延要求、必要帯域などすべての通信特性が異なるため、最適な経路も異なる。経路の選択はパケット到達率や遅延などに影響し、アプリケーションの性能も左右する。

一時的かつ局所的な通信には、定常的な経路情報交換や位置情報の管理が不要で、送信者が通信を行う時点で経路を探索するリアクティブ型経路制御方式が適している。従来のリアクティブ型経路制御プロトコルである AODV は、宛先ノードに最も早く届いた経路要求メッセージ (RREQ) がたどった経路を選択する。そのため、アプリケーションや周囲の環境に応じて最適な経路を選択することができない。通信開始時にアプ

表 5.1: 通信可能時間を考慮したプロトコル

方式	概要
ABR	隣接ノードから受信したビーコン ¹ 回数に基づき隣接ノードとの結合度を計算し、経路探索では最も結合度の高い経路を選択
SSR	隣接ノードからのパケット受信強度を記録しておき、経路探索においては受信強度の強いノードで経路を構成
FORP	相対速度情報から隣接ノードとの通信可能時間を推定し、End-to-End でもっとも通信可能時間の長い経路を選択

リケーションや周囲の環境に応じた適切な経路を選択するためには、適切なメトリック（経路選択のための数値指標）を状況に応じて使い分ける必要がある。

本章では、アプリケーション特性等に応じた最適経路の選択と組み合わせが可能なリアクティブ型経路制御プロトコルを提案する。

5.2 既存のリアクティブ型経路制御プロトコルの問題点

2.2.2 で述べた既存プロトコルでは、ノードの移動などによるトポロジー変化に対して経路が適時更新されないため、頻繁に経路の修復や再設定が必要となるという問題がある。この欠点を補うためには、通信品質の良いリンクを優先的に選択したり、輻輳の少ないノードを経由する経路を選択することが必要となる。これまで、通信に適した経路を選択する方式が複数提案されている。

長く通信可能な経路を探すメトリックを導入したプロトコルとして、ABR [Toh 97]、SSR [Dube 97]、FORP [Su 99] などがある（表 5.1）。また、RREQ の受信強度を用いて RREQ の再転送確率を制御することで安定した経路を構築する手法なども提案されている [周防 06]。

表 5.2: 輻輳回避を考慮したプロトコル

方式	概要
LBAR	自ノードおよび隣接ノードが持つ経路数をメトリックとして利用しトラフィックを分散する経路を構築
DLAR	自ノードのキュー長をメトリックとして利用することにより輻輳を回避する経路を選択
BNAR	無線のビジー率を用いて、ノード負荷と干渉トラフィックの両方を考慮した経路を構築

もうひとつの経路選択基準として輻輳を回避する経路を選択することが考えられる。特に無線マルチホップネットワークにおいては、さらし端末問題や隠れ端末問題²などで知られるように、干渉が通信品質に大きく影響を及ぼす。そのため、通信品質の向上には干渉を避ける経路を選択するためのメトリックが必要となる。輻輳を回避し、結果的に干渉を軽減するためのメトリックを導入したプロトコルとして、LBAR [Hassanein 01] や DLAR [Lee 01-2]、BNAR [箱田 02] などがある (表 5.2)。

しかし、こうした単一のメトリックのみを用いる方法では、通信時間またはスループット等の単一の選択基準にしか対応することができない。無線マルチホップネットワークを利用したアドホック通信は、様々な場所や環境で利用されることが想定される。例えば、商店街やイベント会場、博物館のような環境では、隣接ノードが頻繁に移動する状況や、無線リンクの帯域が狭い場合、障害物が多くパケットロスが頻発する場合などが考えられ、周囲状況に応じて最良なメトリックは変化する。さらに、利用するアプリケーションも多様であり、通信要求特性(通信時間、遅延制約、パケットロス許容度、必要帯域等)は各アプリケーションに依存する。例えば、IP 電話やビデオストリーム、Web サービスなどのアプリケーションがある。このようなアプリケー

²3.2 参照

ションにおける DNS クエリや SIP シグナリングなどの制御メッセージは、数秒で終わるため長時間の接続は不要であるが、ロスは可能な限り抑える必要がある。VoIP などのストリーム通信では、長時間継続可能で帯域も確保できる経路を探索しなければならず、ノードの移動や帯域、バッテリー残量などを考慮して経路を探索する必要がある。FTP や重要度の低いファイル交換などのアプリケーションでは、なるべく他のアプリケーションが利用していない空いている経路を選択することが望ましい。

通信品質を向上するためには、品質の良いリンクやノードを通る経路の選択が不可欠である。通信開始時にアプリケーションや周囲環境に応じた適切な経路を選択するには、前述の様々な経路選択メトリックを状況に応じて使い分ける必要がある。

5.3 状況適応型メトリックを用いた経路制御方式

本章では、AODV をベースとして通信特性や移動特性に適した経路を設定できるよう拡張したリアクティブ型経路制御プロトコル AODV-SAM(AODV with Situation Aware Metrics) を提案する。提案方式の特徴は、複数のメトリック要素に対して重み付けした値を経路選択メトリックとして扱うことで、送信ノードが複数のメトリック要素を考慮して経路探索ができる点である。

5.3.1 メトリック計算重みの導入

AODV-SAM が扱うメトリックは、ノードメトリック(以下、N メトリック)とリンクメトリック(以下、L メトリック)の2種類に大別できる。

N メトリック値は、ノード自身のパラメータ(移動速度、保持経路数、バッテリー残量等、以下 N メトリック要素と呼ぶ)から計算する。N メトリック値は以下のように計算する。

$$M_{node} = m_{node,base} + \sum_{i=1}^k (w_{node,i} \times m_{node,i})$$

M_{node} は最終的なノードの N メトリック値であり、この値が RREQ の転送や経路の選択に使われる。 $m_{node,base}$ は N メトリック基準値、 $w_{node,i}$ は i 番目の N メトリッ

ク要素に対する重み係数、 $m_{node,i}$ は i 番目の N メトリック要素である。各 N メトリック要素に対してそれぞれ最良値 $m_{node,i}^{best}$ ~ 最悪値 $m_{node,i}^{worst}$ を設定し、以下のように正規化する。

$$m_{node,i} = 100 \times (m_{node,i}^{raw} - m_{node,i}^{best}) / (m_{node,i}^{worst} - m_{node,i}^{best})$$

$m_{node,i}^{raw}$ は i 番目の N メトリック要素の実値である。 N メトリック基準値は、自ノードの packets 転送能力によって決定される固定値である。例えば、中継車のように電源が確保され安定した通信ができるノードは小さく設定し、PDA のようにバッテリーや処理能力に制限がある端末は比較的大きい値に設定する。本研究では、 N メトリック要素としてノードの移動速度と保持経路数の 2 つを考慮した。

- ノード 移動速度

ノードの移動速度をメトリック要素とすることで、停止しているノードもしくは移動が低速であるノードを経由する経路を選択する。自身が動いていない場合、継続時間の長い通信のための経路を探索するために有効である。

- 保持経路数

LBAR [Hassanein 01] と同様、ノードが備える有効な経路数をメトリック要素とする。リアクティブ型では、利用中の経路のみを保持するため、経路数が多いことは、そのノードが中継するトラフィックが多いことを意味する。そのため、このメトリックを考慮することで干渉やキューイング遅延の少ない経路を選択することができる。

L メトリック値は、2 ノード間の通信状況 (ノード間距離、推定通信可能時間等、以下 L メトリック要素と呼ぶ) から以下のように計算する。

$$M_{link} = m_{link,base} + \sum_{i=1}^l (w_{link,i} \cdot m_{link,i})$$

M_{link} は最終的なリンクの L メトリック値、 $m_{link,base}$ は L メトリック基準値、 $w_{link,i}$ は i 番目の L メトリック要素に対する重み係数、 $m_{link,i}$ は i 番目の L メトリック要素である。 N メトリックと同様に、各 L メトリック要素に対してそれぞれ最良値 $m_{link,i}^{best}$ ~ 最悪値 $m_{link,i}^{worst}$ を与え、以下のように正規化する。

$$m_{link,i} = 100 \times (m_{link,i}^{raw} - m_{link,i}^{best}) / (m_{link,i}^{worst} - m_{link,i}^{best})$$

$m_{node,i}^{raw}$ は i 番目の L メトリック要素の実値である。L メトリック基準値は、基本的に 1 である。本研究では、L メトリック要素としてノード間距離とリンク生存時間の 2 つを考慮した。

- ノード間距離

2 ノード間の距離をメトリック要素として用いる。障害物などを考慮せず、送信パワーやアンテナの高さ等が同じである場合、受信強度は距離と大きく関係する [Pappaport 02]。よって、2 ノード間の距離は、SSR [Dube 97] のように受信強度を示す指標に近いと言える。

