

Title	アドホックネットワークの非常時通信への適用に関する研究
Author(s)	高島, 大裕
Citation	
Issue Date	2005-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1922
Rights	
Description	Supervisor:篠田 陽一, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

アドホックネットワークの非常時通信への適用に 関する研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

高島 大裕

2005 年 3 月

修 士 論 文

アドホックネットワークの非常時通信への適用に 関する研究

指導教官 篠田陽一 教授

審査委員主査 篠田陽一 教授
審査委員 敷田幹文 助教授
審査委員 丹康雄 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

310059 高島 大裕

提出年月: 2005 年 2 月

概 要

近年無線技術は、急激に発達している。中でも携帯電話、無線 LAN や bluetooth 等は、現代社会において広く使用されている。これらの無線技術の発達とともに、アドホックネットワークが注目されている。

アドホックネットワークは、基地局やルータなどが介在せず、ノードが相互に接続するネットワークである。またアドホックネットワークは、送信ノードと受信ノードが無線範囲外に存在していても、中継ノードが存在すれば通信が可能となるマルチホップ機能を持っている。さらにアドホックネットワークは、ノードの移動にも対応している。ノードの移動によって、アドホックネットワークのトポロジは、急激な変化を起こす。そのため経路の確立と維持を行うルーティングプロトコルは、とても重要となる。

アドホックネットワークの用途として、地震など災害時の非常時通信への利用が挙げられる。特に、近年では、阪神大震災、新潟中越地震、スマトラ沖地震と大規模な地震が多発しているため特に注目されている。地震など災害が起きた場合、生存情報やライフライン情報等の情報の交換はとても重要となる。しかし災害時には、断線や基地局などの故障により通信インフラが使用不能となる可能性がある。そのため、携帯電話や PDA など無線端末によって構成されるアドホックネットワークが既存の通信インフラに変わるものとして注目されている。しかし、まだアドホックネットワークによる非常時通信は実現されていない。これは、非常時通信に適したルーティングプロトコルが見つかっていないためである。

そこで本研究では、ルーティングプロトコルを定量的かつ全体的な評価を行うフレームワークの構築を行う。これは、アドホックネットワークのルーティングプロトコルは数多く開発されているが、開発されたルーティングプロトコルの評価は相対的にしか行っていないためである。また、災害時に構築するアドホックネットワークの問題点を抽出し、非常時通信に適したルーティングプロトコルについて考察する。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	アドホックネットワーク	3
2.1	アドホックネットワークの説明	3
2.2	アドホックルーティングプロトコル	5
2.2.1	アドホックルーティングプロトコルの説明	5
第3章	アドホックルーティングプロトコルの性能指標	8
3.1	性能指標の種類	8
3.2	性能指標を求めるための実験パラメータと評価指標	11
3.2.1	実験パラメータや評価指標の多様性	11
3.2.2	性能指標の分類方法	11
3.2.3	各性能指標を表すための実験パラメータと評価指標	11
第4章	評価方法	16
4.1	アドホックネットワークの評価方法	16
4.1.1	実験環境	16
4.1.2	疑似実験環境	17
4.1.3	移動モデル	25
4.1.4	予備実験に使用したルーティングプロトコル	25
4.2	評価方法を用いた評価例	26
4.2.1	ソフトウェアシミュレーション	26
4.2.2	有線ネットワークによる疑似実験環境	30
4.3	まとめ	30
第5章	非常時通信への適用	31
5.1	非常時通信中で使用できるインフラ	31
5.2	非常時通信に必要な性能指標	34
5.2.1	移動ノードのみで構築されたアドホックネットワーク	36
5.2.2	固定ノードのみで構築されたアドホックネットワーク	36
5.2.3	固定，移動ノードにより構築されたアドホックネットワーク	36
5.2.4	ルーティングプロトコルの決定方法	37

