

修士論文

アドホックネットワークにおける  
位置情報を用いたルーティング手法に関する  
研究

( A Study on Routing Method using Location Information  
for Ad Hoc Networks )



指導教員

浅野 正一郎 教授

2007年2月4日提出

東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻  
修士課程

学生証番号 66415

木村 英雄

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序章</b>	<b>1</b>
1.1	はじめに . . . . .	2
1.2	研究目的と特徴 . . . . .	3
1.3	本論文の構成 . . . . .	4
<b>第 2 章</b>	<b>本研究の背景</b>	<b>5</b>
2.1	アドホックネットワーク . . . . .	6
2.2	代表的なルーティング . . . . .	7
2.2.1	AODV . . . . .	7
2.2.2	DSR . . . . .	8
2.3	位置情報を用いたルーティング . . . . .	10
2.3.1	位置情報の取得 . . . . .	10
2.3.2	LAR . . . . .	13
2.3.3	DREAM . . . . .	15
<b>第 3 章</b>	<b>リンク寿命の予測を用いた経路探索</b>	<b>16</b>
3.1	リンク寿命の予測アルゴリズム . . . . .	17
3.2	関連研究 1 . . . . .	18
3.3	関連研究 2 . . . . .	20
<b>第 4 章</b>	<b>提案方式</b>	<b>22</b>
4.1	基本となるプロトコル . . . . .	23
4.2	概要 . . . . .	24
4.3	詳細な仕様 . . . . .	25
4.3.1	RREQ 構造 . . . . .	25
4.3.2	経路探索方法 . . . . .	25
4.3.3	中継端末による RREP 返信 . . . . .	27
4.3.4	経路表の更新条件 . . . . .	28

---

4.3.5	宛先端末による RREP 返信 . . . . .	30
4.3.6	経路探索の仕様 . . . . .	31
<b>第 5 章</b>	<b>シミュレーションモデル</b>	<b>34</b>
5.1	シミュレーション環境 . . . . .	35
5.2	各種パラメータ . . . . .	36
<b>第 6 章</b>	<b>シミュレーション結果</b>	<b>37</b>
6.1	RREQ の最適な転送閾値 . . . . .	38
6.2	中継端末による RREP の最適な返信閾値 . . . . .	45
6.3	既存手法との比較 . . . . .	52
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>59</b>
7.1	研究のまとめ . . . . .	60
7.2	今後の課題 . . . . .	61
	謝辞	62
	参考文献	63
	発表文献	65

# 第 1 章

## 序章

## 1.1 はじめに

近年、無線通信技術の発達とともに、ノートパソコン、スマートフォンといった携帯端末の普及により、携帯端末のみで自立的に構築されるネットワークであるアドホックネットワークに関する研究が盛んに行われている。アドホックネットワークの特徴として、自立的にネットワークを構築するため、無線基地局、ケーブル、ルータなどの基盤となるインフラストラクチャが必要なく、無線通信機能を持つ端末が複数あれば、即座にネットワークを構築できるという手軽さが挙げられる。こういった特徴から、災害時における利用が期待されている。

アドホックネットワークにおけるルーティングプロトコルは、通信要求が発生してから経路探索を行うリアクティブ型と、事前に経路探索を行うプロアクティブ型の2つに大きく分類される。代表的なプロトコルとして、リアクティブ型のAODV[1]、DSR[2]、プロアクティブ型のOLSR[3]などがある。

また、近年、位置情報取得技術の発達、GPS機能付きの携帯電話やカード型GPSレシーバの普及により、携帯端末による位置情報取得が容易になってきている。今後も広く普及し、位置情報がより積極的に利用されるものと考えられる。電波強度を利用した位置推定手法やセンサーネットワークにおける位置推定手法などGPS以外の位置情報取得技術に関する研究も多く行われている。アドホックネットワークにおいても、位置情報を利用したルーティング手法に関する研究が多く行われている。位置情報を利用した代表的なプロトコルとして、GPSR[4]、LAR[5]などが提案されている。その他にも、多くの位置情報を用いたルーティングに関する研究が行われている [6, 7, 8, 9, 10]。

本研究では、アドホックネットワークにおける位置情報を利用したルーティング手法に焦点を当て、AODVを元に位置情報を用いたルーティング手法の提案、及びシミュレーションを行い、実験結果の評価を行う。

## 1.2 研究目的と特徴

アドホックネットワークには、容易にネットワークを構築できるという特徴がある一方で、いくつかの問題点がある。その一つに、ネットワークトポロジが動的に変化してしまうという問題がある。アドホックネットワークは、一般的に携帯端末によって構成されており、端末の移動や電源をオフにするなどの影響を受けるためである。その結果、データ通信に使用していた経路が切断され、経路探索のためのコントロールパケットが増大し、通信帯域が逼迫されることが予想される。そこで、ネットワークトポロジの変化を事前に予測するとともに、コントロールパケットによる通信帯域の逼迫を防ぐため、位置情報を有効に活用した経路探索を行うことを目的とする。

本研究の特徴として、位置情報をより有効に活用するために、経路探索用のコントロールパケットである RREQ パケットを拡張し、送信元端末と前ホップの中継端末の位置情報だけでなく、経路上にあるその他の転送端末の経路情報も含めることを可能にした点が挙げられる。拡張された RREQ パケットを受信した端末は、既存手法より多くの端末の経路情報を自身の経路表に反映することが可能となる。その結果、各端末が経路表に保持する情報量が多くなり、経路表を元にルーティングを行うプロトコルにおいて、性能の向上が期待できる。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、アドホックネットワークについて述べる。また、位置情報の取得技術についても簡単に触れる。

第3章では、リンク寿命の予測を用いた経路探索手法について述べる。予測に用いるアルゴリズムについて説明し、そのアルゴリズムを利用した関連研究をいくつか紹介する。

第4章では、リンク寿命の予測を用いた経路探索方式の提案を行う。既存手法と異なる点についても説明する。

第5章では、シミュレーション環境や各パラメータ値について述べる。

第6章では、シミュレーション結果についての評価を行う。シミュレーションは3段階に分けて行っており、それぞれについて考察を行う。

第7章では、シミュレーションの結果をまとめ、今後の課題について記す。

## 第 2 章

### 本研究の背景



## 2.1 アドホックネットワーク

アドホックネットワークとは、1970年代米国の軍事利用を目的として開発が進められたものである。特徴としては、自立的にネットワークを構築するために無線基地局、ケーブル、ルータなどの基盤インフラストラクチャを必要とせず、無線通信機能を持つ端末が複数ある場合、即席でネットワークを構成できるという手軽さが挙げられる。このような特徴から、災害時における利用が期待されている。一方で、以下に示すような問題点もある。

- ネットワークトポロジの動的な変化
- 電波品質の急激な変動
- 端末の消費電力
- セキュリティ

各端末が移動すると、ネットワークトポロジが変化してしまうため、動きの激しい端末があると管理が難しくなる。その他にも電源をオン/オフにすることにより、トポロジ上に急に端末が出現/消滅し、トポロジが大きく変化する場合がある。また通信ルート上に障害物が存在したり、電波間で干渉が発生したりすると電波品質が大きく変わってしまう。モバイル無線端末はバッテリーによって駆動しているため、消費電力をいかに抑えるかが問題となってくる。先に述べたように、アドホックネットワークは無線端末が集団となってネットワークを構築するため、消費電力を抑え、出来るだけ長時間ネットワーク内のメンバーであり続けることによって、ネットワーク全体の通信状態も良くなるからである。その他に、データパケットを送信する過程で通信経路の周囲にある端末によって盗聴されるといった問題や、通信経路上の悪意のある中継端末がなりすましを行うといった問題など、セキュリティに関する問題もある。

## 2.2 代表的なルーティング

### 2.2.1 AODV

アドホックネットワークの代表的なルーティングプロトコルとして、AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector Routing) がある [1]。AODV は、通信要求が発生してから経路探索を行うリアクティブ型のプロトコルであり、特徴として各端末は経路表を保持している。また、パケット内に経路情報を含めずに各端末の経路表を利用してルーティングを行うことで、ヘッダサイズを小さくしオーバーヘッドを低減している。経路情報の管理に、シーケンス番号を用いており、シーケンス番号が大きいほど新しい経路であることを示している。古いシーケンス番号の経路は使用しないため、ループの防止が可能である。AODV の経路探索からデータ通信開始までとリンク切断からデータ通信再開までの二つの場面における仕様について説明する。

端末に通信要求が発生した場合、送信元端末が保持している経路表に宛先端末のエントリが有るかどうかを調べる。経路表には、宛先端末のアドレス・宛先端末のシーケンス番号・次ホップ端末のアドレス・エントリの有効期間・precursor リストといった情報が保持されている。precursor リストとは、その経路を利用する隣接端末のリストである。各エントリは、一定時間使用されなくなると無効状態になり、さらに無効状態のまま一定時間経つと経路表から削除される。経路表に宛先端末のエントリがあった場合、経路表に従ってデータパケットの送信を開始する。無かった場合、Route Request パケット (以降、RREQ) をフラッディングして経路を探索する。RREQ 内には、送信元端末と宛先端末の IP アドレス等が含まれている。フラッディングされた RREQ を受信した端末は RREQ 内の宛先端末の IP アドレスを調べ、自身の IP アドレスと一致すれば自身が宛先端末であるため、経路表を更新して送信元端末へ Route Reply パケット (以降、RREP) を送信する。一致しない場合、経路表を更新した後、自身の経路表に宛先端末のエントリが無いか調べ、あった場合も、送信元端末へ RREP を送信する。経路表に宛先端末のエントリが無かった場合、再び RREQ をフラッディングする。RREQ が宛先端末に届く、あるいは経路表内に宛先端末のエントリを持つ中継端末に届

くまで、RREQの転送は繰り返される。こうしてRREQを受信した端末は、経路表を更新した後、経路表内の送信元端末のエントリに基づきRREPを送信する。RREPを受信した中継端末は経路表を更新後、経路表に基づきRREPを転送する。送信元端末に到達するまでRREPの転送が繰り返され、RREPを受信した送信元端末はデータパケットの送信を開始する。以上が経路探索からデータ通信開始までの流れである。

データ通信に使用していたリンクが切断された場合、経路表内のprecursorリストを用いてリンク切断によって影響を受ける隣接端末にRoute Error パケット(以降、RERR)を送信し、RERRを受信した端末は経路表内のリンクが切断された端末のエントリを無効化する。また、AODVには、有効な経路に含まれている隣接端末とのリンク状態を確認するためにHELLOメッセージを定期的にブロードキャストする機能もある。

以上のような仕様となっていることから、動きの激しい端末が多い場合などネットワークポロジが頻繁に変更する時に高い性能を発揮する一方で、まだ有効な経路情報を経路表から消去してしまう危険性がある。

### 2.2.2 DSR

アドホックネットワークのもう一つの代表的なルーティングプロトコルとして、DSR(Dynamic Source Routing)がある[2]。DSRもAODV同様、通信要求が発生してから経路探索を行うリアクティブ型のプロトコルである。特徴として、送信元端末が宛先端末への経路を指定して通信を行う。DSRの経路探索からデータ通信開始までと、リンク切断からデータ通信再開までの二つの場面における仕様について説明する。

各端末はキャッシュを持っており、今までに送受信した経路情報が蓄えられている。端末に通信要求が発生した場合、送信元端末が保持しているキャッシュに宛先端末への経路情報が有るかどうかを調べる。有った場合は、その経路情報を使ってデータ通信を開始する。無かった場合、自身の端末IDを経路情報に入れたRREQをフラッディングする。フラッディングされたRREQを受信した端末は、経路情報をキャッシュに追加後、RREQの宛先を調べる。宛先が自分自身である

場合、キャッシュされた経路情報を逆転させた経路を生成し、送信元端末へ RREP を送信する。宛先が自分自身でない場合、自身のキャッシュに宛先端末までの経路情報があるか調べる。経路情報があった場合、送信元端末へ RREP を送信する。無かった場合、自身の端末 ID を経路情報に追加した RREQ を再びフラディングする。なお、パケットの経路情報に自身の ID が含まれていればフラディングせずに破棄する。宛先端末あるいは宛先端末の経路情報を保持している端末に届くまで RREQ の転送を繰り返す。こうして RREQ を受信した端末は、キャッシュに経路情報を追加後、キャッシュされた経路情報を逆転させた経路情報を持つ RREP を送信する。RREP を受信した送信元端末はデータパケットの送信を開始する。以上が経路探索からデータ通信開始までの流れである。

データ通信に使用していたリンクが切断した場合、キャッシュからそのリンクを含む経路情報を削除する。そのリンクを利用してパケットを送信したすべての送信元端末へ RERR を送信する。RERR を受信した端末は、キャッシュからそのリンクを含む経路情報を削除する。また、DSR では使用していた経路が切断した時、すぐに RERR を送信するのではなく、自身のキャッシュに代替経路があるか調べ、あった場合パケットの経路情報を書き換えてデータ通信を再開する Packet Salvage 機能もある。

以上のような仕様となっていることから、ネットワークトポロジがあまり変化しない場合に高い性能を発揮する一方で、経路長が長くなるにつれ、パケットサイズが大きくなるため、長距離の通信になるほどオーバーヘッドも増大してしまう。

## 2.3 位置情報を用いたルーティング

### 2.3.1 位置情報の取得

携帯端末が位置情報を取得する方法として、4つの手法を紹介する。GPSを用いる手法では絶対位置が把握可能である。一方、その他の手法では端末間の相対位置が把握可能であり、また一部GPS機能を搭載している端末があれば絶対位置の把握が可能となる。以下では、各手法についてアドホックネットワークに適応することを考慮した上で紹介する。

#### GPS

GPS(Global Positioning System)の測位方式は大きく分けて、単独測位と相対測位の2種類ある。

単独測位とは、衛星から受信される信号のみを用いて位置を測位する方式である。位置情報として3次元情報を要求する場合、受信機の時計誤差を考慮して少なくとも4つ以上の衛星からの信号を受信する必要がある。単独測位の場合、測位精度に10m程度の誤差が生じる。精度劣化の原因としては、マルチパスの影響や衛星位置の誤差、電離層による影響などがある。

相対測位には、そういった誤差を補正するため、受信機近隣にある基地局があらかじめGPSを用いて距離を測定し、その誤差を加味して受信機の位置測位を行うDGPSなどがある。DGPSでは、測定精度を数mにまで向上させることができる。しかし、アドホックネットワークでの利用を考えると災害が発生した場面など既存基地局が使用できない状況が想定されることから、単独測位が望ましい。