- リンク生存時間

FOPR [Su 99] と同様、相手の位置と速度、移動方向から、等速直線運動を仮定して相手との通信可能時間を計算し、それをメトリック要素として用いる。自身が移動している場合や、通信継続時間の長いアプリケーションを利用している場合に有効な指標であると考えられる。

相手ノードとのリンク生存時間は以下のように計算する。

$$L = \begin{cases} L_{max} & (|v| = 0) \\ \min(L_{max}, (d_{max} - d)/|v|) & (|v| \neq 0) \end{cases}$$

L_{max} はリンク生存時間の最大設定値、 d_{max} は最大通信可能距離、 d は RREQ に入った相手ノードの位置情報と自身の位置情報から計算したノード間距離、 v は RREQ に入った相手ノードの速度ベクトル情報と自身の速度ベクトル情報から計算した相対速度ベクトル、 $|v|$ はその大きさである。

提案方式において、送信ノードがブロードキャストする RREQ メッセージに追加した情報を表 5.3 に示す。また、図 5.1 に、RREQ メッセージのフォーマットを示す。

表 5.3: RREQ に追加した情報

情報	説明
N メトリック合計値	RREQ が転送されてきた経路上の N メトリック値を全て合計したものである。経路全体の中継ノードの "良さ" を示す値である。
L メトリック合計値	RREQ が転送されてきた経路上の L メトリック値を全て合計したものである。経路全体のリンクの "良さ" を示す値である。
最悪 N メトリック値	RREQ が転送されてきた経路上の N メトリック値の最悪値である。経路上のボトルネックノードの "悪さ" を示す値である。
最悪 L メトリック値	RREQ が転送されてきた経路上の L メトリック値の最悪値である。経路上のボトルネックリンクの "悪さ" を示す値である。
メトリック計算重み係数	送信ノードが設定した、各メトリック要素に対する重み係数である。RREQ を転送するノードは、この重み係数を用いて N メトリック値、L メトリック値を計算する。
位置情報	GPS などのデバイスから取得した自ノードの座標情報である。ノード間の距離を計算するために利用される。
速度ベクトル情報	ジャイロなどから取得した自ノードの速度と移動方向を含む情報である。ノード間の相対速度を計算するために利用される。

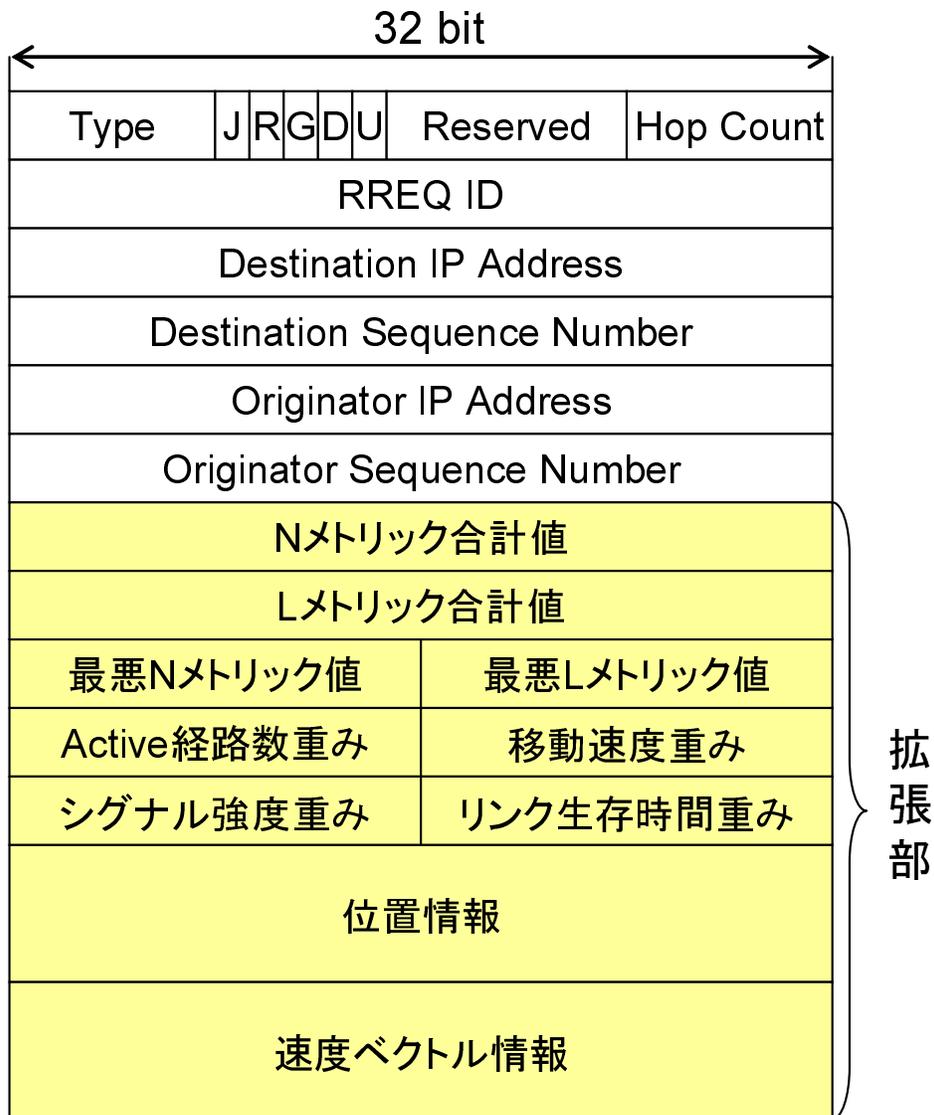


図 5.1: RREQ メッセージフォーマット

5.3.2 AODV-SAMの動作の概要

本節では、提案方式である AODV-SAM の動作を説明する。AODV-SAM は、以下の Step1 ~ 3 の動作により経路構築を行う。

Step1) 経路探索を行う送信ノードは、アプリケーションや移動状況、隣接ノードの変化状況などを考慮して、探索したい経路に適したメトリック計算重み係数を決定し、決定した重み係数を RREQ に入れてブロードキャストする。

Step2) RREQ を受信した中間ノードは、自身の移動速度と保持経路数を取得し、RREQ に入っている計算重み係数を用いて、Step2-1 Step2-2 のように自身の N メトリックを計算する。また、RREQ を送信したノードとの L メトリックを、RREQ 中の位置情報、速度ベクトル情報および計算重み係数を用いて計算する。

Step2-1) 該当する RREQ を初めて受信した中間ノードは、その RREQ を転送する。転送に際して RREQ に入っている N メトリック合計値と L メトリック合計値に、それぞれ上記で計算したメトリック値を加算する。また、自身が計算した N メトリック値及び L メトリック値が RREQ に入っている最悪 N メトリック値、最悪 L メトリック値よりも悪い場合は、それらを自身の N メトリック値、L メトリック値に置き換える。転送した RREQ の情報は一定時間記録しておく。

Step2-2) 中間ノードが以前に同じ宛先への RREQ を受信したことがある場合、RREQ のループを防ぐためホップ数が以前受け取った RREQ と同じであるかより小さい場合のみメトリックを比較する。メトリックの比較方法は、後述の Step3 と同様である。メトリックを比較し、後に受信した RREQ の方がメトリックが良い場合は、その RREQ を転送する。そうでなければ、RREQ を破棄する。

Step3) 宛先ノードが RREQ を受信すると、そこから一定時間他の RREQ 受信を待つ。その間に複数の RREQ を受信した場合、最良の RREQ を選択し RREP を応答する。RREP を受信した中間ノードは、自身が記録する最良の RREQ に沿っ

て RREP を転送する。中間ノード及び宛先ノードでは、以下の値の小さい順で RREQ の良否を判定する。

- (1) N メトリック合計値 + L メトリック合計値
- (2) L メトリック合計値
- (3) N メトリック合計値
- (4) 最悪 L メトリック値
- (5) 最悪 N メトリック値
- (6) ホップ数
- (7) 隣接ノードとの L メトリック

図 5.2 を用いて、送信ノード S から宛先ノード D への経路探索動作例を説明する。RREQ は、S → I1 → D と S → I2 → I3 → D の 2 経路で D に届く。中間ノード I1、I2、I3 は S が RREQ に設定したメトリック計算重みに従って、N メトリック、L メトリックを計算し、その値を基に RREQ 内の情報を更新して転送する。宛先ノード D は、2 つの RREQ からメトリック合計値の小さいほうを選び、RREP を返答する。そのためこの例では、I2、I3 を経由する経路 (Route#2) を選択する。