第 6 章 今後の課題	38
第 7 章 おわりに	39

目 次

2.1	wireless local area network	4
2.2	ad-hoc network	4
2.3	routing protocol	5
4.1	無線ネットワークのトポロジ例	18
4.2	シミュレーショントポロジ	19
4.3	システムトポロジ	20
4.4	データの流れ	20
4.5	カプセル化	21
4.6	ソフトウェア	21
4.7	テストトポロジ	22
4.8	A-B 間の ICMP 応答	23
4.9	A-C 間の ICMP 応答	23
4.10	A-D 間の ICMP 応答	24
4.11	アドホックネットワークの実験トポロジ	24
4.12	Random Waypoint	25
4.13	pause time とデータ到達性の関係	27
4.14	ノード速度毎の pause time とデータ到達性の関係 (AODV)	27
4.15	ノード密度とデータ到達性の関係	28
4.16	密度一定におけるノード数とデータの到達性の関係	29
4.17	ノード数と構築範囲とデータの到達性の関係	29
5.1	Wireless network	32
5.2	Mobile Ad-hoc network by moving node	33
5.3	Mobile Ad-hoc network by fixed node	33
5.4	Mobile Ad-hoc network by moving node and fixed node	34
5.5	Mobile Ad-hoc network by moving node and fixed node	35

表 目 次

3.1	入力と出力の関係	10
3.2	ルーティングプロトコルの性能指標	10
3.3	実験パラメータと評価指標	14
4.1	ノード間のデータの到達性	18
4.2	実験諸元	23
4.3	アドホックネットワークの実験諸元	25

第1章 はじめに

無線通信技術は、近年急激に発達している。中でも、携帯電話、無線 LAN や bluetooth 等は、現代社会において広く使用されている。携帯電話は、日本人の 4 人に 3 人が使用しており、とても高い普及率となっている。また、無線ネットワークは、現在多くの企業や家庭で使用されている。無線ネットワークを使用することにより、自分のオフィススペース以外でも、ネットワークを用いた作業が可能となった。このように、現在無線技術はいたるところで使用されている。

これらの無線技術の発達とともにノードが自律的に他ノードとネットワークを構築するアドホックネットワークが注目されている。このアドホックネットワークは、既存のインフラがない環境でもネットワークを構築できる。そのため、アドホックネットワークは、イベントなど既存のインフラがない場合や、地震など既存のインフラが故障した場合に使用されている。アドホックネットワークは、携帯電話や PDA などモバイルノードで構築されるため、ノードが移動する。ノードの移動により、アドホックネットワークのトポロジは急激な変化を起こす。そのため、ノード間の通信では、経路制御を行うルーティングプロトコルの必要性はとても高い。しかし、インターネットなどの有線によるインフラで用いられてきたルーティングプロトコルは、トポロジの急激な変化に対応する必要がなかったため、使用できない。そのため、アドホックネットワークのルーティングプロトコルは、独自に至る所で開発され、多種多様なルーティングプロトコルが存在する。現在も、ルーティングプロトコルは、いろいろな用途に応じて開発が行われている。しかし、これらのルーティングプロトコルの特性評価は、その用途に応じた評価しかされず、定性的な分類、評価しか行われていない。これでは、非常時通信などの特定の用途に用いる場合、どのアドホックネットワークのルーティングプロトコルが適切であるか判断できない。そこで、本研究では、アドホックネットワークの性質を定量的な評価に基づいて分類を行うためのフレームワークを構築する。

近年、日本では、阪神大震災や新潟県中越地震など、地震による被害が多い。これらの地震が起きた場合に、情報はとても重要となった。例えば、家族の安否（生存情報）、食料や水等がある場所などの情報のやりとりが挙げられる。阪神大震災でも、人が集まると、衣食の情報交換があった。また、生存情報が速く集まることで、誰が不在なのかが分かり、救助活動の判断材料に使えることも挙げられる。現在これらの情報は、インターネットや携帯電話などによって取得できる。しかし、被災地においては、電話線の断線や基地局の故障が起きる可能性が高い。それにより、インターネットなどのインフラが使用不可能になる。しかし、現在、携帯電話や無線ネットワークが多く普及しており、それら

のモビリティを使用したアドホックネットワークによる通信が考え出された．これは，携帯電話などの移動ノードを用いたアドホックネットワークの構築や，無線基地局など固定的なノードを用いたアドホックネットワークの構築することである．しかし，現在は，まだ実現されておらず，自衛隊などによる，車間でのアドホックネットワークの構築が行われているのみである．そこで，非常時通信の必要要件と定量的に行った分類を用いて，どのアドホックネットワークが適切であるかの評価を行う．