一般的に、単独測位は静止または運動している物体の概ねの位置を測位するのに用いられるのに対し、相対測位は、静止している物体の正確な位置を測位するのに用いられる。

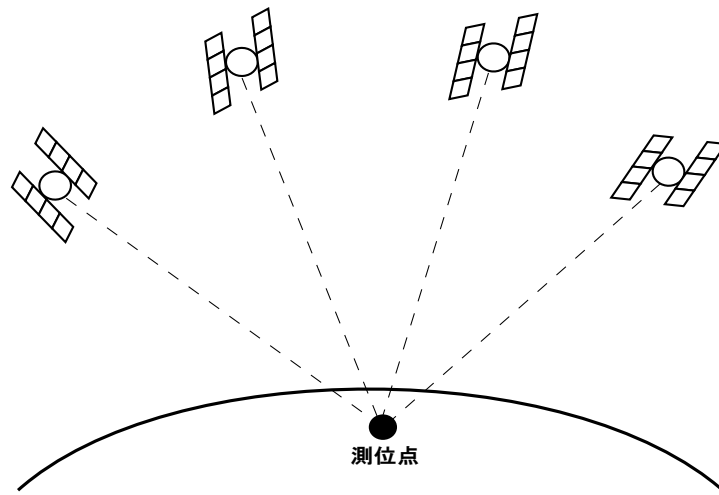


図 2.1: 単独測位

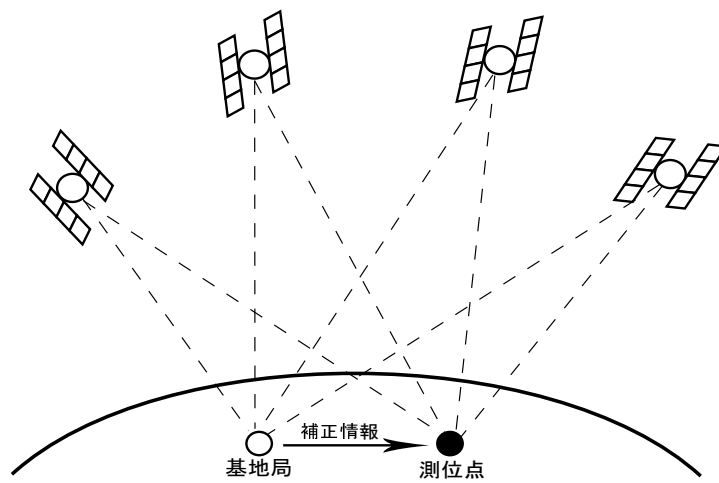


図 2.2: 相対測位

### AOA

AOA(Angle of Arrival) の測位方式は周囲の端末からの電波到来方向を測定し、複数の端末の電波到来方向から位置を推定する手法である。3次元の位置を測定するには、3つの端末の電波到来方向を用いて位置を計算する。AOAを用いて絶対位置を測定するためには、周囲の端末はGPS等を搭載し絶対位置を把握している必要がある。また、電波到来方向を測定するために指向性アンテナを備えている必要がある。アドホックネットワークにAOAを適用して位置推定を行う研究も行われている [11]。

### RSSI

RSSI(Received Signal Strength Indicator) の測位方式は距離による受信強度の減衰を利用する手法である。周囲の端末から発せられた信号を端末がどの程度の電波強度で受信するかを測定し、その値をもとに距離を計算する手法である。マルチパスなどの影響で測位精度が変化する。アドホックネットワークにRSSI測位方式を用いて位置推定を行う研究も行われている [12, 13]。

### TOA

TOA(Time of Arrival) の測位方式は、電波が送信されてから受信するまでの時間を計測し、そこから端末間の距離を求める手法である。その際に、端末間で完全に時刻の同期を取っている必要がある。測位には、赤外線、高周波、超音波等を用いる。さらに、TOAを応用したものとして、TDOA(Time Difference of Arrival) がある。この測位方式は複数の端末からの電波到達時間差を計算し、その値より絶対位置を求める手法である。この手法では、電波が送信された時刻を知らなくても計算が可能である。3次元の位置情報を計測するには、周囲に3つ以上の端末からの電波を受信する必要がある。

### 2.3.2 LAR

LAR(Location Aided Routing) は、位置情報を用いることで RREQ の送信範囲を制限し、RREQ の送信回数を削減する手法である。[5]LAR には LAR1・LAR2 の 2 つの手法がある。

LAR1 では、送信元端末は、宛先端末が位置していると思われる範囲を Expected Zone として指定する。Expected Zone は、宛先端末の過去の位置情報を元に決定される。時刻  $t_0$  に宛先端末の位置情報を把握し、時刻  $t_1$  に RREQ をフラッディングする場合、宛先端末の過去の位置を中心とした半径が  $v \cdot (t_1 - t_0)$  の円を Expected Zone とする。 $v$  は、端末の最大移動速度である。もし、手元に宛先端末に関する位置情報がなければ、ネットワーク全体を Expected Zone とする。次に送信元端末は、Expected Zone から宛先端末までの経路発見のためパケット転送を許す範囲を Request Zone として指定する。送信元端末の現在位置と Expected Zone を含む最小の長方形を Request Zone として指定する。宛先端末は RREQ 受信後、送信元端末に向けて RREP を送信する。もし、一定時間待っても送信元端末が RREP を受信しなければ、Request Zone を広げて RREQ を再送する。図 2.3 にて LAR1 を適用した例を示す。送信元端末である端末 A が宛先端末である端末 E へ RREQ をフラッディングする様子を表わしている。

LAR2 では、送信元端末は宛先端末との距離を計算しそれにある一定の値を足した値を RREQ の中に含める。RREQ を受信した中継端末は、そこから宛先端末までの距離を計算し、RREQ 内の値より小さければ RREQ を転送する。このようにして RREQ を受信した宛先端末は RREP を送信元端末へ送信する。その様子を図 2.4 に示す。

この手法により、事前に宛先端末までの位置情報を把握している場合、RREQ の送信量を削減できる。一方で、位置情報を把握していない場合、従来のフラッディングを行うため、性能は向上しない。また不規則なトポロジへの対応は困難である。



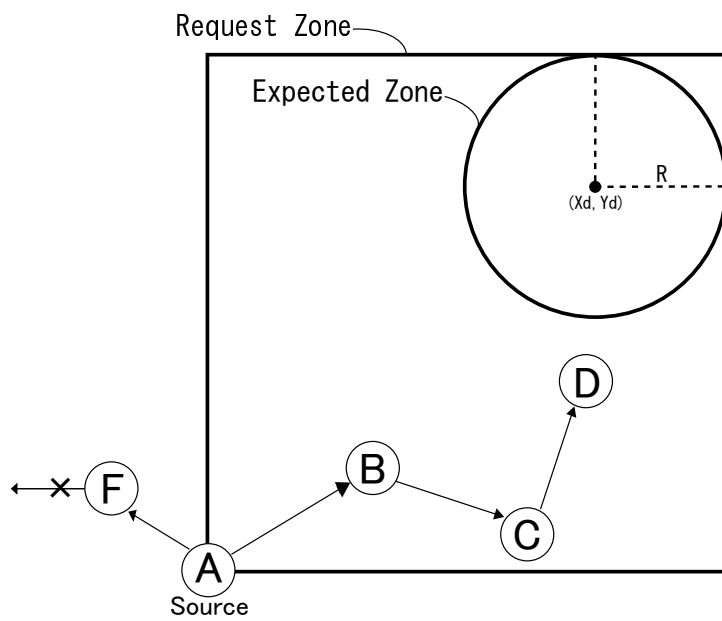
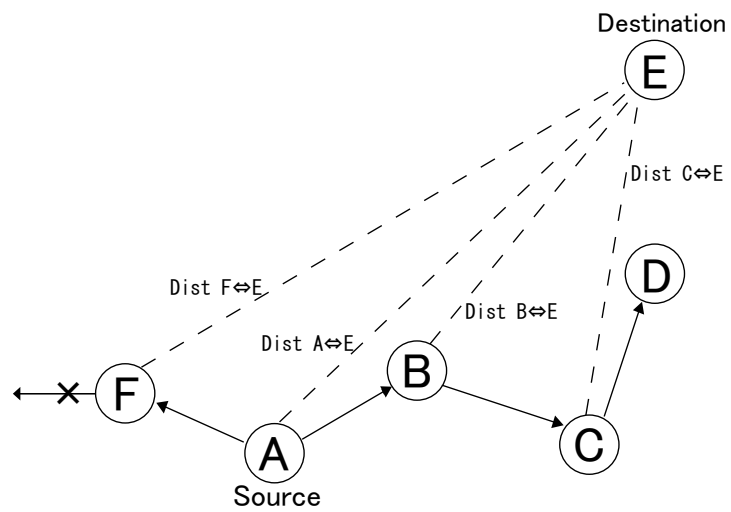


図 2.3: LAR1



・  $\text{Dist } F \leftrightarrow E < \text{Dist } A \leftrightarrow E < \text{Dist } B \leftrightarrow E, \text{Dist } C \leftrightarrow E$  の場合

図 2.4: LAR2

### 2.3.3 DREAM

DREAM(A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility) では、事前に端末の位置情報を他の端末へ通知・更新する制御パケットの送信回数を削減する手法である [14]。そして、送信元端末にデータ要求が発生した場合、送信先端末の位置情報から方角を計算し、その方角にある端末に向けてデータを送信する位置情報用のコントロールパケットの送信頻度をデータ送信に影響を及ぼさない程度に抑えるものである。その際に重要になるのが、端末の移動速度と端末間の距離である。

端末の移動速度が速ければ、位置情報の変化も激しく頻繁に位置情報を知らせる必要があるため、コントロールパケットの送信回数を多くするが、情報が古くなるスピードも速いため、パケットの TTL(Time To Live) は短く設定されており、近隣の端末にのみ情報を通知するようにしている。移動速度が遅いもしくは移動していない場合は頻繁に位置情報を知らせる必要がないためコントロールパケットの送信回数を少なくする一方、情報が古くなるスピードも遅いため、コントロールパケットの TTL を長く設定し、より遠方の端末まで位置情報を知らせることが可能となっている。このようにすることで、状況に応じて各端末に効率的に位置情報を知らせることが可能となる。

[15] では、移動モデル、通信モデルを変化させた様々な状況下において、前節で述べた LAR と DREAM の性能を比較している。

## 第 3 章

# リンク寿命の予測を用いた経路探索

### 3.1 リンク寿命の予測アルゴリズム

2つの端末が互いに通信範囲内に存在し、各端末とも自身の位置・移動方向・移動速度を把握している場合を想定する。互いの端末間にリンクを確立した場合、そのリンクの接続継続時間(以降、リンク寿命)を計算によって予測することが可能となる[16]。端末*i*と端末*j*が互いの通信距離*r*内で通信する場合を想定する。また、端末*i*、*j*の各座標を( $x_i, x_j$ )、各速度を( $v_i, v_j$ )、移動方向を( $\theta_i, \theta_j$ )とする。端末間のリンク寿命( $D_t$ )を求めるアルゴリズムとして、以下の式を用いる：

$$D_t = \frac{-(ab + cd) + \sqrt{(a^2 + c^2)r^2 - (ad - bc)^2}}{a^2 + c^2}$$

$$a = v_i \cos \theta_i - v_j \cos \theta_j$$

$$b = x_i - x_j$$

$$c = v_i \sin \theta_i - v_j \sin \theta_j$$

$$d = y_i - y_j$$

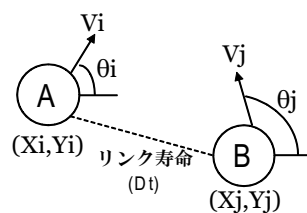


図 3.1: 端末間のリンク寿命

上記の式は、各端末が将来も計算時と同じ移動をすることを前提としており、計算後に端末の移動方向や移動速度が変化した場合、リンク寿命は予測値とは異なってくる。[16]では、上記のリンク寿命予測アルゴリズムを用いて、三つのプロトコルを提案している。そのうちユニキャストプロトコルである FORP を、次で紹介する。

## 3.2 関連研究 1

FORP(Flow Oriented Routing Protocol) では、前節で説明したリンク寿命予測アルゴリズムを用いて、隣接端末間のリンク寿命から経路全体の寿命を予測している [16]。経路全体の寿命は、経路上にある各端末間のリンク寿命の最小値である。図 3.2(a) に経路構築の例を示す。

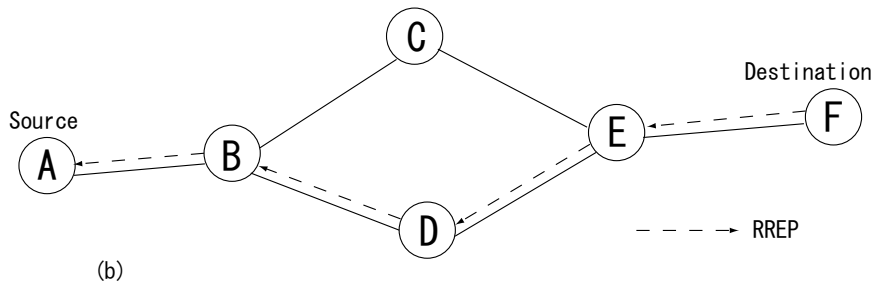
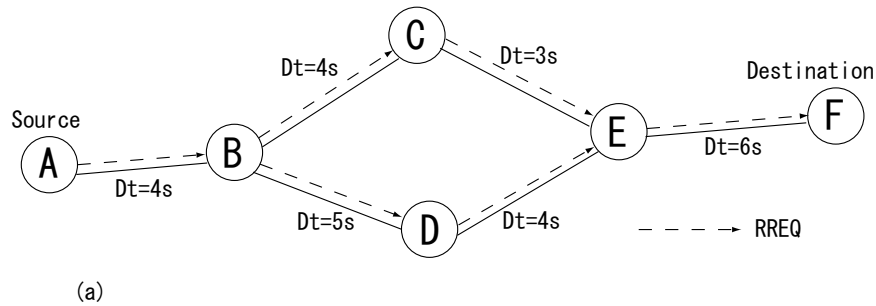


図 3.2: FORP

送信元端末 A において送信要求が発生すると、自身の位置情報を入れた RREQ を、宛先端末である端末 F までの経路探索のため、フラッディングする。端末 B,C,D,E は RREQ を受信すると、自身の端末 ID と位置情報、上記のアルゴリズムを用いて計算されたリンク寿命の値を RREQ へ付け加え、隣接端末へ転送する。

この例では、端末 F は 2 個の RREQ を受信したとする。1 つ目の RREQ には経路= $\langle A, B, C, E, F \rangle$  でリンク寿命= $\langle 4, 4, 3, 6 \rangle$  と記されており、2 つ目の RREQ には経路= $\langle A, B, D, E, F \rangle$  でリンク寿命= $\langle 4, 5, 4, 6 \rangle$  と記されている。経路寿命は経路内のリンク寿命の最小値であるので、経路= $\langle A, B, C, E, F \rangle$  の経路寿命=3 となり、経路= $\langle A, B, D, E, F \rangle$  の経路寿命=4 となる。端末 F は経路寿命の長い経路を選択するため、ここでは、経路= $\langle A, B, D, E, F \rangle$  を通信経路として選択する。宛先端末は、経

路選択後は選択した経路に対して RREP を送信する。端末 F は、経路上にある端末 A,B,D,E,F に向けて RREP を送信する。その様子を図 3.2(b) に示す。

この手法では、使用可能な経路から最も長時間使用できる経路を選択するため、頻繁なリンクの切断を抑制できる。一方で、リンク寿命がどんな値であろうと RREQ を転送するため、すぐにリンク切れを起こしてしまうような RREQ まですべて転送してしまう。データ通信に使用する経路は、宛先端末に届いた RREQ の中から、リンク寿命が長い RREQ が選ばれるため、宛先端末には多くの RREQ が届いた方が選択肢が多くなる。しかし、リンク寿命の短い RREQ が選ばれる可能性は低く、使用される可能性の低い短いリンク寿命の RREQ を転送することは、限られた通信帯域を逼迫する一因となってしまう。このような点から、リンク寿命の短い RREQ を転送することは無駄が多いといえる。