5.4 AODV-SAM の性能評価

多様な環境に対して ADOV-SAM が適切な経路選択を行えることを確認するため、通信継続時間およびノード移動特性の異なる状況に対して、メトリック計算重み係数がパケット到達率等に与える影響をシミュレーションにより評価した。

トラフィックは、16Kbps の双方向固定ビットレートとした。1000m × 1000m の範囲に 100 台のノードをランダムに配置し、ランダムウェイポイントモデル [Camp 02] に従って移動させた。メディアアクセス制御 (MAC) は IEEE802.11 を用い、無線帯域は 11Mbps、通信可能範囲は 200m とした。1000 秒間のシミュレーションを異なるノード移動パターンとトラフィックパターンで 10 回行い平均値を取った。

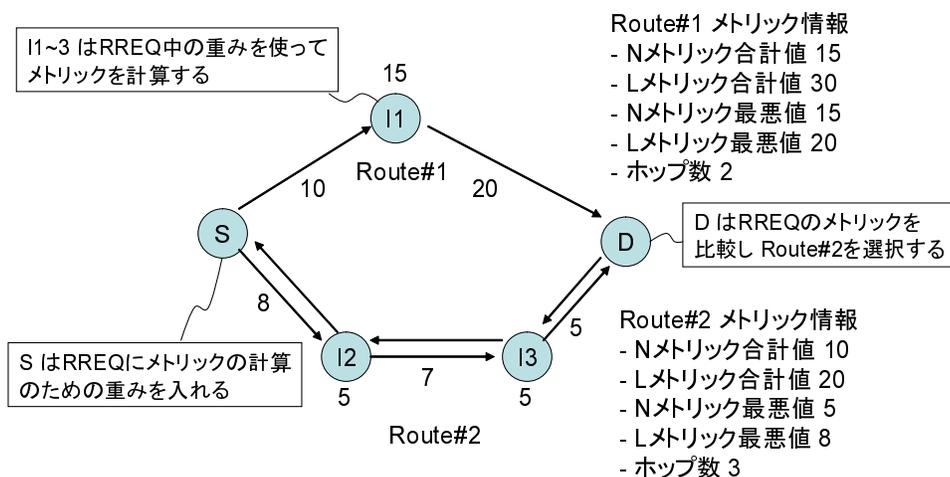


図 5.2: 提案方式の動作例

評価したメトリック計算重み係数の組み合わせは、表 5.4 に示す 22 パターンである。A は経路数に対する重み、M は移動速度に対する重み、D は距離に対する重み、L はリンク生存時間に対する重みである。すべて 0 であるものはオリジナルの AODV (以下、単に AODV) であり、宛先ノードは最初に受信した RREQ に対し即座に RREP を応答する。それ以外は、提案方式 (AODV-SAM) であり、宛先ノードは RREQ を受信すると 0.3 秒待ってから最良の RREQ に対して RREP を応答する。N メトリック基準値および L メトリック基準値は、共に 1 とした。表 5.5 に、本評価で用いた各メトリック要素を正規化するための最良値と最悪値を示す。

評価では、以下の 3 つの条件をそれぞれ変化させた全 36 パターンにおいて、最良の packets 到達率を示す重み係数の組み合わせを測定した。

- 通信継続時間の平均値 10、60、120(秒)
- ノード 移動速度 5、10、15、20(m/秒)
- ノード 移動間隔 30、60、120(秒)

通信発生間隔と通信継続時間の平均は同じと仮定し、指数分布に従って通信発生間隔、通信継続時間を決定した。10 秒、60 秒、120 秒はそれぞれ、テキストなどの小

	重み係数			
	保持経路数 (A)	ノード移動速度 (M)	ノード間距離 (D)	リンク生存時間 (L)
オリジナルAODV	0	0	0	0
リンク生存時間のみ *	0	0	0	1
ノード移動速度のみ *	0	1	0	0
	0	1	0	1
保持経路数のみ *	1	0	0	0
	1	0	0	1
	1	1	0	0
ノード間距離のみ *	0	0	1	0
	0	0	1	1
	0	1	1	0
	1	0	1	0
	1	1	1	1
	1	1	1	2
	1	2	1	1
	1	2	1	2
	2	1	1	1
	2	1	1	2
	2	2	1	1
	1	1	2	1
	1	1	2	2
	1	2	2	1
	2	1	2	1

表 5.4: 評価した重みの組み合わせ

表 5.5: 正規化に用いる各メトリック要素の最良値と最悪値

メトリック要素	最良値 (m^{best})	最悪値 (m^{worst})
ノード移動速度 (m/s)	0	30
保持経路数 (個)	0	30
ノード間距離 (m)	0	200
リンク生存時間 (s)	60	0

いデータ送信、写真等の大きなデータ送信、VoIP による通話を意図した通信時間である。ノード移動間隔とは、ノードが移動を終えて停止してから次に移動を開始するまでの時間のことである。

なお、図 5.3~5.8 ではオリジナルの AODV と単一メトリックを用いた場合 (表 5.4 の * 印) および最もパケット到達率の良かった重み係数の提案方式のみをプロットしている。

5.4.1 通信特性に対する効果

通信継続時間の変化に対する、各重み係数でのパケット到達率の傾向を調べた。通信継続時間以外の条件は、全ての条件について平均している。

通信継続時間とパケット到達率の関係を図 5.3 に示す。最もパケット到達率が良かった重み係数の組み合わせを表 5.6 に示す。いずれの通信継続時間においても単独でメトリック要素を使う方式よりも、すべてのメトリックを考慮した上で、特定のメトリック要素の重みを大きくする AODV-SAM のほうが良いパケット到達率が得られた。全体の傾向として、全ての方式で通信時間が長くなるとパケット到達率が下がっている。これは、通信時間が長くなるにつれて経路が切れる可能性が高くなり、経路の修正までにパケットがロスするためである。通信継続時間毎に各方式を比較すると、通信時間が 10 秒と短い場合は、移動速度メトリックと距離メトリックの両方が良い経路、つまり、なるべく移動せず近くにいるノードを中継ノードとして経路を構築することでパ

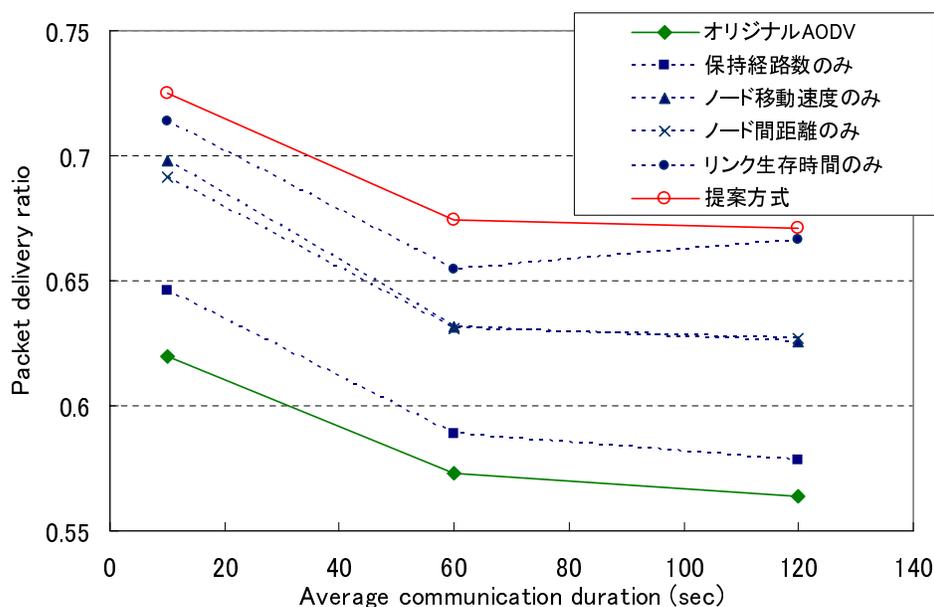


図 5.3: 通信継続時間とパケット到達率

パケット到達率は最も良い結果となる。通信時間が 120 秒と長い場合、リンクの生存時間の重みを大きくして経路を構築することでパケット到達率が最良となる。ただ、通信継続時間が長い 120 秒の場合、リンク生存時間のみを用いた場合と最良の組み合わせの差が小さく、リンク生存時間の重要性が相対的に大きくなっていることがわかる。

表 5.6: 通信継続時間に対する最適な重み係数の組み合わせ

移動間隔 (sec)	保持経路数	ノード 移動速度	ノード 間距離	リンク生存時間
10	1	2	2	1
60	1	2	1	1
120	1	1	1	2

図 5.4 に、平均パケット遅延を示す。全ての方式に対して、通信継続時間が長くなるにつれて、パケット遅延時間が大きくなっている。これもパケット到達率と同様の理由である。経路が切れてから経路が修復されるまでの間、パケットはノード内で保持