### 3.3 関連研究 2

関連研究 1 では、リンク寿命値がどんな値であっても RREQ を転送していた。しかし、前節で説明したように、これには無駄が多いため、リンク寿命に対して閾値を設定し、RREQ の転送を行うか判断する方式が提案されている [17]。このようにすることで、データ通信を開始してもすぐに切断されてしまうような無駄な RREQ の転送を制限するとともに、一定時間以上の経路寿命を持つ安定した経路の構築が可能となっている。

具体的には、RREQ を受信した端末は、RREQ 内の位置情報と自身の位置情報から前ホップの中継端末とのリンク寿命を計算し、あらかじめ設定してある閾値と比較し、閾値を上回れば RREQ を転送し、閾値以下ならば RREQ を破棄する。転送する場合は、RREQ 内の位置情報を自身の位置情報に更新する。さらに、受信した RREQ 内の経路寿命に比べて計算したリンク寿命が短い場合、RREQ 内の経路寿命もそのリンク寿命値に置き換える。このようにして転送されてきた RREQ を宛先端末が受信すると、送信元端末へ RREP を送信する。

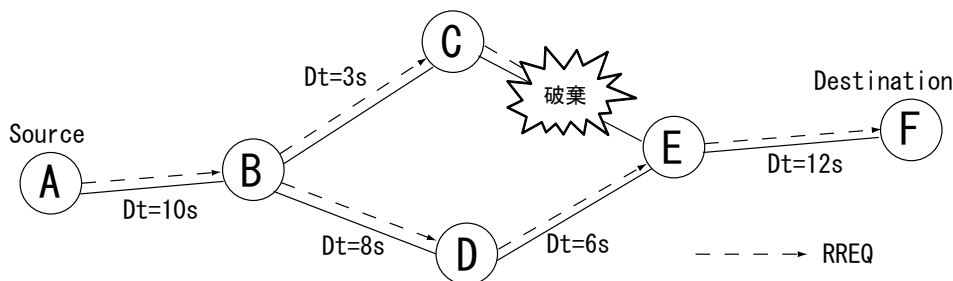


図 3.3: 既存手法による RREQ 転送の様子

図 3.3 に閾値を 5 秒に設定した場合の一例を示す。送信元端末である端末 A が宛先端末である端末 F に経路探索のため、RREQ をフラッディングしている。端末 A からフラッディングされた RREQ を受信した端末 B は、RREQ の端末 A の位置情報から端末 A とのリンク寿命を計算する。例では、端末 A・B 間のリンク寿命が 10 s であり、閾値である 5 s 以上であることから、自身の位置情報・リンク寿命を格納した RREQ を転送する。端末 B からの RREQ を受信した端末 C でも同様に、端末 B・C 間のリンク寿命を計算する。例では、端末 B・C 間のリンク

寿命が 3 s であり、閾値である 5 s 未満であることから、RREQ は転送されず、破棄される。結果として、宛先端末である端末 F は、経路= $\langle A, B, D, E, F \rangle$  を通ってきた RREQ のみを受信する。こうすることで、ある一定時間以上接続可能な安定した経路を確立でき、すぐに切断してしまうような経路情報を持つ RREQ の無駄な転送を防ぐことが可能となる。

[18] ではさらに拡張し、リンク切断前に新たな経路へと更新することで通信経路を安定化させ、リンク切断回数を削減する手法が提案されている。



## 第 4 章

### 提案方式

## 4.1 基本となるプロトコル

本稿では AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector Routing) を基にして提案を行う。AODV では各端末が経路表を保持しており、通信要求が発生した場合、その経路表に基づきルーティングを行う。端末に通信要求が発生した場合、送信元端末が保持している経路表に宛先端末のエントリが有るかどうかを調べ、有った場合、経路表に従ってデータパケットの送信を開始する。無かった場合、RREQ をフラッディングして経路を探索する。RREQ 内には、送信元端末と宛先端末の IP アドレス等が含まれている。フラッディングされた RREQ を受信した端末は RREQ 内の宛先端末の IP アドレスを調べ、自身の IP アドレスと一致すれば経路表を更新して送信元端末へ RREP を送信する。一致しない場合は経路表を更新した後、再び RREQ をフラッディングする。RREQ が宛先端末に届くまで、この作業を繰り返す。宛先端末は RREQ を受信し、経路表を更新した後、経路表内の送信元端末のエントリに基づき RREP を送信する。RREP を受信した中継端末は経路表を更新後、経路表に基づき RREP を転送する。送信元端末に到達するまでこのような作業を繰り返し、RREP を受信した送信元端末はデータパケットの送信を開始する。以上が AODV の基本的な仕組みである。

## 4.2 概要

先に述べたように位置情報を用いてルーティングを行う場合、各端末の位置情報を用いることで非常に精度の高い経路寿命の予測を行うことが可能である。既存手法では、送信元端末から宛先端末までの経路寿命を経路上にある中継端末の位置情報も用いて予測している。つまり、経路上にある全端末の位置情報を用いて、経路寿命を予測している。しかし、既存手法では経路上の中継端末の位置情報は経路寿命の予測に用いるのみであり、精度の高い位置情報を有効に活用しているとは言い難い。そこで、この精度の高い位置情報をより有効に活用することを目的とした方式を提案する。

位置情報をより有効に活用するために、RREQ パケットに送信元端末と前ホップの中継端末の位置情報だけでなく、経路上にあるその他の転送端末の経路情報も含めることで、RREQ を受信した端末は既存手法より多くの端末の経路情報を自身の経路表に反映することが可能となる。このようにすることで、各端末が経路表に保持する情報量も多くなり、経路表を元にルーティングを行う AODV において、性能の向上が期待できる。

## 4.3 詳細な仕様

### 4.3.1 RREQ 構造

ここで提案方式における RREQ パケットのフレーム構造を図 4.1 に示す。位置情報を用いた既存手法における RREQ パケットは、元々の AODV の RREQ パケット内に送信元端末・前ホップの中継端末の位置情報とそれまでの経路寿命値を格納できるようにフレーム構造を拡張している。今提案では、送信元端末・前ホップの中継端末以外の中継端末の IP アドレスと経路寿命値も複数分格納できるように、さらにフレーム構造を拡張した。

既存手法のRREQ	提案手法のRREQ
SrcのIPアドレス, シーケンス番号	SrcのIPアドレス, シーケンス番号
DestのIPアドレス, シーケンス番号	DestのIPアドレス, シーケンス番号
Flooding ID,Hop数..etc	Flooding ID,Hop数..etc
直前Hop端末の位置情報 (座標,進行方向)	直前Hop端末の位置情報 (座標,進行方向)
経路寿命	経路寿命
	IPアドレス[1], 経路寿命[1]
	⋮
	IPアドレス[n], 経路寿命[n]

図 4.1: RREQ のフレーム構造

### 4.3.2 経路探索方法

拡張した RREQ パケットを使った経路探索方法を説明する。通信要求が発生し、送信元端末の経路表に宛先端末のエントリが無い場合、RREQ 内に自身の位置情報を IP アドレスと共に格納してフラッディングする。RREQ を受信した 1 ホップ目の端末は、経路表を更新した後、次ホップ端末がリンク寿命を計算できるように、自身の位置情報を RREQ パケットの直前ホップ端末の位置情報フィールドに、経路寿命の値を経路寿命フィールドに格納し、フラッディングする。RREQ を受信

した2ホップ目の端末は、1ホップ目と同様にRREQ内に格納されている位置情報から、前ホップの中継端末とのリンク寿命値を予測した後、経路表を更新する。次に、RREQを既存手法で説明した方法と同様にして作成する。新たに設けたIPアドレス[1]フィールドと経路寿命[1]フィールドには、前ホップ端末のIPアドレスと先ほど予測した前ホップの中継端末とのリンク寿命値を格納し、再びRREQをフラディングする。2ホップ目までは、既存手法と提案手法での各端末の経路表内に格納される情報は全く同一である。1ホップ目の端末では、経路表に送信元端末の1端末分の情報を、2ホップ目の端末では、経路表に送信元端末と前ホップの中継端末(1ホップ目の端末)の2端末分の情報を格納する。

3ホップ目の端末ではRREQを受信した後、2ホップ目の端末と同様に経路寿命を予測し経路表を更新するが、2ホップ目では送信元端末と前ホップの中継端末の情報を更新したのに対し、3ホップ目では新たにRREQ内に設けたフィールドの中継端末の情報をを用いて、その他の端末の情報も経路表に更新する。すなわち、3ホップ目では、送信元端末、前ホップの中継端末(2ホップ目)以外に1ホップ目の端末情報もRREQ内に格納されており、経路表への更新が可能となる。このようにすることで、4ホップ目の端末では、送信元端末、前ホップの中継端末(3ホップ目)以外に1ホップ目、2ホップ目の端末情報が経路表に更新可能となる。ここでは、新たに設けるRREQの中継端末用の経路記憶フィールド数を制限せずに説明したが、シミュレーションにおいては、フィールド数を1~4個に制限している。

各端末において、RREQからどれだけの新しい位置情報が入手可能かを考慮すると、RREQ内に新たに設けた中継端末用のフィールドが $n$ 個ある場合、

- $X$ ホップ目の端末 ( $2 < X < n+2$ ):1ホップ目から  $(X-2)$ ホップ目までの端末情報を経路表に更新可能
- $X$ ホップ目の端末 ( $n+2 \leq X$ ):1ホップ目から  $n$ ホップ目までの端末情報を経路表に更新可能

以上に述べた方式を図4.2に示す。図4.2では、3ホップ目、4ホップ目、宛先端末(D端末)において、既存手法では得られなかった中継端末との経路寿命の値を経路表に更新することが可能となる。

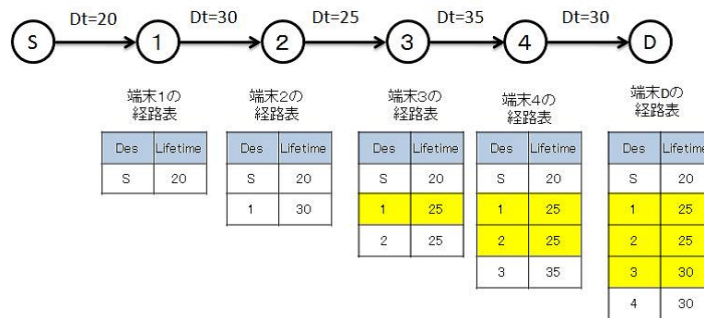


図 4.2: 提案手法による RREQ 転送経路表更新の様子

このようにすることで、RREQを受信した端末は、精度の高い位置情報を用いて予測した中継端末との経路寿命の値も自身の経路表に反映することが可能となる。こうして、各端末が自身の経路表内の情報を充実させることで、隣接端末からRREQを受信した場合に自身の経路表内に宛先端末のエントリがある可能性が高くなる。経路表内に宛先端末までのエントリがあった場合、送信元端末へRREPを送信するだけであり、RREQをさらにフラッディングする必要がなくなるため、RREQの転送回数を抑えることが可能となる。また、RREPの転送回数についても、中継端末によってRREPが送信されると、宛先端末によって送信される場合と比較して、ホップ数の関係から少なくなる。しかし、既存手法と比べると、RREQに含める情報量を増やすことで1つあたりのパケットサイズが増大してしまい、1回のRREQ転送に掛かる転送時間が増大してしまうことから、パケットサイズの増加と転送回数の削減がトレードオフの関係にあるといえる。

### 4.3.3 中継端末による RREP 返信

従来のAODVでは、中継端末がRREQを受信すると、自身の経路表でのRREQの宛先端末のエントリの有無を調べ、有った場合は送信元端末にRREPを送信する。しかし、この場合、経路表に宛先端末のエントリがあると無条件でRREPを送信してしまうため、経路寿命をまったく考慮していない。そこで、中継端末の経路表に宛先端末のエントリが有った場合でも、無条件にRREPを返信するので

はなく、一定の閾値を設け、その閾値以上の経路寿命の場合にのみ RREP を返信できるようにする。閾値以下の場合、RREQ のフラッディングを行う。

#### 4.3.4 経路表の更新条件

従来の AODV では、受信したコントロールパケット内の経路情報を自身の経路表に更新する際の条件は、全部で三つある。一つ目は、宛先端末のエントリが自身の経路表にない場合である。二つ目は、経路表の宛先端末のエントリにあるシーケンス番号よりパケット内のシーケンス番号の方が大きい場合である。三つ目は、経路表の宛先端末のエントリにあるシーケンス番号とパケット内のシーケンス番号が同じでかつ、パケット内の経路のホップ長の方が短い場合である。

今手法では、端末の位置情報を用いて経路寿命の予測を行っているため、ホップ長の代わりに経路寿命の値を経路表の更新条件に入れている。経路表の更新条件には、以下の三つがある。

- 宛先端末のエントリが自身の経路表にない
- 経路表の宛先端末のエントリにあるシーケンス番号よりパケット内のシーケンス番号の方が大きい
- 経路表の宛先端末のエントリにあるシーケンス番号とパケット内のシーケンス番号が同じでかつ、そのエントリのリンク切れ時刻より、パケット内の経路寿命と現在時刻を加算した値の方が長い

そして、経路表を更新する際には、宛先端末エントリの有効期間フィールドに経路寿命の値と現在時刻を加算した値を将来のリンク切れ時刻として格納する。この値を元に以降受信するコントロールパケットの経路情報を経路表に更新するか決める。

しかし、この更新条件には問題がある。シーケンス番号が同じ場合、リンク切れ時刻の大小で経路表を更新するか判断するため、経路寿命値が同じでも、コントロールパケットを受信したわずかな時間差で後から来たコントロールパケットの経路情報を自身の経路表へ更新してしまう。このことにより生じる問題を、図

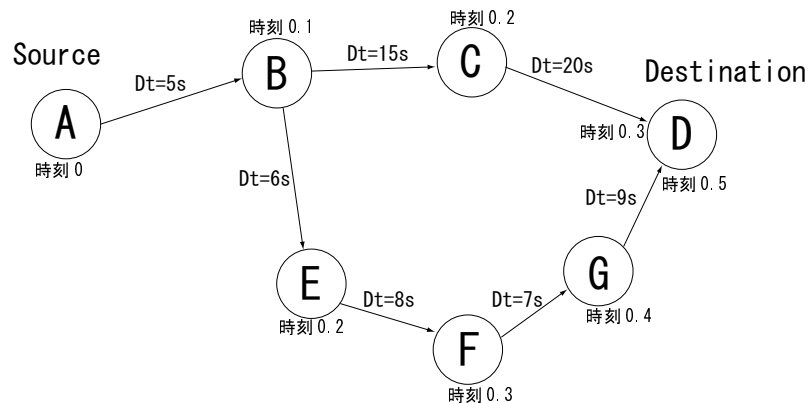


図 4.3: 経路表更新による問題

4.3 を用いて説明する。図では、送信元端末である A が宛先端末である D へ RREQ を送信する様子を表わしている。ここでは、 $\langle A \ B \ C \ D \rangle$  と  $\langle A \ E \ F \ G \ D \rangle$  の二つの経路が発見されたとする。 $\langle A \ B \ C \ D \rangle$  の経路では、 $\langle A \ B \rangle$  間のリンク寿命が全経路の最小値となるため、経路寿命は 5 s となる。同様に、 $\langle A \ E \ F \ G \ D \rangle$  の経路でも  $\langle A \ B \rangle$  間のリンク寿命が全経路の最小値となるため、経路寿命は 5 s となる。しかし、 $\langle A \ E \ F \ G \ D \rangle$  を含む RREQ の方が、経路長が大きいため、D への到着時刻が遅くなり、その分その時点の時刻と経路寿命を足した値であるリンク切れ時刻も遅くなるため、D の経路表にある A のエントリーには、逆経路である  $\langle D \ G \ F \ E \ A \rangle$  の経路情報が格納される。データ通信時には、経路として  $\langle A \ E \ F \ G \ D \rangle$  が使用される。

結果的に、経路表に格納される宛先端末への経路のホップ長が長くなりやすく、データ通信に使用される経路のホップ長も長くなってしまふ。端末はランダムに移動を行うことから、ホップ長が長くなるにつれ、予測とは異なる方向に移動する確率も高くなってしまい、結果として予測した経路寿命より早い時刻にリンク切れを起こす確率も高まる。

そこで、このような問題に対処するため、シーケンス番号が同じ場合、閾値を設けて、経路表を更新するか判断する。具体的には、シーケンス番号が同じ場合、従来の経路表の宛先端末のリンク切れ時刻の代わりに、そのリンク切れ時刻にある一定の閾値を足した値を用いて、その値よりパケット内の経路寿命と現在時刻を足した値の方が大きい場合に経路表の更新を行う。このようにすることで、わ



ずかな時間差で受信したコントロールパケットによる経路表の頻繁な更新を防ぐことが可能となる。

#### 4.3.5 宛先端末による RREP 返信

従来の AODV では、宛先端末が送信元端末から送信された RREQ を受信すると、ただちに RREP を送信元端末へ送信する。しかし、経路寿命の予測を用いて経路探索を行う場合、宛先端末がただちに RREP を送信すると、図 4.4 に示したような問題が起こる。

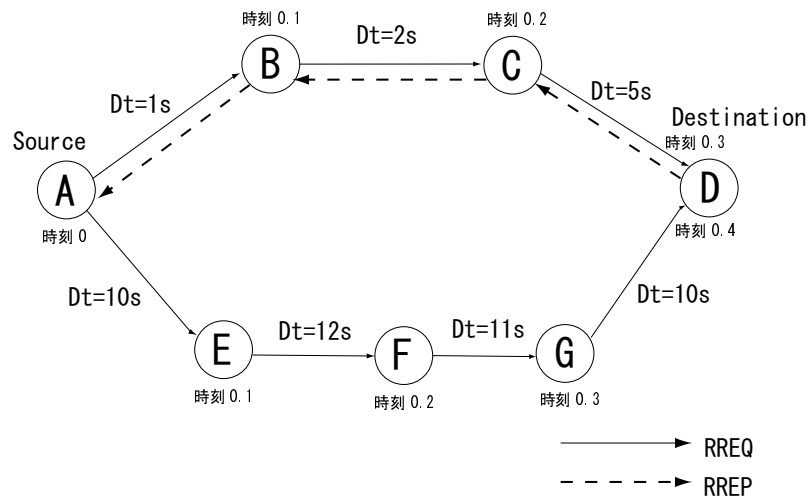


図 4.4: 従来の AODV における RREP 返信の様子

図 4.4 は、送信元端末である端末 A が宛先端末である端末 D までの経路の探索を行う様子を示している。端末 D では、 $\langle A \ B \ C \ D \rangle$  の経路情報を持つ RREQ を時刻 0.3 で受信後、時刻 0.4 で  $\langle A \ E \ F \ G \ D \rangle$  の経路情報を持つ RREQ を受信したとする。従来の AODV では、宛先端末は RREQ を受信後、ただちに RREP を返信するため、最初に受信した  $\langle A \ B \ C \ D \rangle$  の経路情報を持つ RREQ に対して RREP を返信する。しかし、 $\langle A \ B \ C \ D \rangle$  の経路寿命は、端末間のリンク寿命の最小値となることから 1 s となる。それに対して、2 目目に受信した  $\langle A \ E \ F \ G \ D \rangle$  の経路情報を持つ RREQ は、経路寿命が 10 s となる。これでは、より長時間使用可能な経路情報を無視することになり、位置情報を用いた経路寿命の計算が無駄となってしまふ。

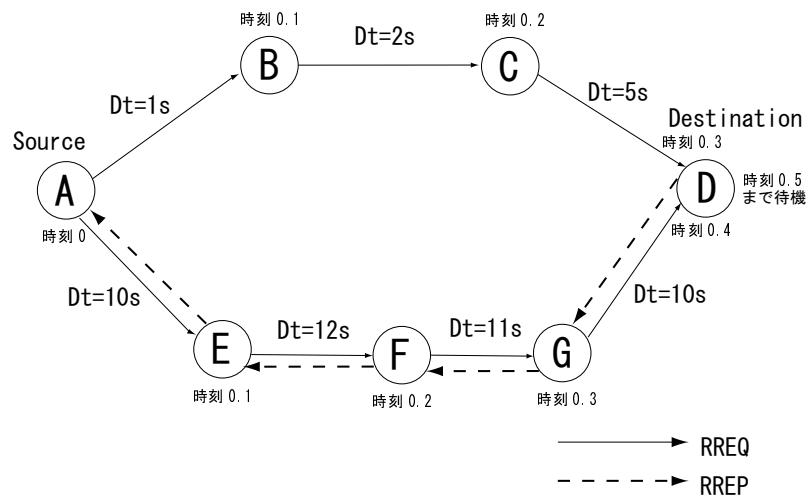


図 4.5: リンク寿命予測を用いた手法における RREP 返信の様子

そこで、宛先端末が1つ目のRREQを受信した場合、ただちにRREPを送信するのではなく、RREPの経路情報を保存後、一定時間待機する。待機中にその他のRREQを受信しなかった場合、そのRREQに対してRREPを返信する。待機中に複数のRREQを受信した場合は、保存されている複数RREQの経路の中で最も長い経路寿命となるRREQに対してRREPを返信する。このようにすることで、より長時間使用可能な経路を選択することが可能となり、性能向上が期待される。

図 4.5 にその様子を示す。従来の AODV では、宛先端末は時刻 0.3 に RREQ を受信したらただちに RREP を返信するが、リンク寿命予測を用いた手法の場合、最初の RREQ 受信から一定時間待機 (図 4.5 では 0.1 s 間待機とする) するため、最初に受信する <A B C D> と、後から受信する <A E F G D> の経路情報を持つ 2 つの RREQ を比較し、より長時間使用可能な経路である <A E F G D> の RREQ に対して RREP を返信することが可能となる。

#### 4.3.6 経路探索の仕様

今まで述べてきた提案手法での変更点を含めた経路探索の仕様を図 4.6 に示す。

データ通信要求が発生した場合、送信元端末は RREQ パケットに従来の AODV において格納する情報以外に、自身の位置情報を入れ、フラッドする。RREQ

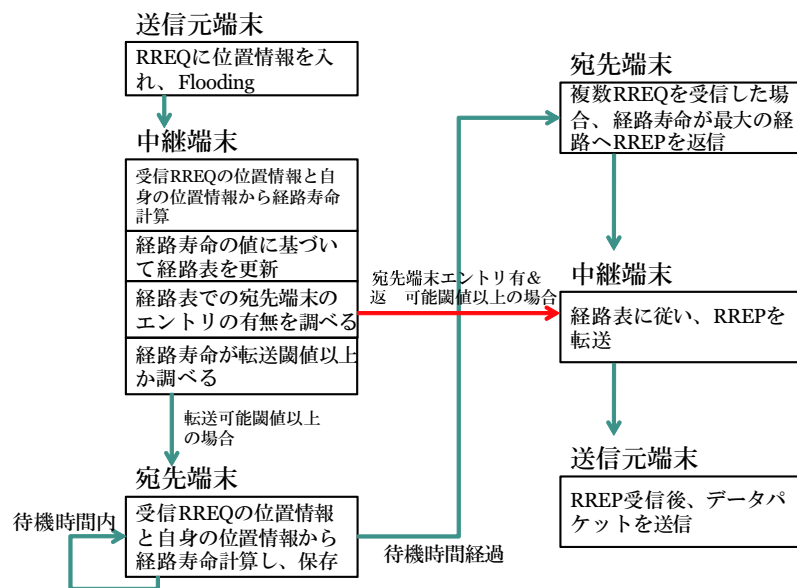


図 4.6: 経路探索の仕様

を受信した中継端末は、RREQにある前ホップ端末の位置情報と自身の位置情報を用いて、前ホップ端末とのリンク寿命をリンク寿命予測アルゴリズムの式に代入して計算する。中継端末が1ホップ目の端末の場合、計算したリンク寿命値を経路寿命とする。中継端末が2ホップ目以降の端末の場合、受信したRREQには、それまでの端末を繋ぐ経路の寿命値が格納されている。そこで、RREQ内の経路寿命値と計算した前ホップ端末とのリンク寿命値の最小値をそれまでの経路寿命値とする。この経路寿命値に現在時刻を足したものを、経路の有効期間とする。次に、中継端末は自身の経路表に送信元端末のエントリがあるか調べる。エントリが無い場合、エントリを作成しその有効期間フィールドに先ほど計算した有効期間の値を代入する。エントリがある場合、以下の二つの更新条件どちらか一つでも満たした時にのみ経路表を更新する。

- RREQのシーケンス番号が、経路表の宛先端末のエントリのシーケンス番号より大きい
- シーケンス番号は同じで、RREQの有効期間の値が、経路表の宛先端末のエントリ有効期間の値より大きい

次に、経路表に宛先端末のエントリがあるか調べる。エントリがあり、かつ、そ

の有効期間の値が事前に設定した返信可能閾値以上の場合、RREQの転送を行わず、送信元端末へRREPを返信する。それ以外の場合は、RREQを転送するかを経路寿命値を用いて判断する。経路寿命値が、事前に設定した転送可能閾値以上の場合はRREQを転送する。閾値未満の場合は、転送せず破棄する。

中継端末からのRREQを受信した宛先端末は、前ホップ端末とのリンク寿命を計算後、送信元端末・宛先端末間の経路寿命値を求め、保存し、一定時間待機する。待機中にRREQを受信した場合、同様に経路寿命値を求め、保存する。一定時間経過後、受信したRREQの中で経路寿命値が最大のRREQの経路情報を経路表の送信元端末のエントリへ更新する。そして、経路寿命の値を格納したRREPを経路表に従って、送信元端末へ返信する。

## 第 5 章

# シミュレーションモデル

## 5.1 シミュレーション環境

本稿では、提案した手法を Qualnet4.0 ネットワークシミュレータを用いて評価した [19]。従来の AODV・従来研究 2 を評価対象として、コントロールパケット量、データパケット到着率数等に関する比較を行った。コントロールパケット量とは、RREQ・RREP・RERR の各コントロールパケットの送信/転送回数と RREQ サイズの積との和を示している。

シミュレーション環境を表 5.1 に示す。今回のシミュレーションでは、リンクが切断した場合、Local Repair は行わない。また、Hello パケットのやり取りも行わない。アプリケーションに関しては、全端末から送信元端末と宛先端末をランダムに選択する。データの発生間隔は一定で、データサイズも一定とし、データ送信回数、データ送信時間もあらかじめ決めておく。また、同時帯における通信組数は基本的に一定数となるよう設定する。位置情報に関しては、各端末とも正確な位置情報を利用できると仮定する。

表 5.1: シミュレーション環境

端末数	50 個
シミュレーション時間	300s
エリア	500m × 500m
移動モデル	Random WayPoint
ポーズタイム	30s
通信半径	100m
最大移動速度	1 ~ 20m/s
MAC プロトコル	802.11b
アプリケーション プロトコル	CBR パケット送信間隔：512bytes パケット送信間隔：1s 通信組：8 ~ 20 組

## 5.2 各種パラメータ

シミュレーションにおける各パラメータの値を以下のように設定する。

- 最大経路長：35 Hop
- 端末のバッファサイズ：100 packets
- RREQの再送回数：2回
- RERR フレーム：12 bytes から動的に変化
- RTS フレーム：20 bytes
- CTS フレーム：14 bytes
- ACK フレーム：14 bytes

### 従来 of AODV

- RREQ フレーム：24 bytes
- RREP フレーム：20 bytes
- 経路表のタイムアウト時間：4 s

### 既存手法

- RREQ フレーム：32 bytes
- RREP フレーム：22 bytes

### 提案手法

- RREQ フレーム：32 ~ 56 bytes
- RREP フレーム：22 bytes

## 第 6 章

### シミュレーション結果



## 6.1 RREQ の最適な転送閾値

提案手法における RREQ の最適な転送閾値を決めるために、シミュレーションを行った。ここでは、RREQ の転送閾値を 0 秒から 10 秒まで 1 秒間隔で変化させ、その変化に応じて、各手法のデータパケット到着率、コントロールパケット量などの評価値がどのように変化していくのかを示す。通信組数を 8 組から 20 組まで 3 組ずつ増加させた場合の転送閾値毎の評価項目を、移動速度 1m/s ~ 20m/s まで変化させて、測定している。同数の通信組数・移動速度の状態、端末の位置や通信組をランダムに変化させ、5 回のシミュレーション結果の平均を取っている。シミュレーション結果を図 6.1, 6.2 に示す。

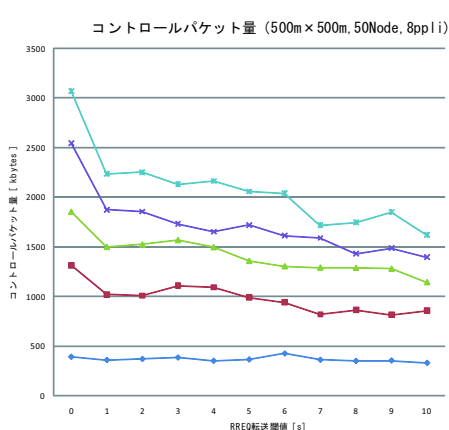


図 6.1: コントロールパケット量

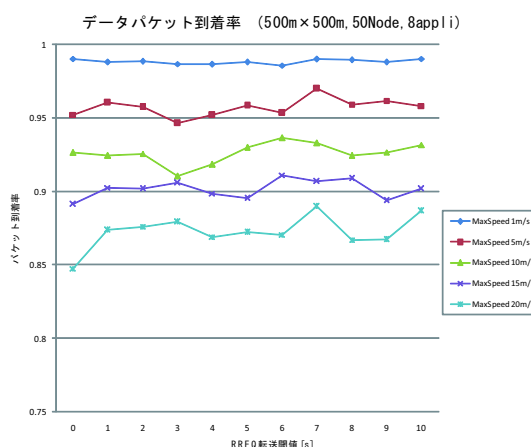


図 6.2: データパケット受信率

表 6.1: 閾値 10s とのコントロールパケット量比較 (8appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s
1m/s	18.5	8.7	11.9	16.3	6.1	10.3	28.7	9.2	5.7	7.1
5m/s	54.2	19.3	18.1	29.9	27.9	15.8	10.2	-4.4	0.8	-5.0
10m/s	62.2	31.2	33.3	37.2	30.9	18.7	14.1	13.0	12.7	11.9
15m/s	82.9	34.4	33.0	24.3	18.4	23.4	15.7	13.9	2.6	6.6
20m/s	89.8	38.1	39.1	31.6	33.6	27.1	25.9	6.2	7.8	14.2

通信組数が 8 組、つまり 50 端末中 16 端末が通信状態にある場合のシミュレーション結果を図 6.1、6.2 に示す。図 6.1 は、シミュレーションが終了するまでに送信されたコントロールパケットの総量、図 6.2 は、データパケットの受信率を示し