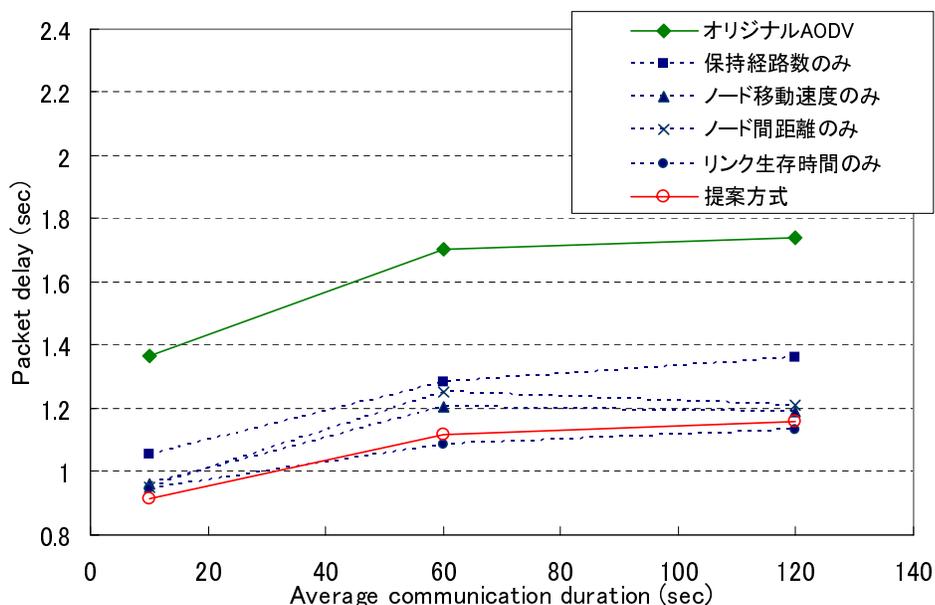


図 5.4: 通信継続時間とパケット遅延

されるため、経路の障害が発生するほどパケットの遅延時間も大きくなる。通信継続時間毎に各方式を比較すると、ほとんどの場合において単一のメトリック要素を用いる方式よりも AODV-SAM のほうがパケット遅延時間が短い、同等である。パケット到達率を上げるために AODV-SAM を用いて別の経路を選択しても、それ自体が遅延の悪化を生じないことがわかる。

図 5.5 に発生したローカルリペア回数を、図 5.6 に発生した RREQ 数を示す。全体として、通信継続時間が短くなるほど、RREQ 数及びローカルリペア数が多くなっている。これは、シミュレーション全体の回数を計測しているためである。通信継続時間が短いほど、多くの通信がシミュレーション中に発生する。通信発生間隔も通信継続時間と同じにしているため、通信継続時間 10 秒の場合は、通信継続時間が 120 秒の場合に比べて平均 12 倍の通信が発生する。そのため、RREQ メッセージ数やローカルリペア数の絶対数は通信継続時間が短いほど多くなる。オリジナルの AODV では、中間ノードは 2 度目以降に受信した RREQ をそのまま破棄するが、AODV-SAM では、メトリックの良い RREQ を後から受信した場合に再度その RREQ を転送する。そのた

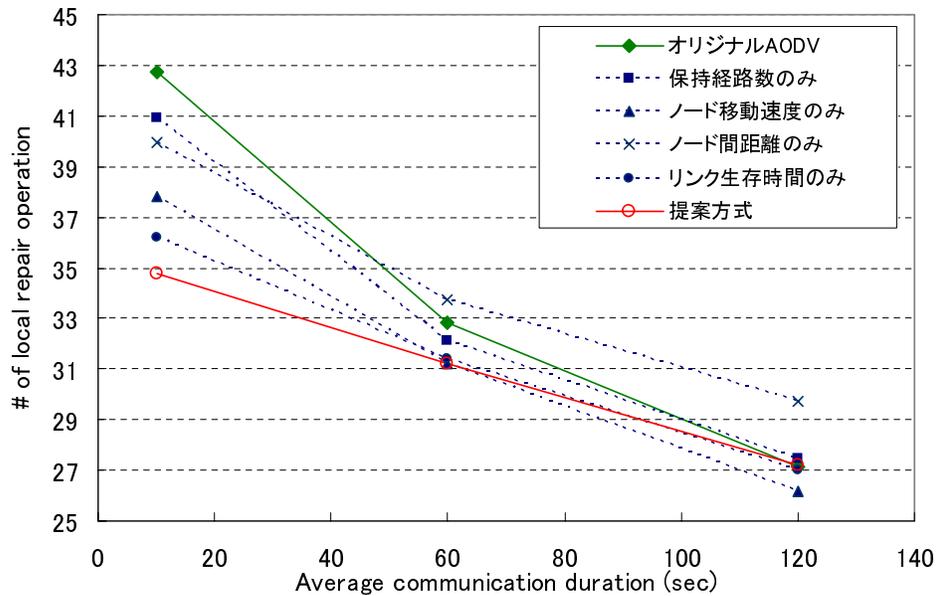


図 5.5: 通信継続時間とローカルリペア回数

め、提案方式では RREQ の増加が懸念される。しかし、図 5.5 に示すように、特に通信継続時間が短い 10 秒の場合は、良い経路を選択することで経路障害が少なくなり通信中のローカルリペア回数が減少する。それにより、AODV よりも AODV-SAM のほうが RREQ メッセージによる負荷は減少している (図 5.6)。ローカルリペアの回数は、通信継続時間が長くなるに従い各方式に差が無くなっている。つまり、通信継続時間が長い場合、経路の障害発生確率はどの経路を選ぶかにそれほど影響されないことを示している。にもかかわらず図 5.3 で見たようにパケット到達率が向上しているのは、AODV-SAM が経路が切れた場合のロスだけでなく、無線干渉によるパケットロスなども考慮した経路を選択しているためであると考えられる。

5.4.2 ノード移動特性に対する効果

次に、ノードの移動特性 (移動速度、移動間隔) に対するパケット到達率への影響について考察する。

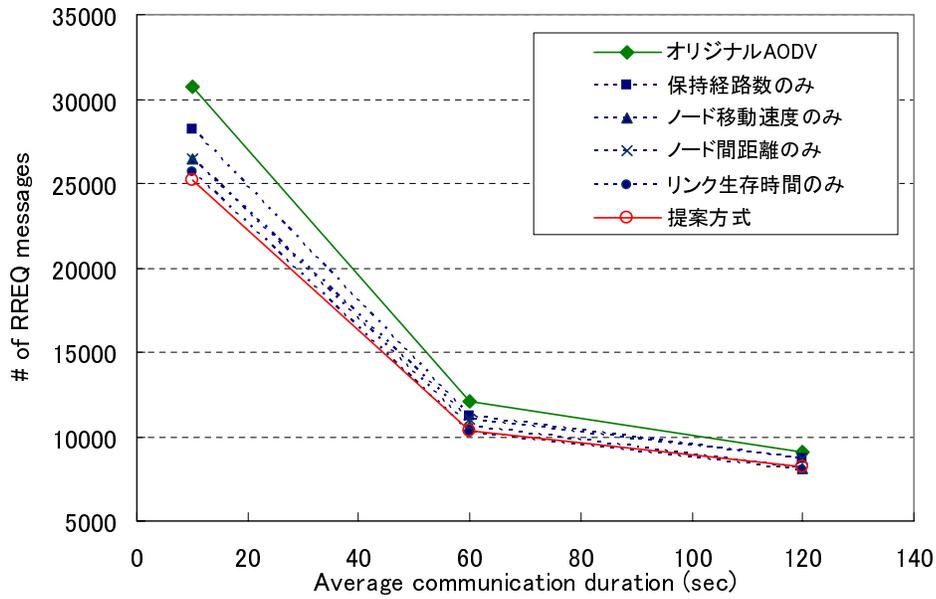


図 5.6: 通信継続時間と発生 RREQ 数

図 5.7 に、ノードの移動速度とパケット到達率の関係を示す。ノード移動速度以外の条件は、全ての場合について平均している。また、パケット到達率が最も良かった重みの組み合わせを、表 5.7 に示す。いずれの場合も、AODV や単独でメトリックを利用する場合に比べ、パケット到達率を改善することができている。移動速度が 5~15m/sec ではノードのノード移動速度の重みを高くし、20m/sec ではリンク生存時間の重みを高くすることでパケット到達率を改善できている。