ている。二つのグラフを比較すると、基本的には連動しているといえる。コントロールパケット量が少ない場合、データパケット受信率が高くなり、逆にコントロールパケット量が多い場合、データパケット受信率が低くなる傾向にある。これは、コントロールパケット量が増加すると、その分通信帯域が逼迫され、他の通信組のやりとりにも影響を与え、RREQ の再送などさらなるコントロールパケット量の増加を引き起こす。結果としてデータパケット到着率の低下を引き起こしていると考えられる。しかし、データパケット受信率は、各閾値ごとに比較しても、平均 2 %、最大 4 % 程度の乖離しかないため、ここではコントロールパケット量の比較に重点をおく。コントロールパケット量は、移動速度が 1m/s の場合、最大値と最小値との乖離は 28 % だが、速度が上がるにつれ、移動速度が 5m/s の場合で 62 %、移動速度が 10 m/s の場合で 62 %、移動速度が 15m/s の場合で 82 %、移動速度が 20m/s の場合で 89 % と乖離が大きくなる。移動速度 1m/s の時を除くと、コントロールパケット量が最も多くなるのは RREQ 転送閾値が 0 s の時である。また、多少の変動はあるものの、閾値が上がるにつれ、コントロールパケット量は減少する傾向にある。図 6.1 で示されている通り、どの移動速度の場合でも、閾値 10 s のときのコントロールパケット量が最も少なくなっているといえる。閾値 10s を基準にした場合の、その他の閾値とのコントロールパケット量の比較を % 表示で、表 6.1 に示す。

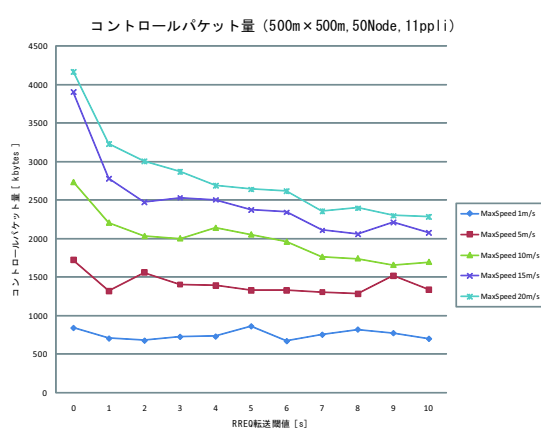


図 6.3: コントロールパケット量

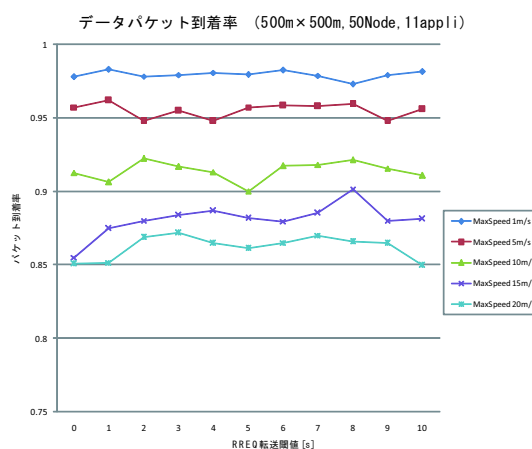


図 6.4: データパケット受信率

表 6.2: 閾値 10s とのコントロールパケット量比較 (11appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s
1m/s	20.0	0.4	-3.5	3.6	4.1	23.0	-4.5	7.5	17.1	10.4
5m/s	28.8	-1.3	16.5	5.0	4.0	-0.6	-0.9	-2.4	-4.2	13.4
10m/s	61.1	30.1	19.8	18.0	26.1	21.0	15.5	3.9	2.7	-2.3
15m/s	87.6	33.6	19.0	21.7	20.4	14.0	12.6	1.4	-1.0	6.2
20m/s	82.5	41.4	31.5	25.6	17.9	15.7	14.7	3.3	5.0	0.7

通信組数が 11 組、50 端末中 22 端末が通信状態にある場合のシミュレーションが終了するまでに送信されたコントロールパケットの総量を図 6.3、データパケットの受信率を図 6.4 に示している。データパケット受信率に関しては、閾値の変化による乖離は平均して 2 %、最大で 5 % 程度であった。それに対して、コントロールパケット量は、移動速度が 1m/s の場合、最大値と最小値との乖離は 28 % だが、速度が上がるにつれ、移動速度が 5m/s の場合で 34 %、移動速度が 10m/s の場合で 65 %、移動速度が 15m/s の場合で 90 %、移動速度が 20m/s の場合で 82 % と多少のずれはあるものの、乖離が大きくなる傾向にある。コントロールパケット量が最も多くなるのは、移動速度 1m/s の時を除くと、RREQ 転送閾値が 0s の時である。一方で、閾値 10s の場合が平均して最もコントロールパケット量が少なくなっている。閾値 10s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較を表 6.2 に示す。

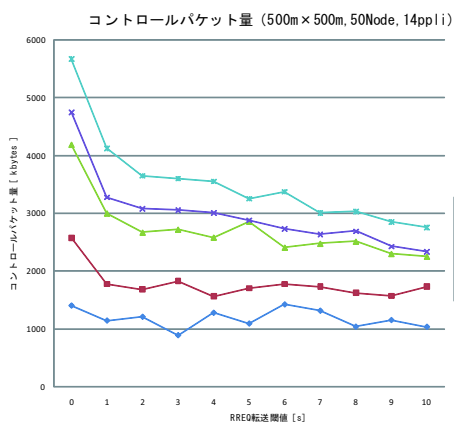


図 6.5: コントロールパケット量

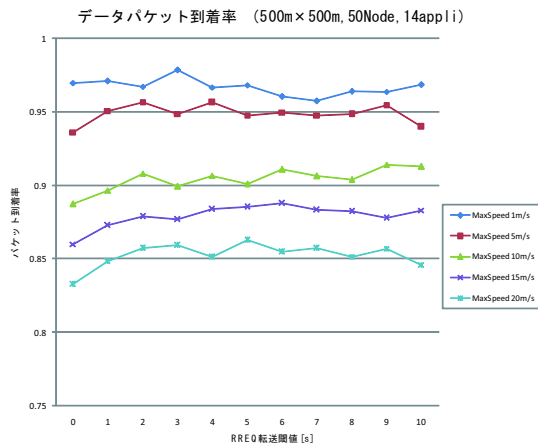


図 6.6: データパケット受信率

表 6.3: 閾値 10s とのコントロールパケット量比較 (14appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s
1m/s	35.6	10.4	16.7	-14.2	23.5	5.4	37.5	27.0	0.2	11.3
5m/s	48.8	2.3	-2.9	5.4	-9.9	-1.8	2.4	-0.2	-6.3	-9.5
10m/s	85.8	33.1	18.4	20.7	14.6	26.9	6.9	9.9	11.5	2.1
15m/s	103.1	40.3	32.0	30.7	28.8	23.3	17.1	12.9	15.2	3.9
20m/s	105.7	49.7	32.5	30.7	29.0	18.0	22.4	9.3	10.2	3.5

通信組数が 14 組、50 端末中 28 端末が通信状態にある場合のシミュレーション結果を図 6.5、6.6 に示す。図 6.5 はシミュレーションが終了するまでに送信されたコントロールパケットの総量、図 6.6 はデータパケットの受信率を示している。データパケット受信率に関しては、閾値の変化による乖離は平均して 2 %、最大で 3 %程度であった。それに対して、コントロールパケット量は、移動速度が 1m/s の場合、最大値と最小値との乖離は 60 %、移動速度が 5m/s の場合で 65 %、移動速度が 10m/s の場合で 85 %、移動速度が 15m/s の場合で 103 %、移動速度が 20m/s の場合で 105 %と、速度が上がるにつれ乖離が大きくなる傾向にある。コントロールパケット量が最も多くなるのは、どの移動速度の場合でも、RREQ 転送閾値が 0s の時である。一方で、閾値 10s の場合が、移動速度 10m/s、15m/s、20m/s の時、最もコントロールパケット量が少なくなっている。その他の速度の場合でも、比較的少ないといえる。閾値 10s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較を表 6.3 に示す。

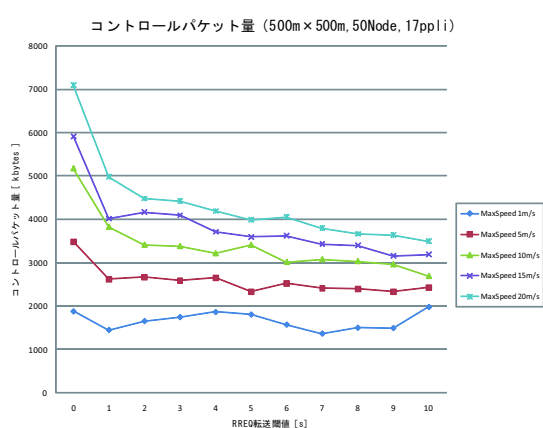


図 6.7: コントロールパケット量

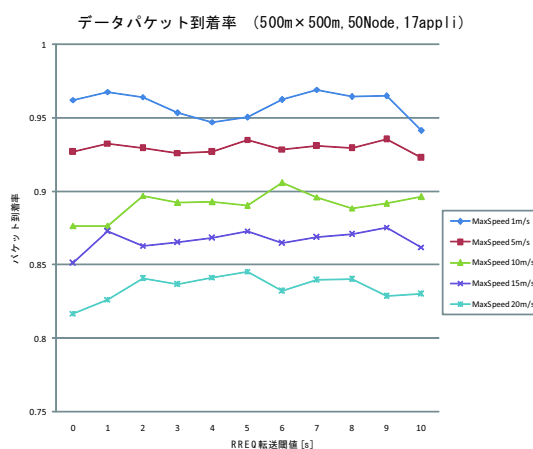


図 6.8: データパケット受信率

表 6.4: 閾値 10s とのコントロールパケット量比較 (17appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s
1m/s	-5.1	-26.7	-16.4	-11.8	-5.9	-8.8	-20.5	-30.9	-24.2	-24.6
5m/s	43.3	7.9	9.7	6.2	9.0	-4.2	3.8	-0.9	-1.7	-4.1
10m/s	92.6	42.4	26.9	25.7	19.6	26.8	12.1	14.4	12.8	10.0
15m/s	85.5	25.9	30.6	28.4	16.4	12.8	13.6	7.5	6.6	-1.0
20m/s	103.1	42.6	28.3	26.7	20.0	14.2	16.0	8.9	4.9	4.1

通信組数が 17 組、50 端末中 34 端末が通信状態にある場合のシミュレーション結果を図 6.7、6.8 に示す。図 6.7 はシミュレーションが終了するまでに送信されたコントロールパケットの総量、図 6.8 はデータパケットの受信率を示している。データパケット受信率に関しては、閾値の変化による乖離は平均して 2 %、最大で 3 % 程度であった。それに対し、コントロールパケット量は、移動速度 1m/s の場合、最大値と最小値の乖離は 45 %、移動速度 5m/s の場合で 49 %、移動速度 10m/s の場合で 92 %、移動速度 15m/s の場合で 87 %、移動速度 20m/s の場合で 103 % と、速度が上がるにつれ乖離が大きくなる傾向にある。コントロールパケット量が最も多くなるのは、移動速度 1m/s の場合を除き、閾値が 0s の時である。一方で、閾値 10s の場合が、移動速度 10m/s、20m/s の時、最もコントロールパケット量が少なくなっている。その他の速度の場合でも、比較的少ないといえる。閾値 10s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較を表 6.4 に示す。

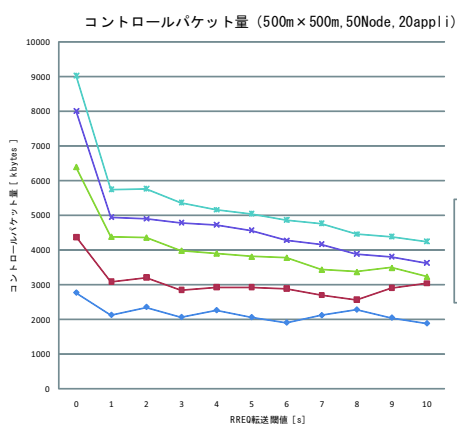


図 6.9: コントロールパケット量

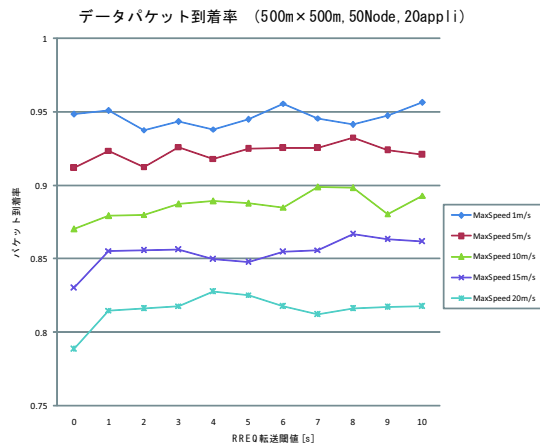


図 6.10: データパケット受信率

表 6.5: 閾値 10s とのコントロールパケット量比較 (20appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s
1m/s	47.3	13.0	25.2	9.8	20.3	9.5	1.3	12.5	21.2	8.9
5m/s	44.2	1.6	5.7	-6.3	-3.5	-3.7	-4.7	-11.2	-15.6	-4.4
10m/s	97.7	35.6	34.9	23.2	20.7	17.8	16.9	6.3	4.2	7.8
15m/s	120.8	36.4	35.1	32.1	30.4	26.0	18.0	14.9	7.4	4.9
20m/s	112.9	35.4	36.1	26.5	21.6	19.1	14.8	12.3	5.1	3.5

通信組数が 20 組、50 端末中 40 端末が通信状態にある場合のシミュレーション結果を図 6.9、6.10 に示す。図 6.9 はシミュレーションが終了するまでに送信されたコントロールパケットの総量、図 6.10 はデータパケットの受信率を示している。データパケット受信率に関しては、閾値の変化による乖離は平均して 3 %、最大で 4 % 程度であった。それに対して、コントロールパケット量は、移動速度が 1m/s の場合、最大値と最小値との乖離は 47 %、移動速度が 5m/s の場合で 71 %、移動速度が 10m/s の場合で 98 %、移動速度が 15m/s の場合で 120 %、移動速度が 20m/s の場合で 113 % と、速度が上がるにつれ乖離が大きくなる傾向にある。コントロールパケット量が最も多くなるのは、どの移動速度の場合でも、RREQ 転送閾値が 0s の時である。一方で、閾値 10s の場合が、移動速度 5m/s の時を除いて、最もコントロールパケット量が少なくなっている。閾値 10s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較を表 6.5 に示す。

通信組数、移動速度を変化させた時の RREQ 転送閾値ごとのデータパケット受信率、コントロールパケット量のシミュレーション結果を示した。閾値の変化により生じる最大値と最小値との比較を行うと、データパケット受信率は、通信組数・移動速度を変化させても、最大で 5 % 程度と大差はみられなかった。一方で、コントロールパケット量は、閾値ごとに大きな差がみられた。多少の違いはあるものの、基本的に閾値が大きくなるにつれ、コントロールパケット量は減少する傾向にある。また、移動速度が速くなるにつれ、コントロールパケット量の差は大きくなる傾向にある。閾値 0s と閾値 10s のコントロールパケット量を比較すると、移動速度が 1m/s の場合、閾値 0s の方が平均して 23 % コントロールパケット量が多かったが、移動速度が 20m/s の場合、閾値 0s の方が平均して 99 % コントロールパケット量が多くなっている。同様に、通信組数も多くなるにつれ、コントロールパケット量の差は大きくなる傾向にある。閾値 0s と閾値 10s のコントロールパケット量を比較すると、通信組数が 8 組の場合、閾値 0s の方が平均して 61 % コントロールパケット量が多かったが、移動速度が 20m/s の場合、閾値 0s の方が平均して 84 % コントロールパケット量が多くなっている。