表 5.7: 移動速度に対する最適な重み係数の組み合わせ

移動間隔 (sec)	保持経路数	ノード移動速度	ノード間距離	リンク生存時間
5	2	2	1	1
10	1	2	2	1
15	2	2	1	1
20	1	1	1	2

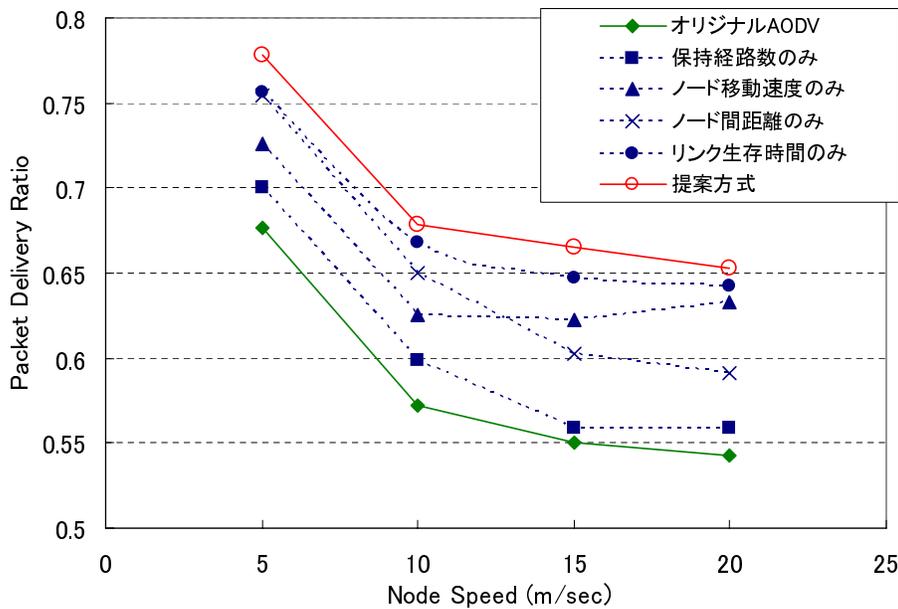


図 5.7: ノード移動速度とパケット到達率

図 5.8 に、ノードの移動間隔とパケット到達率の関係を示す。ノード移動間隔以外の条件は、全ての場合について平均している。パケット到達率が最も良かった重みの組み合わせを表 5.8 に示す。移動間隔が短い場合、常にノードが動いていることが多いため、動かないノードを選択することはあまり有効でなく、保持経路数などの負荷を表すメトリック要素の重み係数を高くする方が良いことがわかる。しかし、経路数メトリックのみを単独で用いた場合は非常にパケット到達率が低くなっていることから、移動に関しても考慮が必要であることがわかる。移動間隔が長い場合、ノード移動速度やノード間距離を考慮せず、保持経路数などの重み係数をより高くするほうが良い到達率を得られている。これは、ノードがそれほど頻繁に移動しない場合は、移動しているノードと移動していないノードの間で作成した経路が切れる確率が非常に高いことに起因する。つまり、リンク生存時間以外の要素を考慮することが逆に通信可能時間の短い経路を選ばせてしまう。この結果から、リンク生存時間を常に考慮しつつ、移動間隔の長さに応じて他のメトリック重みを調整することが良いと言える。

表 5.8: 移動間隔に対する最適な重み係数の組み合わせ

移動間隔 (sec)	保持経路数	ノード移動速度	ノード間距離	リンク生存時間
30	2	1	1	1
60	1	1	1	2
120	1	0	0	1

5.5 最適な重み係数の決定に関する考察

5.4の実験結果は、アプリケーションの通信継続時間やノードの移動速度及び移動頻度などが異なる状況に対して、複数のメトリック要素に重み付けして利用する提案手法である AODV-SAM により通信品質を向上できることを示している。

5.4では、通信継続時間等の各条件に対する大まかな傾向を見るため、他の条件については全て平均化してグラフ化した。しかし、詳細に見るとそれぞれの条件の組み合わせによって、最良の packets 到達率を実現する重み係数は異なる。表 5.9 に、全条件の組み合わせ (36 通り) における最良の packets 到達率を実現した重み係数の組み合わせを示す。また、表 5.10 に全条件での AODV-SAM、オリジナル AODV、単一メトリックの packets 到達率を示す。従来手法である AODV に比べ、複数のメトリックを重み付けして同時に利用する提案手法では packets 到達率を常に 10% 以上改善できる。単一のメトリックを使う場合と比べると、状況により packets 到達率を最大 5% 程度改善できる。

最適な重み係数を決定する要因は複数あるため、どんな状況でどの重み係数を使うかは事前に調査して決定しておくか、稼働中に学習してゆく必要がある。アプリケーションの通信継続時間や遅延に対する感度などは、アプリケーションの種類や転送するファイルサイズなどから推定する必要がある。また、ノードの移動状況等の周囲環境については、RREQ などの制御メッセージの受信履歴や隣接ノードの変化度合い、自身の移動速度などから推定する必要がある。推定した情報を経路要求時のパラメータに含めることで、AODV-SAM はどのメトリック要素を優先すべきかを決定し、重

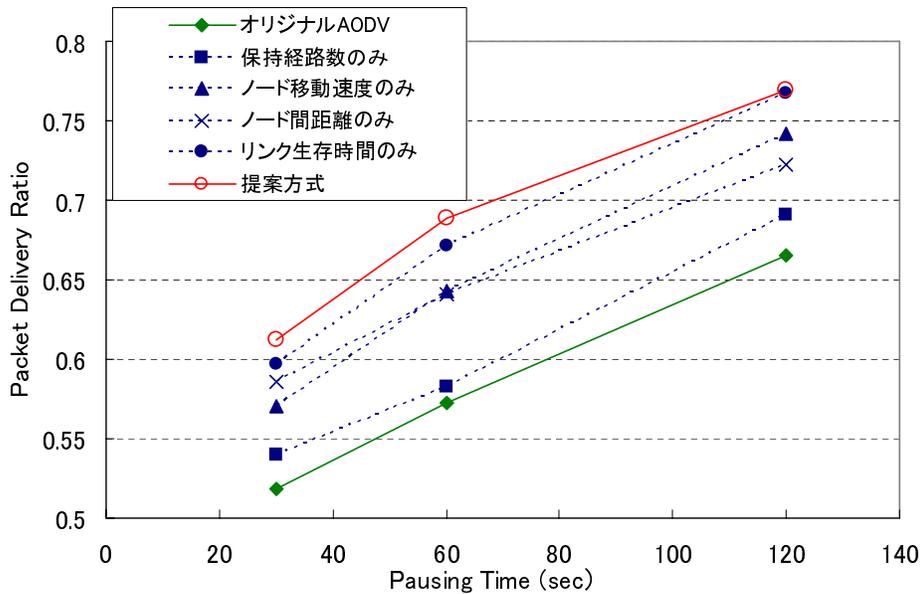


図 5.8: 移動間隔とパケット到達率

み係数を調整しなければならない。また、稼働中に学習するためには、作成した経路に対する評価のフィードバックメカニズムが必要となる。アプリケーションの通信特性や周囲状況を推定する方法および、それらの推定値から重み係数を決定する方法については今後の課題である。

また、提案方式の限界としては、新たなメトリック要素が必要となった場合動的に追加できないことが挙げられる。あらかじめ主要なメトリック要素を全て入れておくことは可能であるが、メッセージが大きくなり、重み係数の決定が複雑になる等の欠点が生じる。そのため、どのメトリック要素が最小セットとして有効かを見極める必要がある。

5.6 まとめ

本章では、無線マルチホップネットワークにおいて、アプリケーションの通信特性やノードの移動特性に応じて最適な経路を選択するためのリアクティブ型経路制御方

通信継続時間 (sec)	ノード移動速度 (m/sec)	ノード移動間 隔 (sec)	最適重み係数			
			保持経路数	ノード移動速 度	ノード間距離	リンク生存時 間
10	5	30	1	2	1	1
10	5	60	1	2	2	1
10	5	120	1	2	1	1
10	10	30	1	1	2	2
10	10	60	2	1	1	1
10	10	120	2	1	1	1
10	15	30	1	1	2	2
10	15	60	2	2	1	1
10	15	120	2	1	1	2
10	20	30	2	1	1	1
10	20	60	1	1	2	2
10	20	120	1	2	1	2
60	5	30	1	2	1	2
60	5	60	1	1	2	2
60	5	120	1	2	1	2
60	10	30	1	2	2	1
60	10	60	1	2	1	1
60	10	120	2	1	2	1
60	15	30	1	2	1	1
60	15	60	1	2	1	1
60	15	120	1	2	1	1
60	20	30	1	1	1	2
60	20	60	1	0	0	1
60	20	120	0	0	0	1
120	5	30	2	1	1	1
120	5	60	1	1	2	2
120	5	120	1	1	2	2
120	10	30	0	1	1	0
120	10	60	1	2	1	1
120	10	120	0	1	0	1
120	15	30	1	1	1	1
120	15	60	1	1	1	2
120	15	120	1	0	0	1
120	20	30	0	1	0	1
120	20	60	1	1	1	2
120	20	120	0	1	0	1