通信組数・移動速度を変化させたすべての状況で、統一した閾値を設定することを考えると、通信組数が 17 組の場合は最適な閾値は 9s となるものの、その他すべての場合で最もコントロールパケット量が少なくなる閾値は 10s となるため、RREQ 転送閾値を 10s として、以降のシミュレーションを行った。

## 6.2 中継端末による RREP の最適な返信閾値

提案手法における中継端末による RREP の最適な返信閾値を決めるために、シミュレーションを行った。中継端末による RREP 返信閾値とは、RREQ を受信した中継端末の経路表に宛先端末への経路情報があった場合、その経路のリンク寿命がどの程度なら RREP を返信するかを判断するための閾値である。リンク寿命が閾値以上なら RREP を返信し、閾値以下なら返信しない。ここでは、RREP の返信閾値を 0 秒から 10 秒まで 1 秒間隔で変化させ、その変化に応じて、各手法のデータパケット到着率、コントロールパケット量などの評価値がどのように変化していくのかを示す。通信組数を 8 組から 20 組まで 3 組ずつ増加させた場合の転送閾値毎の評価項目を、移動速度 1m/s ~ 20m/s まで変化させて、測定している。また、前節で決めたとおり RREQ の転送閾値を 10s に設定している。同数の通信組数・移動速度の状態、端末の位置や通信組をランダムに変化させ、5 回のシミュレーション結果の平均を取っている。シミュレーション結果を以下に示す。

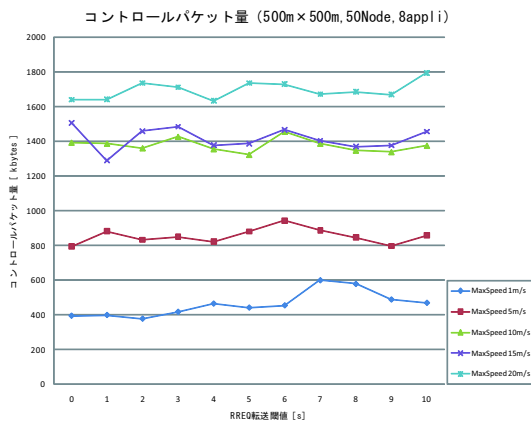


図 6.11: コントロールパケット量

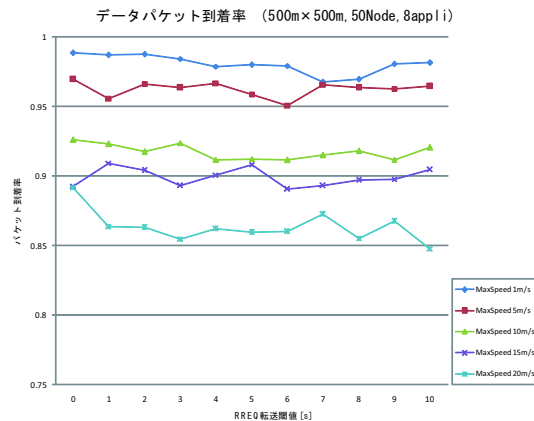


図 6.12: データパケット受信率

通信組数が 8 組、50 端末中 16 端末が通信状態にある場合のシミュレーション結果を図 6.11、6.12 に示す。図 6.11 は、シミュレーションが終了するまでに送信されたコントロールパケットの総量、図 6.12 は、データパケットの受信率を示している。二つのグラフを比較すると、前節のシミュレーション結果と同様、コントロールパケット量が少ない場合、データパケット受信率が高くなり、逆にコントロールパケット量が多い場合、データパケット受信率が低くなる傾向にあること



表 6.6: 閾値 1s とのコントロールパケット量比較 (8appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s	閾値 10s
1m/s	-1.1	-5.4	4.6	16.5	10.7	13.9	50.3	45.0	22.4	17.6
5m/s	-10.1	-5.7	-3.6	-6.9	-0.1	7.0	0.6	-4.0	-9.8	-2.7
10m/s	0.4	-1.9	2.9	-2.3	-4.6	5.0	0.0	-2.8	-3.5	-0.8
15m/s	17.0	13.3	15.2	6.9	7.6	13.9	9.0	6.3	6.8	13.0
20m/s	-0.1	5.7	4.2	-0.6	5.7	5.3	1.7	2.6	1.7	9.3

から、基本的には連動しているといえる。データパケット受信率は、各閾値ごとに比較しても、平均 2 %、最大 3 % 程度の乖離しかないため、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。コントロールパケット量は、移動速度が 1m/s の場合、最大値と最小値との乖離は 58 % だが、速度が上がるにつれ、移動速度が 5m/s の場合で 18 %、移動速度が 10m/s の場合で 10 %、移動速度が 15m/s の場合で 17 %、移動速度が 20m/s の場合で 10 % と多少の違いはあるが変動幅が小さくなる。コントロールパケット量が最も少なくなる閾値は、移動速度ごとに異なる。移動速度 1m/s の時は閾値 2s、移動速度 5m/s の時は閾値 0s、移動速度 10m/s の時は閾値 5s、移動速度 15m/s の時は閾値 1s、移動速度 20m/s の時は閾値 4s の場合が最もコントロールパケット量が少なくなっている。そこで、どの移動速度でも平均的にコントロールパケット量が少なくなるような閾値を設定するため、閾値 0s を基準にその他の閾値との各移動速度ごとの乖離率を求め、その和が最もマイナスに乖離しているものを最適な閾値とした。ここでは、閾値 1s の場合が最適な閾値となった。各移動速度ごとに、閾値 1s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較を表 6.6 に示す。

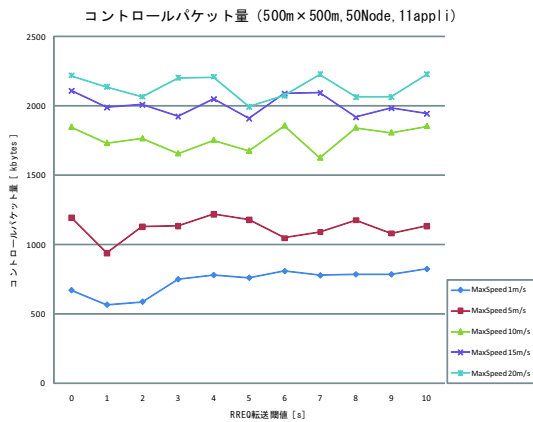


図 6.13: コントロールパケット量

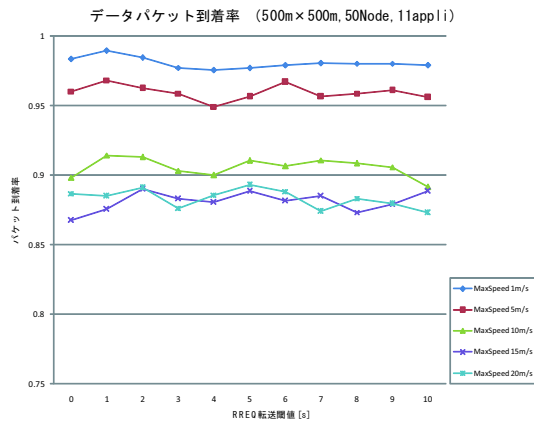


図 6.14: データパケット受信率

表 6.7: 閾値 1s とのコントロールパケット量比較 (11appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s	閾値 10s
1m/s	18.5	3.7	32.4	37.9	34.5	42.8	37.5	38.8	38.8	45.6
5m/s	27.1	20.2	20.7	29.9	25.5	11.6	16.2	25.3	15.2	20.9
10m/s	6.7	1.9	-4.3	1.3	-3.2	7.2	-6.1	6.4	4.4	7.1
15m/s	6.1	1.1	-3.2	3.0	-4.0	5.0	5.4	-3.6	-0.3	-2.2
20m/s	3.9	-3.3	3.1	3.4	-6.7	-2.9	4.2	-3.4	-3.3	4.2

通信組数が 11 組、50 端末中 22 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.13、データパケットの受信率を図 6.14 に示す。データパケット受信率は、各閾値ごとに比較しても、平均 1 %、最大 2 % 程度の乖離しかないため、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。

コントロールパケット量が最も少なくなる閾値は、移動速度ごとに異なっており、移動速度 1m/s の時は閾値 1s、移動速度 5m/s の時は閾値 1s、移動速度 10m/s の時は閾値 7s、移動速度 15m/s の時は閾値 5s、移動速度 20m/s の時は閾値 5s の場合が最もコントロールパケット量が少なくなっている。閾値 0s を基準にその他の閾値との各移動速度ごとの乖離率を求め、その和が最もマイナスに乖離している閾値を計算すると、閾値 1s の場合となった。各移動速度ごとに、閾値 1s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較結果を表 6.7 に示す。

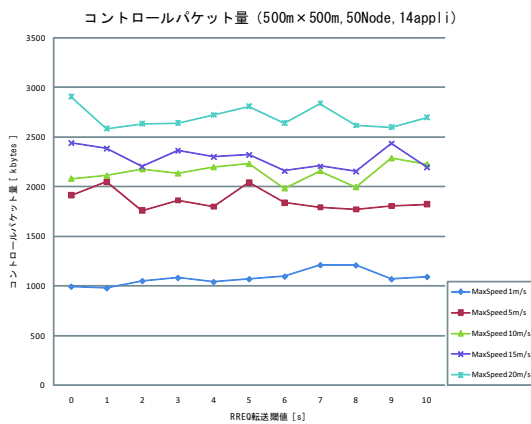


図 6.15: コントロールパケット量

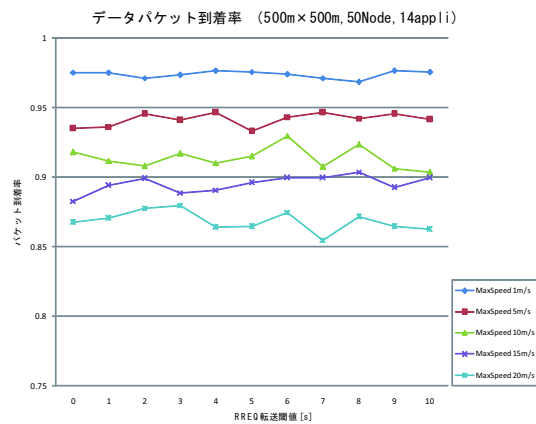


図 6.16: データパケット受信率

表 6.8: 閾値 6s とのコントロールパケット量比較 (14appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s	閾値 10s
1m/s	-9.2	-10.8	-4.1	-1.2	-5.0	-2.4	10.5	10.3	-2.4	-0.3
5m/s	4.1	11.4	-4.4	1.3	-2.1	11.1	-2.6	-3.7	-1.8	-0.8
10m/s	5.0	6.5	9.8	7.6	10.8	12.5	8.9	0.6	15.4	12.2
15m/s	13.2	10.6	2.2	9.5	6.6	7.5	2.3	-0.2	13.0	1.9
20m/s	10.2	-2.1	-0.2	0.1	3.1	6.4	7.6	-0.9	-1.6	2.1

通信組数が 14 組、50 端末中 28 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.15、データパケットの受信率を図 6.16 に示す。データパケット受信率は、各閾値ごとに比較しても、平均 1 %、最大 2 % 程度の乖離しかないため、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。

コントロールパケット量が最も少なくなる閾値は、移動速度ごとに異なっており、移動速度 1m/s の時は閾値 1s、移動速度 5m/s の時は閾値 2s、移動速度 10m/s の時は閾値 6s、移動速度 15m/s の時は閾値 8s、移動速度 20m/s の時は閾値 1s の場合が最もコントロールパケット量が少なくなっている。閾値 0s を基準にその他の閾値との各移動速度ごとの乖離率を求め、その和が最もマイナスに乖離している閾値を計算すると、閾値 6s の場合となった。各移動速度ごとに、閾値 6s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較結果を表 6.8 に示す。

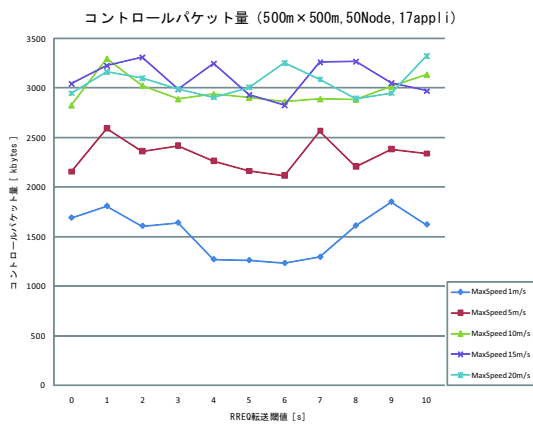


図 6.17: コントロールパケット量

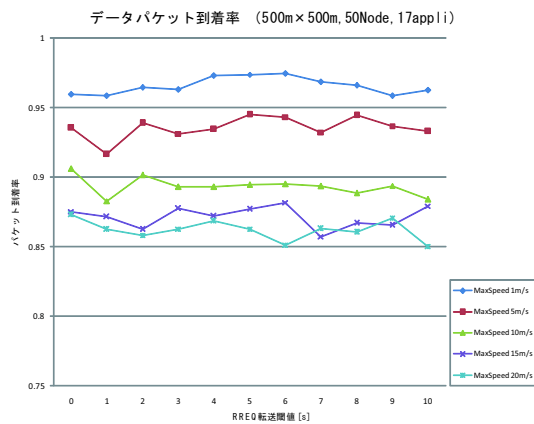


図 6.18: データパケット受信率

表 6.9: 閾値 6s とのコントロールパケット量比較 (17appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s	閾値 10s
1m/s	37.0	46.6	30.3	32.9	3.1	2.3	5.0	30.6	50.0	31.5
5m/s	1.8	22.5	11.6	14.3	6.9	2.2	21.3	4.4	12.5	10.5
10m/s	-1.3	15.1	5.7	0.8	2.6	1.4	0.8	0.7	5.2	9.5
15m/s	7.7	14.2	17.2	5.8	14.8	3.8	15.3	15.6	8.0	5.1
20m/s	-9.5	-2.9	-4.8	-8.1	-10.7	-7.6	-5.1	-11.1	-9.4	2.1

通信組数が 17 組、50 端末中 34 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.17、データパケットの受信率を図 6.18 に示す。データパケット受信率は、各閾値ごとに比較しても、平均 1 %、最大 2 % 程度の乖離しかないため、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。

コントロールパケット量が最も少なくなる閾値は、移動速度ごとに異なっており、移動速度 1m/s の時は閾値 6s、移動速度 5m/s の時は閾値 6s、移動速度 10m/s の時は閾値 0s、移動速度 15m/s の時は閾値 6s、移動速度 20m/s の時は閾値 4s の場合が最もコントロールパケット量が少なくなっている。閾値 0s を基準にその他の閾値との各移動速度ごとの乖離率を求め、その和が最もマイナスに乖離している閾値を計算すると、閾値 6s の場合となった。各移動速度ごとに、閾値 6s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較結果を表 6.9 に示す。