表 5.9: 各状況におけるパケット到達率に対する最適重み係数の組み合わせ

通信継続 時間 (sec)	ノード移動 速度 (m/sec)	ノード移動 間隔 (sec)	パケット到達率(%)						改善率 (%)
			提案方式	オリジナル AODV	保持経路 数のみ	ノード移動 速度のみ	ノード間距 離のみ	リンク生存 時間のみ	
10	5	30	76.97	66.7	70.79	72.22	76.31	74.3	0.66
10	5	60	81.02	69.59	72.36	74.75	79.52	78.64	1.5
10	5	120	83.39	71.94	75.34	79.22	80.68	81.34	2.05
10	10	30	67.21	55.63	58.8	62.45	66.06	65.18	1.15
10	10	60	73.35	61.99	64.43	71.67	69.49	70.57	1.68
10	10	120	80.14	70.21	71.07	78.08	75.48	79.19	0.95
10	15	30	62.39	50.13	53.81	58.58	58.18	59.73	2.66
10	15	60	68.86	56.13	57.77	65.45	63.71	67.72	1.14
10	15	120	79.11	67.5	70.08	75.49	71.49	76.81	2.3
10	20	30	57.51	46.67	48.99	53.99	53.2	55.37	2.14
10	20	60	68.8	56.59	59.38	67.1	61.67	68.7	0.1
10	20	120	80.04	70.92	72.57	78.25	73.96	78.95	1.09
60	5	30	74.38	64.42	65.1	69.01	72.65	69.12	1.73
60	5	60	75.71	65.26	67.47	68.56	73.64	71.96	2.07
60	5	120	79.87	67.94	71.01	75.2	74.06	78.45	1.42
60	10	30	60.68	46.81	52.81	54.6	55.5	56.94	3.74
60	10	60	68.17	57.66	58.66	58.64	65.99	63.29	2.18
60	10	120	73.32	61.83	64.74	67.84	66.43	70.16	3.16
60	15	30	55.97	45.03	42.66	50.75	49.25	50.92	5.05
60	15	60	64.97	52.82	52.46	57.73	55.79	62.15	2.82
60	15	120	78.77	63.84	66.66	69.72	68.85	73.37	5.4
60	20	30	49.88	41.06	41.2	43.81	44.98	47.63	2.25
60	20	60	65.54	54.54	54.27	64.14	58	62.95	1.4
60	20	120	78.95	65.98	69.12	78.09	71.92	78.95	0
120	5	30	76.47	68.18	71.08	70.91	76.23	73.58	0.24
120	5	60	75.32	62.14	62.19	65.87	66.77	71.67	3.65
120	5	120	83.43	72.8	75.28	77.3	79.33	81.62	1.81
120	10	30	60.79	48.35	52.19	46.39	53.46	57.02	3.77
120	10	60	67.79	51.21	55.88	56.67	65.34	62.9	2.45
120	10	120	76.6	61.3	60.11	66.42	67.27	75.98	0.62
120	15	30	56.98	47.59	43.58	51.06	50.81	52.93	4.05
120	15	60	66.75	49.85	47.83	59.11	53.54	63.29	3.46
120	15	120	76.67	62.61	68.4	72.32	70.85	75.21	1.46
120	20	30	54.74	41.47	46.59	50.32	46.65	53.01	1.73
120	20	60	65.6	49.31	46.78	61.62	55.7	61.6	3.98
120	20	120	76.78	61.49	64.11	72.58	66.32	71.19	4.2

表 5.10: 各状況におけるパケット到達率の詳細

式 AODV-SAM を提案した。提案方式では、送信ノードが経路要求メッセージで複数のメトリック要素に対する計算重み係数を指定することで、中間ノードは送信ノードが期待する経路選択メトリックを計算でき、宛先ノードは送信ノードが望む経路を選択できる。通信継続時間及び移動速度等を変化させたシミュレーションにより、以下の知見を得ることができた。

- AODV-SAM は従来手法である AODV に比べ、どの状況においてもパケット到達率を 10%以上改善できる。
- AODV-SAM は単一のメトリックを使う場合に比べ、状況によってパケット到達率を最大 5%以上改善できる。
- 通信継続時間や移動速度、移動間隔等の条件により、最良のパケット到達率を実現するメトリック重み係数の組み合わせは異なる。

提案方式の実環境への適用においては、状況に応じた最適な重み係数決定方式の確立が今後の課題となる。

第6章 結論

無線マルチホップネットワークは、地理的、コスト的または時間的に有線網や基地局を敷設することが困難である地域や状況でも簡単に通信網を構築可能な技術である。その特性から、山間部での防災無線網や災害救助通信網、観光案内など様々なアプリケーションが期待されている。本論文では、以下の3つの状況を想定し、既存方式では実現が困難なアプリケーションをカバーする無線マルチホップネットワークにおける経路制御方式を提案した。

- (1) 移動の無い無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上
- (2) 不均一な移動特性を持つ通信ノードで構成された無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上
- (3) 多様なアプリケーションや利用状況が存在する無線マルチホップネットワークにおける通信品質の向上

図 6.1 に本研究により無線マルチホップネットワークが適用可能となった領域を示す。第 3 章では、(1) の状況を想定し、切断許容パス、リンク瞬断状態および干渉を考慮した経路計算を備えたマルチパス通信方式を提案した。提案方式により、パケットロスが頻繁に発生する環境下でも、従来方式と比べて通信途絶時間を 30 分の 1 以下に抑え、パケット到達率を 15%程度向上できること、パス回復動作を 10 分の 1 以下に抑えられることを示した。今後の課題としては、パケットロスの原因として降雨や障害物等の外的要因を考慮した場合の提案方式の評価がある。

第 4 章では、(2) の不均一な移動特性を持つノードで構成された無線マルチホップネットワークにおいて通信品質を向上するための経路制御拡張方式 (SMART) を提案

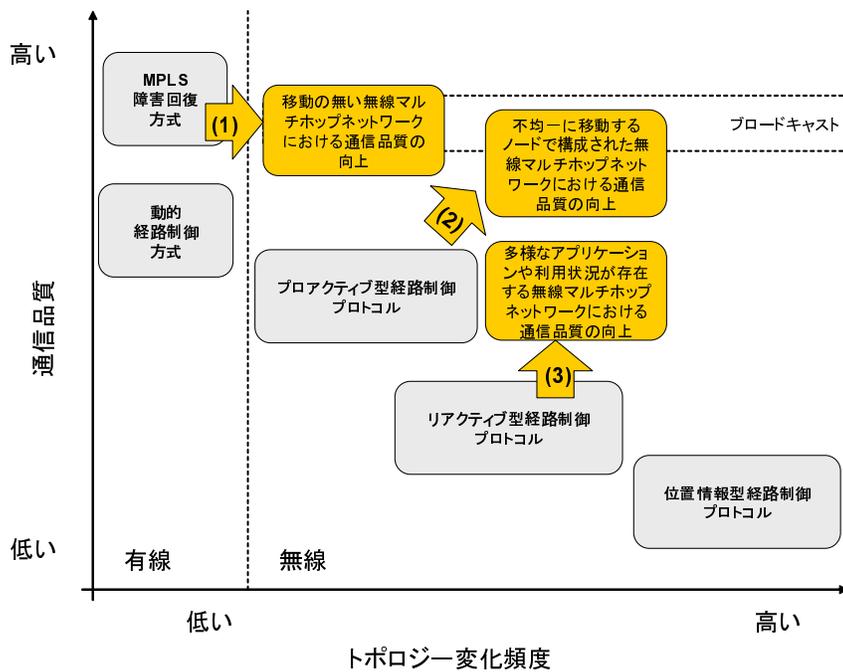


図 6.1: 本研究のカバー領域

した。実際の救助活動を想定したシミュレーションにおいて、SMART は従来方式に比べ 14%低い制御負荷で、遅延を悪化させることなく 90%以上のパケット到達率を実現できることを示した。