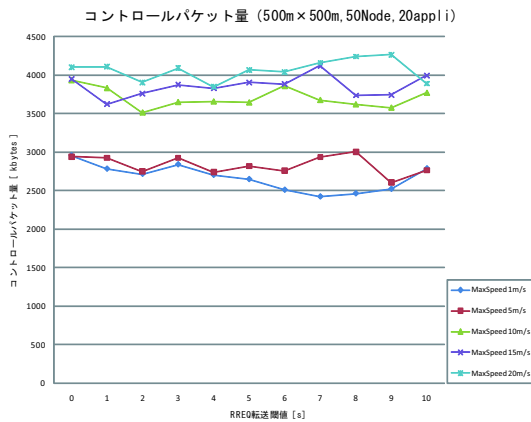


図 6.19: コントロールパケット量

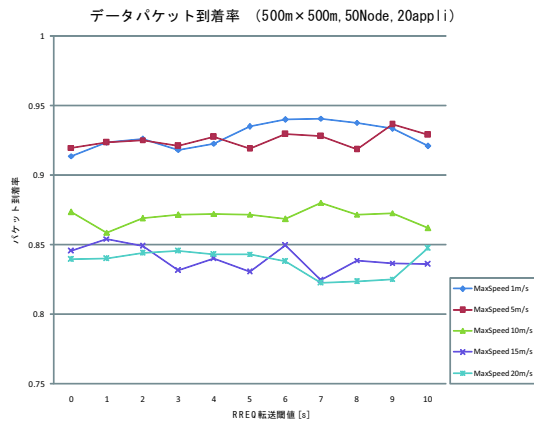


図 6.20: データパケット受信率

表 6.10: 閾値 9s とのコントロールパケット量比較 (20appli)

最大速度	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 10s
1m/s	17.1	10.3	7.7	12.5	7.2	5.0	-0.5	-3.9	-2.3	10.4
5m/s	13.1	12.6	5.6	12.6	5.3	8.4	6.0	12.9	15.6	6.3
10m/s	10.0	7.1	-1.8	2.0	2.2	1.9	7.9	2.8	1.2	5.4
15m/s	5.5	-3.2	0.5	3.5	2.3	4.3	3.8	10.1	-0.2	6.7
20m/s	-3.8	-3.7	-8.5	-4.1	-9.8	-4.7	-5.3	-2.5	-0.5	-8.8

通信組数が 20 組、50 端末中 40 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.19、データパケットの受信率を図 6.20 に示す。データパケット受信率は、各閾値ごとに比較しても、平均 2 %、最大 3 % 程度の乖離しかないため、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。

コントロールパケット量が最も少なくなる閾値は、移動速度ごとに異なっており、移動速度 1m/s の時は閾値 7s、移動速度 5m/s の時は閾値 9s、移動速度 10m/s の時は閾値 2s、移動速度 15m/s の時は閾値 1s、移動速度 20m/s の時は閾値 4s の場合が最もコントロールパケット量が少なくなっている。閾値 0s を基準にその他の閾値との各移動速度ごとの乖離率を求め、その和が最もマイナスに乖離している閾値を計算すると、閾値 2s の場合となった。各移動速度ごとに、閾値 2s とその他の閾値とのコントロールパケット量の比較結果を表 6.10 に示す。

表 6.11: 各評価値での比較

	閾値 0s	閾値 1s	閾値 2s	閾値 3s	閾値 4s	閾値 5s	閾値 6s	閾値 7s	閾値 8s	閾値 9s	閾値 10s
平均との乖離 (%)	3.5	-2.1	-9.6	1.6	-5.0	-6.0	-4.8	9.6	2.5	0.6	9.7
総量 (Mbyte)	58.5	56.8	59.0	60.0	57.2	58.6	61.3	59.5	58.4	57.3	60.5

通信組数、移動速度を変化させた時の、中継端末による RREP 返信閾値ごとのデータパケット受信率、コントロールパケット量のシミュレーション結果を示した。閾値の変化により生じる最大値と最小値との比較を行うと、データパケット受信率は、通信組数・移動速度を変化させても、最大で 3 % 程度と大差はみられなかった。一方で、コントロールパケット量は、閾値ごとに大きな差がみられた。また、移動速度が速くなるにつれ、閾値ごとのコントロールパケット量の差は小さくなる傾向にある。

以上の結果をふまえて、通信組数や移動速度ごとに適した閾値を用いることも可能であるが、実際には通信時に通信組数・移動速度を把握することは難しく、今シミュレーションではすべての状況で、統一した閾値を用いることを考える。閾値ごとのコントロールパケットの総量を最適閾値の判断基準とすると、閾値が 1s の時が最もコントロールパケットが少なくなる。しかし、この判断基準では、シミュレーション時の変動幅に着目していないため、特定の状況下ではコントロールパケット量は非常に少ないが、別の状況下では非常に多くなるなど、状況ごとに差が大きくなってしまう可能性がある。そこで、コントロールパケット量の総量以外に、各状況 (特定の移動速度、通信組数) での閾値 0s から閾値 10s までの平均コントロールパケット量を求め、各閾値がその平均値からどのくらい乖離しているかも判断基準に用いた。比較結果を表 6.11 に示す。各閾値での、状況 (特定の移動速度、通信組数) ごとの平均値との乖離を % 表示で上段に、コントロールパケット総量を下段に示した。その結果、閾値 4s がどちらの基準でも高い基準となったため、今後のシミュレーションでは中継端末による RREP 返信閾値を 4s とした。

## 6.3 既存手法との比較

最後に、提案手法と従来の AODV、既存手法との比較を行うため、シミュレーションを行った。従来の AODV とは、位置情報による予測など特別な手法を用いない従来のプロトコルである。既存手法は、AODV をもとに位置情報を用いてリンク寿命の予測を用いたもので、3.3 節で紹介した手法である。特徴としては、中継端末による RREQ 転送に閾値を設け、無駄な RREQ の転送を防いでいる。提案手法では、中継端末の経路情報の最大保存数を 1~4 個まで変化させ、各保存数毎にシミュレーションを行った。シミュレーションでは、RREQ の経路情報の最大保存数が  $k$  個の場合を提案手法 (trace  $k$ ) と表わしている。また、既存手法、提案手法、両手法において、中継端末による RREP 返信に閾値を設けて制限している。

既存手法・提案手法で用いる RREQ 転送閾値は、前々節のシミュレーション結果での最適値である 10s とした。また、中継端末による RREP 返信閾値は、前節のシミュレーション結果での最適値である 4s とした。表 6.12 に、各手法の特徴を示す。各手法のデータパケット到着率、コントロールパケット量などの評価値がどのように変化していくのかを示す。通信組数を 8 組から 20 組まで 3 組ずつ増加させた場合の各手法毎の評価項目を、移動速度 1m/s ~ 20m/s まで変化させて、測定している。同数の通信組数・移動速度の状態、端末の位置や通信組をランダムに変化させ、5 回のシミュレーション結果の平均を取っている。

表 6.12: 各手法の特徴

	従来の AODV	既存手法	提案手法
RREQ 転送閾値	×	10s	10s
RREP 返信閾値	×	4s	4s
RREQ 経路記憶	×	×	1~4 個

### 通信組数 8 の場合

通信組数が 8 組、50 端末中 16 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.21、データパケットの受信率を図 6.22 に示す。データパケット受

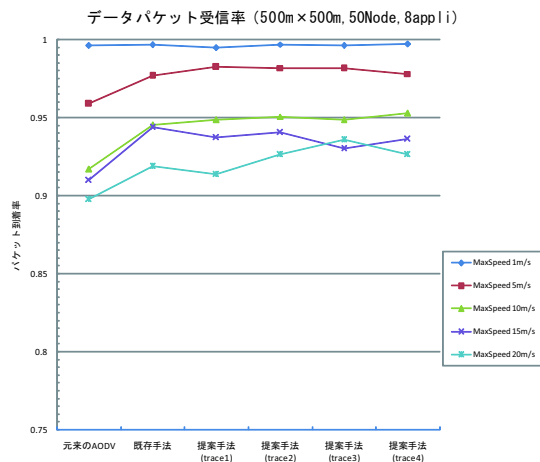
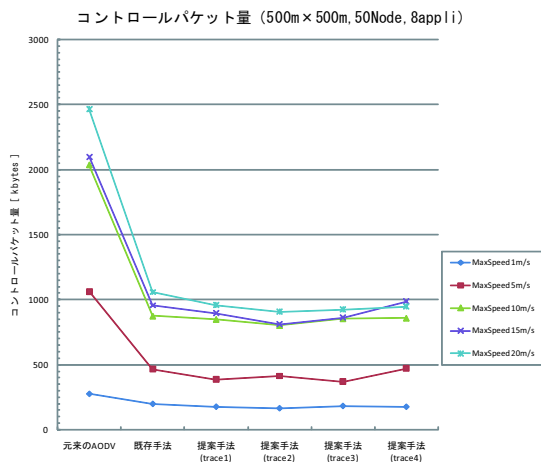


図 6.21: コントロールパケット量

図 6.22: データパケット受信率

表 6.13: 提案手法 (trace2) との比較

最大速度	AODV	既存手法	提案手法 (trace1)	提案手法 (trace3)	提案手法 (trace4)
1m/s	69.0	20.8	7.4	11.0	6.9
5m/s	159.1	13.4	-5.7	-10.4	14.7
10m/s	153.5	9.0	5.9	6.5	7.0
15m/s	159.0	17.9	10.8	6.5	22.0
20m/s	172.3	16.7	5.6	1.8	4.4

信率について、各手法ごとに比較すると、平均で3%、最大で4%程度の差が生じた。一方、コントロールパケット量については、平均で12%、最大で22%程度の差が生じた。そこで、2つのシミュレーション結果のうち、コントロールパケット量の比較結果に重点をおいて評価を行い、コントロールパケット量が最少となる手法を検討した。ただ、移動速度ごとに異なる結果となるため、移動速度ごとに全手法のコントロールパケット量の平均値を求め、各手法がその平均値からどれほど乖離しているかを求めた。そして、各手法での移動速度ごとの乖離率の平均値を比較し、最もマイナスに乖離しているものを、コントロールパケット量が最少となる手法とした。その結果、提案手法 (trace2) がコントロールパケット量が最も少なくなった。表 6.13 に提案手法 (trace2) とその他の手法とのコントロールパケット量の比較結果を示す。その他の手法がどれだけの差があるのかを提案手法 (trace2) を基準に%表示している。



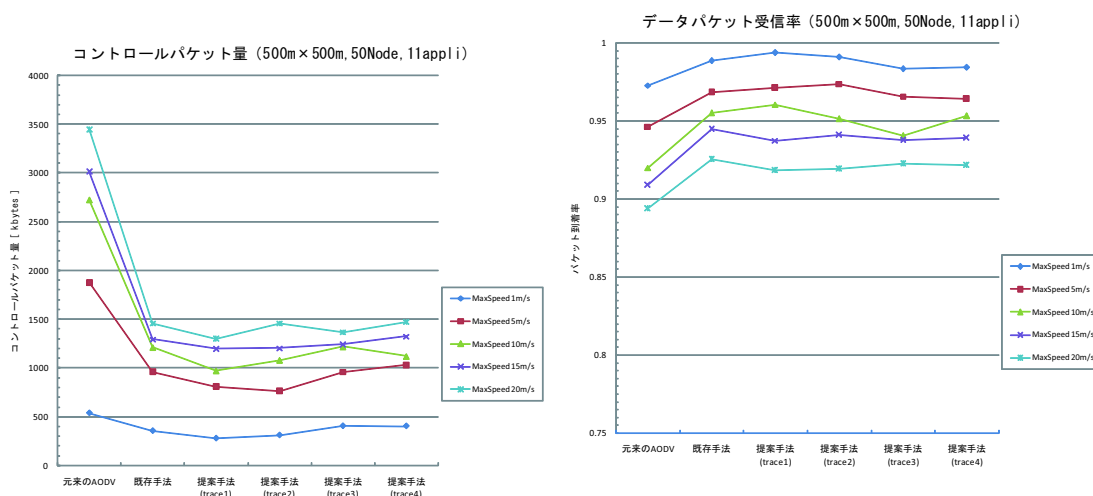


図 6.23: コントロールパケット量

図 6.24: データパケット受信率

表 6.14: 提案手法 (trace1) との比較

最大速度	AODV	既存手法	提案手法 (trace2)	提案手法 (trace3)	提案手法 (trace4)
1m/s	93.7	27.9	11.7	45.9	45.4
5m/s	131.4	18.4	-5.9	18.0	27.1
10m/s	180.4	24.7	11.2	25.3	15.2
15m/s	151.9	7.9	0.4	3.9	10.5
20m/s	166.0	12.0	12.1	5.1	13.2

## 通信組数 11 の場合

通信組数が 11 組、50 端末中 22 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.23、データパケットの受信率を図 6.24 に示す。データパケット受信率について、各手法ごとに比較すると、平均で 3 %、最大で 4 % 程度の差が生じた。一方、コントロールパケット量については、平均で 59 %、最大で 64 % 程度の差が生じた。データ受信率に関しては手法ごとに大差がついていないことから、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。通信組数 8 のときと同様、各手法の値と全手法の平均値との乖離率を比較した結果、最もマイナス方向に乖離しているものは提案手法 (trace1) となった。提案手法 (trace1) とその他の手法とのコントロールパケット量の比較結果を表 6.14 に示す。

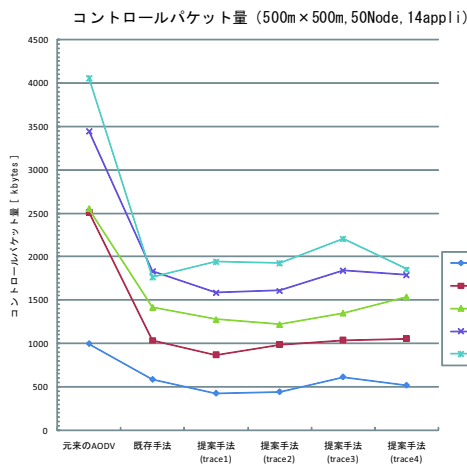


図 6.25: コントロールパケット量

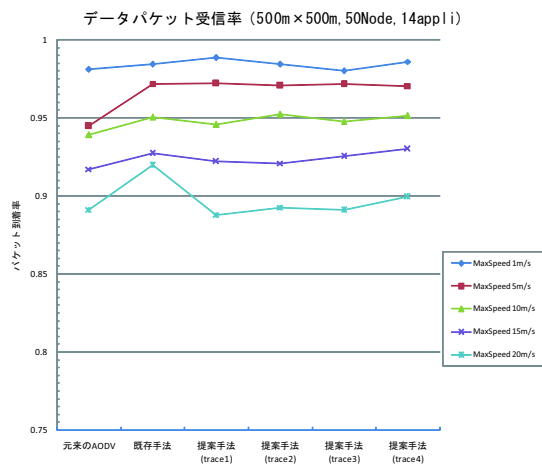


図 6.26: データパケット受信率

表 6.15: 提案手法 (trace1) との比較

最大速度	AODV	既存手法	提案手法 (trace2)	提案手法 (trace3)	提案手法 (trace4)
1m/s	135.7	38.0	4.1	44.7	22.0
5m/s	189.2	19.1	13.7	19.7	21.5
10m/s	100.0	10.9	-4.5	5.8	20.4
15m/s	117.3	15.7	1.4	16.3	13.0
20m/s	108.7	-9.2	-0.7	13.6	-4.5