第 5 章では、(3) の状況を想定し、アプリケーションの通信特性やノードの移動特性に応じて最適な経路を選択するリアクティブ型経路制御方式を提案した。提案方式では、送信ノードが経路要求メッセージの中で複数のメトリック要素に対する計算重み係数を指定することで、中間ノードは送信ノードが期待する経路選択メトリックを計算でき、宛先ノードは送信ノードが望む経路選択を可能とした。シミュレーション評価によって、従来の AODV に比べて 10%以上、単一メトリックを使う場合に比べて最大 5%以上パケット到達率を改善できることを示した。さらに通信継続時間や移動速度、移動間隔等の条件により、最良のパケット到達率を実現するメトリック重み係数の組み合わせが異なるという知見を得た。今後の課題として、提案方式の実環境への適用においては状況に応じた最適な重み係数決定方式を確立する必要がある。

これらの成果により、無線マルチホップネットワークの高品質な通信が求められるアプリケーションへの適用可能性が広がったと考えている。近い将来、あらゆるものが連携して人間の活動をサポートする安心・安全なユビキタス社会の実現に本研究の成果が少しでも役に立てば幸いである。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、大変多くの方々にご指導、ご協力を賜りました。ここに、お世話になった皆様への感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり終始有益なご助言と温かい励ましのお言葉を頂きました筑波大学大学院ビジネス科学研究科 吉田 健一教授に深く感謝致します。副指導教員として適時ご指導をいただきました筑波大学大学院ビジネス科学研究科 久野 靖教授、津田 和彦教授に深く感謝致します。発表会の場などで、様々なアドバイスやコメントを下された筑波大学大学院ビジネス科学研究科教員の方々に深く感謝致します。また、吉田研究室の皆様には貴重なご意見を頂戴しました。ここに深く感謝します。

本学の博士課程入学のきっかけを与えていただき、研究と仕事の両面からいつもご指導いただきました NEC 主任研究員 地引 昌弘博士に感謝いたします。また、仕事と通学の両立をサポートしていただきました NEC 研究部長 (当時) 桐葉 佳明氏に感謝します。

最後に、いつも精神的な支えとなってくれた妻 俊慧と娘 愛に心より感謝します。

参考文献

- [Abolhasan 04] M. Abolhasan, T. Wysocki and E. Dutkiewicz, "A review of routing protocols for mobile ad hoc networks" *Ad Hoc Networks*, Vol.2 Issue 1 pp.1-22, 2004
- [Basagni 98] S. Basagni, I. Chlamtac, V. Syrotiuk and B. Woodward, "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)", *Proc. ACM/IEEE Mobi-Com*, pp.76-84, 1998
- [Benzaid 02] M. Benzaid, P. Minet and K. Al Agha, "Integrating fast mobility in the OLSR routing protocol", *Proc. IEEE MWCN*, pp.217-221, 2002
- [Benzaid 03] M. Benzaid, P. Minet, K. Al Agha, "Analysis and simulation of Fast-OLSR", *Proc. IEEE VTC*, vol.3 pp.1788-1792, 2003
- [Bianchi 00] Giuseppe Bianchi, Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol.18, no.3,pp.535-547, 2000
- [Chin 05] K-W. Chin, "The Behavior of MANET Routing Protocols in Realistic Environments", *Proc. IEICE APCC*, 2005
- [Camp 02] T. Camp, J. Boleng and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research", *Wireless Communications and Mobile Computing* Volume 2 Issue 5, pp.483-502, 2002

- [Dube 97] R. Dube, C. Rais, K-Y. Wang and S. Tripathi, "Signal Stability based Adaptive Routing (SSA) for Ad Hoc Mobile Networks", IEEE Personal Communications, vol.4 issue 1 pp.36-45, 1997
- [Gerla 00] M. Gerla, X. Hong and G. Pei, "Landmark Routing for Large Ad Hoc Wireless Networks", Proc. IEEE GlobeCom, vol.3 pp.1702-1706, 2000
- [Haas 01] Z. Haas and M. Pearlman, "The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol", ACM/IEEE Transactions on Networking, vol.9 issue 4 pp.427-438, 2001
- [Haas 02] Z. Haas, J. Halpen and L. Li, "Gossip-Based Ad Hoc Routing", Proc. IEEE INFOCOM, vol.3 pp.1707-1716, 2002
- [箱田 02] 箱田 純一, 上原 秀幸, 横山 光雄, "リンクの寿命とノードの負荷を考慮したアドホックルーティングプロトコルの特性評価", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-B No.12 pp.2108-2118, 2002
- [Hassanein 01] H. Hassanein and A. Zhou, "Routing with load balancing in wireless ad hoc networks", Proc. ACM MSWiM, pp.89-96, 2001
- [蓮池 02] 蓮池 和夫, ソンブラカシュ バンディオバダイ, 植田 哲郎, "アドホックネットワークにおける技術的課題", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-B No.12 pp.2007-2014, 2002
- [Hong 02] X. Hong, K. Xu and M. Gerla, "Scalable Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks", IEEE Network Magazine, Vol.16 issue 4 pp.11-21, 2002
- [Hou 86] T-C. Hou and V. Li, "Transmission Ranges Control in Multihop Packet Radio Networks", IEEE Transactions on Communications, vol.34 issue 1 pp.38-44, 1986

- [Karaki 04] J. Al-Karaki and A. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey", IEEE Wireless Communications, vol.11 issue 6 pp.6-28, 2004
- [Karp 00] B. Karp and H-T. Kung, "GPSR:Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks", Proc. ACM/IEEE MobiCom, pp.243-254, 2000
- [Ko 98] Y-B. Ko and N. Vaidya, "Location-aided Routing(LAR) in Mobile Ad Hoc Networks", Proc. ACM/IEEE MobiCom, pp66-75, 1998
- [Kranakis 99] E. Kranakis, H. Singh and J. Urrutia, "Compass Routing on Geometric Networks", Proc. 11 th Canadian Conference on Computational Geometry, pp.51-54, 1999.
- [Lee 99] S-J. Lee, C-K. Toh and M. Gerla, "Performance Evaluation Of Table-Driven And On-Demand Ad Hoc Routing Protocols", Proc. IEEE PIMRC, pp.297-301, 1999,
- [Lee 00] S-J. Lee and M. Gerla, "AODV-BR: Backup Routing in Ad hoc Networks", Proc. IEEE WCNC, vol.3 pp.1311-1316, 2000
- [Lee 01-1] S-J. Lee and M. Gerla, "Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Path in Ad hoc Networks", Proc. IEEE ICC, vol.10 pp.3201-3205, 2001
- [Lee 01-2] S-J. Lee and M. Gerla, "Dynamic load-aware routing in ad hoc networks", Proc. IEEE ICC, vol.10 pp.3206-3210, 2001
- [Leung 01] R. Leung, J. Liu, E. Poon, A. Chan and B. Li, "MP-DSR: A QoS-aware Multi-path Dynamic Routing Protocol for Wireless Ad-Hoc Networks", Proc. IEEE LCN, pp.132-141, 2001
- [Li 00] J. Li, J. Jannotti, D. S. J. De Couto, D. R. Karger, and R. Morris, "A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing", Proc. ACM MOBICOM, pp.120-130, 2000

- [Marina 01] M. Marina and S. Das, "On-demand Multipath Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks", Proc IEEE ICNP, pp.14-23, 2001
- [間瀬 06] 間瀬憲一, "車々間通信とアドホックネットワーク", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B No.6 pp.824-835, 2006
- [Mauve 01] M. Mauve and J. Widmer and H. Hartenstein, "A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks" IEEE Network Magazine, vol.15 issue 6 pp.30-39, 2001
- [守倉 05] 守倉 正博, 久保田 周治, "改訂版 802.11 高速無線 LAN 教科書", インプレス社, 2005
- [Nelson 84] R. Nelson and L. Kleinrock, "The Spatial Capacity of a Slotted Aloha Multihop Packet Radio Network with Capture", IEEE Transactions on Communications, vol.32 no.6 pp.684-694, 1984
- [Ni 99] S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen, and J. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network", Proc. ACM/IEEE MOBICOM, pp.151-162, 1999
- [NS2] The network simulator ns2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [OOLSR] OOLSR - Object oriented OLSR, <http://hipercom.inria.fr/OOLSR/>
- [Pahlavan 00] K. Pahlavan, P. Krishnamurphy, A. Hatami, M. Ylianttila, J. Makela, R. Pichana and J. Vallstrom, "Handoff in Hybrid Mobile Data Network", IEEE Personal Communications, vol.7 issue 2 pp.34-47, 2000
- [Pappaport 02] Theodore S.Pappaport, "Wireless Communications Principles and Practice Second Edition", Prentice Hall PTR, 2002
- [Pearlman 00] M. Pearlman, Z. Haas, P. Schlander and S. Tabrizi, "On the Impact of Alternative Path Routing for Load Balancing in Mobile Ad Hoc Networks", Proc. ACM MobiHoc, pp.3-10, 2000

- [Pei 99] G. Pei, M. Gerla, X. Hong and C. Chiang, "A Wireless Hierarchical Routing Protocol with Group Mobility", Proc. IEEE WCNC, vol.3 pp.1538-1542, 1999
- [Pei 00] G. Pei, M. Gerla and T. Chen, "Fisheye State Routing:A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks", Proc. IEEE ICC, vol.1 pp.70-14, 2000
- [Qayyum 00] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti, "Multipoint relaying: An efficient technique for flooding in mobile wireless networks", Technical Report 3898, INRIA - Rapport de recherche, 2000
- [Raja 99] J. Raja and J. Garcia-Luna-Aceves, "A New Approach to On-demand Loop-Free Multipath Routing", Proc IEEE ICCCN, pp.522-527, 1999
- [RFC793] Jon Postel et al, "Transmission Control Protocol", IETF Request for Comments 793, 1981
- [RFC2328] J. Moy, "OSPF Version 2", IETF Request for Comments 2328, 1998
- [RFC2453] G. Malkin, "RIP version 2", IETF Request for Comments 2453, 1998
- [RFC2474] K. Nichols, et al, "Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers", IETF Request for Comments 2474, 1998
- [RFC3031] E. Rosen, A. Viswanathan and R. Callon, "Multi-Protocol Label Switching Architecture", IETF Request for Comments 3031, 2001
- [RFC3272] D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja and X. Xiao, "Overview and Principles of Internet Traffic Engineering", IETF Request for Comments 3272, 2002
- [RFC3469] V. Sharma and F. Hellstrand, "Framework for Multi-Protocol Label Switching(MPLS)-based Recovery", IETF Request for Comments 3469, 2003

- [RFC3561] C. Perkins, E. Belding-Royer and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing", IETF Request for Comments 3561, 2003
- [RFC3626] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing (OLSR)", IETF Request for Comments 3626, 2003
- [RFC3684] R. Ogier, F. Templin and M. Lewis, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)", IETF Request for Comments 3684, 2004
- [RFC4090] P. Pan, G. Swallow and A. Atlas, "Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels", IETF Request for Comments 4090, 2005
- [RFC4271] Y. Rekhter, T. Li and S. Hares, "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)", IETF Request for Comments 4271, 2006
- [RFC4364] E. Rosen and Y. Rekhter, "BGP/MPLS IP Virtual Private Networks (VPNs)", IETF Request For Comments 4364, 2006
- [RFC4728] D. Johnson, D. Maltz and Y. Hu, "The Dynamic Source Routing for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4", IETF Request for Comments 4728, 2007
- [Royer 99] E. Royer and C-K. Toh, "A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks", IEEE Personal Communications, vol.6 issue 2 pp.46-55, 1999
- [斎藤 05] 斎藤 洋, 梅比良 正弘, 守倉 正博, "広域ユビキタスネットワークインフラストラクチャに向けた考察", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-B No.11 pp.2128-2136, 2005
- [Singh 98] S.Singh, M.Woo and C.S.Raghavendra, "Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks", Proc. ACM Mobicom, pp.181-190, Oct. 1998
- [Su 99] W. Su and M. Gerla, "IPv6 flow handoff in ad-hoc wireless networks using mobility prediction", Proc. IEEE GlobeCom, vol.1a pp.271-275, Dec. 1999

- [消防庁 99] 総務省消防庁, 台湾地震災害における国際消防救助隊の活動報告,
http://www.fdma.go.jp/ugoki/1999_11.02.pdf, Nov. 1999
- [Stojmenovic 02] Ivan Stojmenovic, "Home agent based location update and destination search schemes in ad hoc wireless networks", Advances in Information Science and Soft Computing, WSEAS Press, pp.6-11, 2002
- [Sucec 00] J. Sucec and I. Marsic, "An efficient distributed network-wide broadcast algorithm for mobile ad hoc networks", CAIP Technical Report 248 - Rutgers University, Sep. 2000
- [周防 06] 周防 高志, 山本 尚生, "MANETにおける受信電力情報を用いた経路算定化のための適応的フラッディング制御方式", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B No.10 pp.1950-1961, 2006
- [総務省 04] 総務省, u-Japan 政策 (「ユビキタスネット社会実現に向けた政策懇談会」最終報告書), 2004
- [総務省 05] 総務省, 平成 17 年度版情報通信白書, 2005
- [Takagi 84] H. Takagi and L. Kleinrock, "optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals", IEEE Transactions on Communications, vol.32 no.3 pp246-257, 1984
- [Tanenbaum 96] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks, Third Edition", Prentice-Hall, Inc., 1996
- [Toh 97] C-K. Toh, "Asociativity-Based Routing For Ad-Hoc Mobile Networks", Journal on Wireless Personal Communications, vol.4 No.2 pp.103-139, 1997
- [Toh 03] C-K.Toh, "アドホックモバイルワイヤレスネットワーク", 構造計画研究所, 共立出版 2003

- [Wang 04] Y-H. Wang, H-Z. Lin and S-M. Chang, "Interference on multipath QoS routing for ad hoc wireless network", Proc. IEEE ICDCS, pp.104-109, 2004
- [Williams 02] B. Williams and T. Camp, "Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks", Proc. ACM MobiHoc, pp.194-205, 2002
- [柳生 06] 柳生 智彦, 地引 昌弘, "不安定なリンクを考慮したマルチパス高信頼通信方式の提案", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B No.10 pp.1911-1920, 2006
- [柳生 07] 柳生 智彦, 地引 昌弘, 吉田 健一, "無線マルチホップネットワークにおけるアプリケーション適応型メトリックを用いたリアクティブ型経路制御方式", IEICE technical report Internet Architecture, Vol.107 No.74 pp. 29-34 IA2007-6, 2007
- [Yagyu 07-1] T. Yagyu, M. Jibiki and K. Yoshida, "A Proposal of Wireless Network Routing Protocol for Heterogeneous Mobility", IEICE Transactions on Communications, vol.E90-B No.10 pp.2693-2701, 2007
- [Yagyu 07-2] T. Yagyu, M. Jibiki and K. Yoshida, "SMART:Scalable Mobility Adaptive Routing Techniques for Heterogeneous Mobile Networks", Proc. IEEE WCNC, pp.2997-3002, 2007
- [山田 03] 山田 茂樹, 上岡 英史, "ユビキタスコンピューティング; ネットワークとアプリケーション", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J86-B No.6 pp.863-875, 2003

関連業績リスト

学術論文

1. 柳生 智彦, 地引 昌弘, ”不安定なリンクを考慮したマルチパス高信頼通信方式の提案”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B No.10, pp.1911-1920, 2006 年 10 月
2. Tomohiko Yagyū, Masahiro Jibiki and Kenich Yoshida, ”A Proposal of Wireless Network Routing Protocol for Heterogeneous Mobility”, IEICE Transactions on Communications, vol.E90-B No.10, pp.2693-2701, October 2007

国際会議論文

1. Tomohiko Yagyū, Masahiro Jibiki and Kenich Yoshida, ”SMART:Scalable Mobility Adaptive Routing Techniques for Heterogeneous Mobile Networks”, IEEE Wireless Communications & Networking Conference, pp.2997-3002, March 2007

学会発表

1. Masahiro JIBIKI, Tomohiko Yagyū, ”Distributed Routing Architecture for Scalable Traffic Engineering”, Intl. Symposium on Towards Peta-Bit Ultra-Networks (PBIT2003), pp.176 ,2003 年 9 月
2. 柳生 智彦, 地引 昌弘, ”リンクステート型経路制御機構のスケラブルな実現方式”, 情報処理学会マルチメディア・分散・協調とモバイルシンポジウム, 2001 年 7

月

3. 柏木 岳彦, 柳生 智彦, 地引 昌弘, ”無線ネットワークにおける MPLS ベース高信頼通信方式の提案”, 第 3 回情報科学技術フォーラム (FIT2004), Vol4, pp.69, 2004 年 9 月
4. 柳生 智彦, 地引 昌弘, ”無線マルチホップネットワークにおける MPLS 高信頼通信方式の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告 IA2004-15 Vol.104 No.377, pp.13-19, 2004 年 10 月
5. 柳生 智彦, 地引 昌弘, 吉田 健一, ”無線マルチホップネットワークにおけるアプリケーション適応型メトリックを用いたリアクティブ型経路制御方式”, 電子情報通信学会技術研究報告 IA2007-6 Vol.107 No.74, pp.29-34, 2007 年 5 月

その他

1. Tomohiko Yagyu, Masahiro Jibiki, ”A proposal of multipath reliable communication technique considering unstable links”, Wiley InterScience Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications) Vol.90 Issue.11 pp.1-11, 2007 年 11 月