## 通信組数 14 の場合

通信組数が 14 組、50 端末中 28 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.25、データパケットの受信率を図 6.26 に示す。データパケット受信率について、各手法ごとに比較すると、平均で 2 %、最大で 3 % 程度の差が生じた。一方、コントロールパケット量については、平均で 57 %、最大で 65 % 程度の差が生じた。データ受信率に関しては手法ごとに大差がついていないことから、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。通信組数 8 のときと同様、各手法の値と全手法の平均値との乖離率を比較した結果、最もマイナス方向に乖離しているものは提案手法 (trace1) となった。提案手法 (trace1) とその他の手法とのコントロールパケット量の比較結果を表 6.15 に示す。

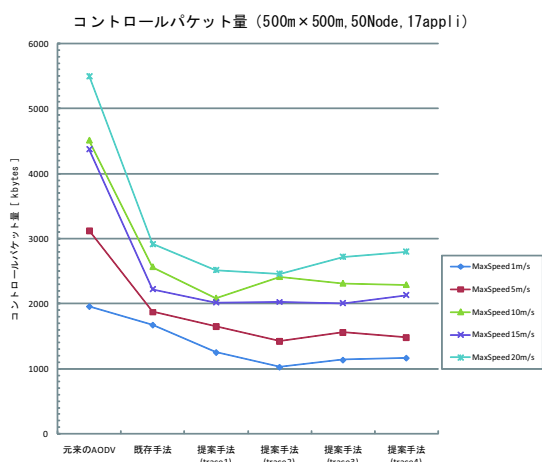


図 6.27: コントロールパケット量

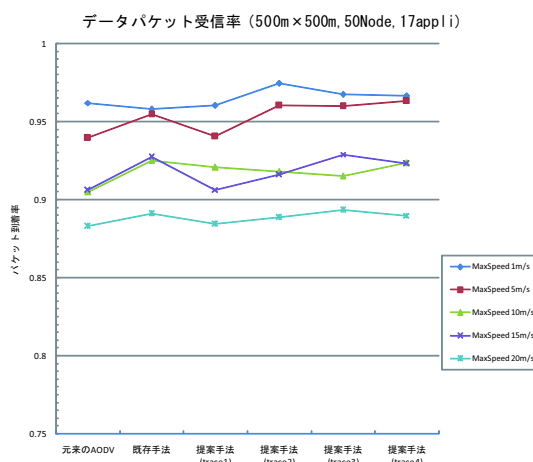


図 6.28: データパケット受信率

表 6.16: 提案手法 (trace2) との比較

最大速度	AODV	既存手法	提案手法 (trace1)	提案手法 (trace3)	提案手法 (trace4)
1m/s	90.9	63.1	22.0	10.7	13.7
5m/s	119.5	31.6	16.3	9.6	4.2
10m/s	87.1	6.3	-13.6	-4.2	-5.1
15m/s	116.5	9.7	-0.1	-0.9	5.5
20m/s	123.8	18.7	2.3	10.7	13.8

## 通信組数 17 の場合

通信組数が 17 組、50 端末中 34 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.27、データパケットの受信率を図 6.28 に示す。データパケット受信率について、各手法ごとに比較すると、平均で 2 % 程度の差が生じた。一方、コントロールパケット量については、平均で 53 %、最大で 55 % 程度の差が生じた。データ受信率に関しては手法ごとに大差がついていないことから、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。通信組数 8 のときと同様、各手法の値と全手法の平均値との乖離率を比較した結果、最もマイナス方向に乖離しているものは提案手法 (trace2) となった。提案手法 (trace2) とその他の手法とのコントロールパケット量の比較結果を表 6.16 に示す。

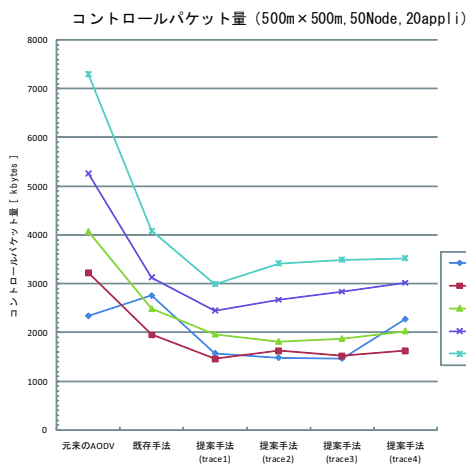


図 6.29: コントロールパケット量

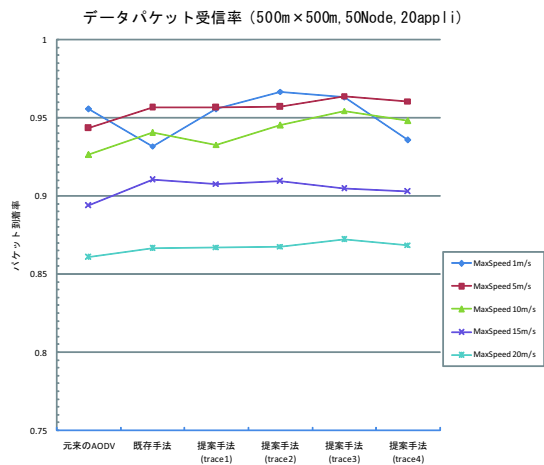


図 6.30: データパケット受信率

表 6.17: 提案手法 (trace1) との比較

最大速度	AODV	既存手法	提案手法 (trace2)	提案手法 (trace3)	提案手法 (trace4)
1m/s	49.1	75.8	-5.8	-6.9	44.8
5m/s	121.2	33.7	11.9	4.5	11.8
10m/s	108.1	26.7	-7.7	-4.6	3.4
15m/s	115.7	27.9	9.0	15.9	23.5
20m/s	144.4	36.7	14.4	16.9	17.8

## 通信組数 20 の場合

通信組数が 20 組、50 端末中 40 端末が通信状態にある場合のコントロールパケットの総量を図 6.29、データパケットの受信率を図 6.30 に示す。データパケット受信率について、各手法ごとに比較すると、平均で 2 %、最大で 3 % 程度の差が生じた。一方、コントロールパケット量については、平均で 53 %、最大で 55 % 程度の差が生じた。データ受信率に関しては手法ごとに大差がついていないことから、ここでもコントロールパケット量の比較に重点をおく。通信組数 8 のときと同様、各手法の値と全手法の平均値との乖離率を比較した結果、最もマイナス方向に乖離しているものは提案手法 (trace2) となった。提案手法 (trace2) とその他の手法とのコントロールパケット量の比較結果を表 6.17 に示す。

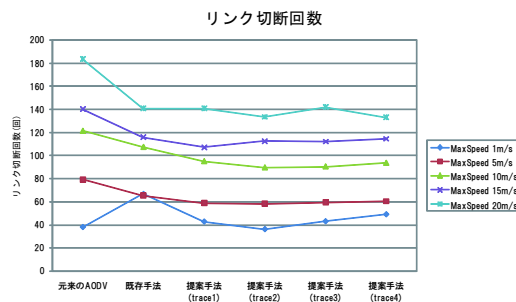


図 6.31: 各手法のリンク切断回数

表 6.18: 各手法の比較

	AODV	既存手法	提案手法 (trace1)	提案手法 (trace2)	提案手法 (trace3)	提案手法 (trace4)
コントロールパケット量	2991	1644	1354	1377	1453	1515
パケット到着率	0.927	0.943	0.940	0.944	0.943	0.943

通信組数、移動速度を変化させた時の、元来の AODV、既存手法、提案手法 (trace1 ~ 4) ごとのデータパケット受信率、コントロールパケット量のシミュレーション結果を示した。既存手法と提案手法では、提案手法での RREQ の経路情報保存用の拡張以外は、すべて同じ条件でシミュレーションを行った。

その結果、データパケット受信率に関しては、どの手法とも 3 % 程度の差しか生じなかったが、コントロールパケット量に関しては手法ごとに大きな差が生じた。AODV と提案手法を比較した結果、AODV に対して、提案手法 (trace1) では 55 %、提案手法 (trace2) では 55 %、提案手法 (trace3) では 51 %、提案手法 (trace4) では 49 % 程度、コントロールパケット量が少なくなっており、提案手法の有効性を示すことができた。また、既存手法と提案手法を比較した結果、既存手法に対して、提案手法 (trace1) では 17 %、提案手法 (trace2) では 16 %、提案手法 (trace3) では 7 %、提案手法 (trace4) では 13 % 程度、コントロールパケット量が少なくなっており、提案手法の有効性を示すことができた。

図 6.31 に各手法のリンク切断回数、表 6.18 に全シミュレーションでの各手法のコントロールパケット量、データ到着率の平均値を示した。結果として、全手法の中で提案手法 (trace1) が最もコントロールパケット量の削減が可能となる手法であるといえる。

## 第 7 章

### 結論

## 7.1 研究のまとめ

本稿では、AODV をベースに位置情報を用いて経路寿命の予測を行う手法において、コントロールパケットに経路上の一定数の中継端末の位置情報を追加することで、より情報量の多い経路表の構築を行い、コントロールパケットの転送量を削減する手法を提案した。移動速度・通信組数を変化させ、様々な状況でのシミュレーションを行い、従来の AODV、既存手法と比較して有効性を示した。従来の AODV とは、位置情報を用いず、経路表に従ってルーティングを行う従来の手法である。既存手法とは、経路寿命の予測を行い、より寿命の長い経路を使用することを目的としたもので、中継端末の RREQ の経路寿命値に対して、閾値を設けて、無駄な RREQ の転送を防ぐ手法である。

シミュレーションでは、RREQ の位置情報の保存数を 1 ~ 4 個 (trace1 ~ trace4) まで拡張して、比較評価を行った。その結果、提案手法 (trace1) と従来の AODV を比較した結果、データパケット受信率に関しては大差がなかったものの、コントロールパケット量に関しては、平均して 55 % 程度削減された。提案手法 (trace1) と既存手法を比較した結果、データパケット受信率に関しては大差がなかったものの、コントロールパケット量に関しては、平均して 17 % 程度削減された。理由は、提案手法において、RREQ に格納されている中継端末の位置情報による経路表の更新回数が増加したことにより、より長い経路寿命である経路情報が入手可能となり、結果としてリンク切断回数が減少したためと考えられる。

以上より、位置情報を用いて経路寿命の予測を行う手法において、コントロールパケットに経路上の一定数の中継端末の位置情報を追加し、各端末の経路表の更新機会を増やすことで、送信されるコントロールパケット量が削減されることを示した。

## 7.2 今後の課題

今後の課題として、以下の3点が挙げられる。

最大移動速度や通信組数の状況によって、提案手法 trace1 ~ trace4 の中でコントロールパケット量の削減率が変化する。そのため、移動環境や通信環境など状況に応じて最適な手法を用いることができるよう改善する必要がある。

次に、RREQ 内に保存する位置情報をより重要度の高い端末、他の通信で宛先端末となっている端末を選択して保存するなど、RREQ 内に保存する位置情報の重要性を高めることで、RREQ 内に保存された情報がルーティング時に使用される確率を高める必要がある。今提案では、RREQ 内に格納可能な位置情報保存数は1~4個と制限しており、制限された以上の端末情報については格納できない。AODV では、経路表の宛先端末エントリに従ってルーティングを行うため、各端末にとって宛先端末の位置情報は重要となってくる。将来、宛先となる端末を予測することは困難であるが、過去に宛先となった端末に重みづけをし、他の端末より優先度を上げるなど、改善の余地があると考えられる。

また、位置情報取得に関して、端末の位置・移動速度・移動方向については正確に入手可能であるとしているが、実際には誤差があるため、この点も考慮する必要がある。



## 謝辞

本研究を行うにあたり、指導教官の浅野正一郎教授には、親身のご指導と数多くの適切な助言を賜りました。ここに厚く御礼を申し上げます。また大学院生の生活を楽しく充実したものにしてくれた安達研究室の若木裕美氏、倉沢央氏、辻下卓見氏、浅野研究室の Ahmad Suffian 氏、劉智星氏、坂巻俊明氏、森本健一氏、三瓶真弘氏に深く感謝いたします。さらに、同学年として時に励ましあい、お互いを支えあった NGUYEN PHONG VU 氏、西村康孝氏に心より感謝いたします。最後に私の学生生活を支えて修士研究の機会を与えてくださった両親および兄、姉に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] C. Perkins. Ad-hoc on-demand distance vector routing, 1997.
- [2] David B Johnson and David A Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In Imielinski and Korth, editors, *Mobile Computing*, Vol. 353. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [3] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized link state routing protocol (olsr), 2003.
- [4] Brad Karp and H. T. Kung. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Mobile Computing and Networking*, pp. 243–254, 2000.
- [5] Young-Bae Ko and Nitin H. Vaidya. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. In *Mobile Computing and Networking*, pp. 66–75, 1998.
- [6] Mirco Musolesi, Stephen Hailes, and Cecilia Mascolo. Adaptive Routing for Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks. In *Proceedings of the IEEE 6th International Symposium on a World of Wireless, Mobile, and Multimedia Networks (WoWMoM 2005)*. Taormina, Italy. IEEE press, June 2005.
- [7] A. Caruso, S. Chessa, S. De, and A. Urpi. Gps-free coordinate assignment and routing in wireless sensor networks, 2004.
- [8] D. Niculescu and B. Nath. Position and orientation in ad hoc networks, 2003.
- [9] Yu Dong and David K. Y. Yau. Adaptive sleep scheduling for energy-efficient movement-predicted wireless communication. In *ICNP '05: Proceedings of the 13TH IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'05)*, pp. 391–400, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [10] S. Chakraborty, D. Yau, and J. Lui. On the effectiveness of movement prediction to reduce energy consumption in wireless communication, 2003. Extended Abstract in: Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS), San Diego, CA, June 2003.
- [11] D. Niculescu and B. Nath. Ad hoc positioning system (aps) using aoa. In *Proceedings of INFOCOM 03*, 2003.

- 
- [12] Ingo Gruber and Stefan Hogg. Experimental results with a gps and signal strength extended ad hoc routing protocol. *lcn*, Vol. 00, p. 710, 2003.
- [13] Andreas Savvides, Chih-Chieh Han, and Mani B. Strivastava. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. In *Mobile Computing and Networking*, pp. 166–179, 2001.
- [14] Stefano Basagni, Imrich Chlamtac, Violet R. Syrotiuk, and Barry A. Woodward. A distance routing effect algorithm for mobility (dream). In *MobiCom '98: Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference*, pp. 76–84, 1998.
- [15] T. Camp, J. Boleng, B. Williams, L. Wilcox, and W. Navidi. Performance comparison of two location based routing protocols for ad hoc networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 1678–1687, 2002.
- [16] W. Su, S. Lee, and M. Gerla. Mobility prediction and routing in ad hoc wireless networks, 2000.
- [17] 山下優, 阪田史郎. 高速移動アドホックネットワークにおけるノードの位置と移動速度の情報を用いたルーティング制御方式, DICOMO 2006. July 2006.
- [18] 松尾太一, 山下優, 増田修士, 阪田史郎. アドホックネットワークにおける位置情報を用いたリンク切断回数の削減と経路維持の長時間化. 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会 (IN 研究会) 信学技報, Vol.106, No.358, IN2006-108, pp.115-120, 2006.11.
- [19] QualNet 4.0. ”<http://www.scalable-networks.com/>”.

## 発表文献

- 木村 英雄, 浅野 正一郎 :  
”アドホックネットワークにおける位置情報を用いた経路構築に関する提案”  
電子情報通信学会 RCS 研究会 信学技報, Vol.107, No.439, SIP2007-173,  
pp.91-96, 2008.1