第2章 アドホックネットワーク

この章では、アドホックネットワーク [14] の説明を行う。また、アドホックネットワークのルーティングプロトコルの種類と特徴について説明を行う。

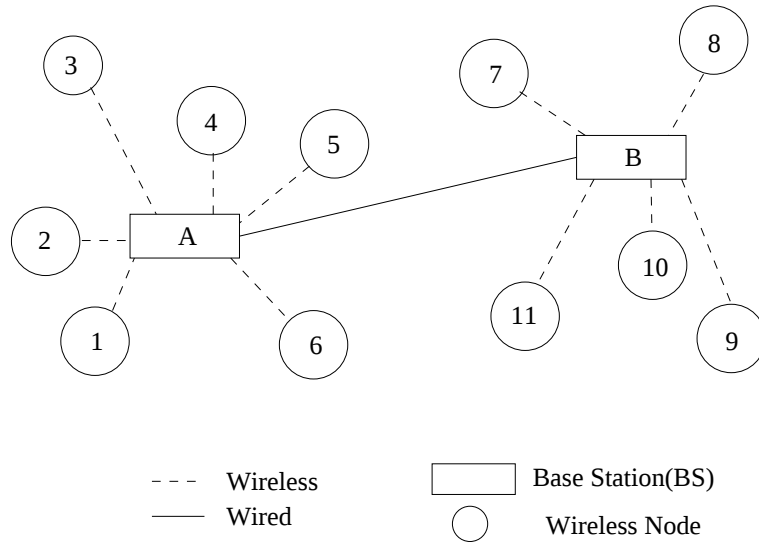
2.1 アドホックネットワークの説明

アドホックネットワークは、基地局やルータなどが介在せず、ノードが相互に接続する形態をとる。そのため、アドホックネットワークは、自己編成機能と適応性を備えている。これは、形成されていたネットワークが管理者（基地局やルータ）を必要とせず、勝手に違った形のネットワークとなり得ると言うことである。また、アドホックという語句は、「様々な形態を取り得る」ということを意味する。アドホックネットワークは、移動が可能で、スタンドアロンになったりネットワークを形成したりすることからアドホックという語句を使用している。アドホックネットワークのノードや端末は、他の端末を検出して通信に必要なハンドシェイクを行い、情報やサービスを共有することでアドホックネットワークを構成する。

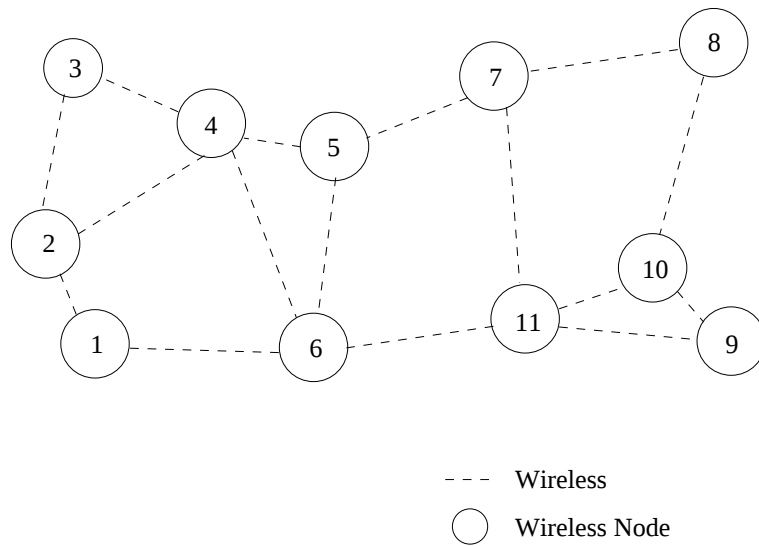
現在、アドホックネットワークは、無線通信によって構成されることが主流となっている。そのため、現在のアドホックネットワークは、無線通信とネットワークングの能力を備えた2台以上の端末の集まりを示す。ノードは、そのノードの無線範囲内のノードだけでなく、無線範囲外のノードも通信することができる。後者の場合、パケットは中継ノードによって宛先まで転送される。中継ノードを介することで宛先まで通信を行うことをマルチホップと呼ばれている。

現在、無線を使用したネットワークとして、無線 LAN がある。現在使用されている無線 LAN を図 2.1 に示す。無線 LAN は、基地局が存在し、基地局を介してノード間で通信を行う。例えば、ノード 1 からノード 8 にデータを送信する場合、ノード 1 は、基地局 A と B を介して、ノード 8 にデータを送信する。そのため、無線 LAN においては、基地局がネットワークの中心となり、基地局の故障が起こると通信ができなくなる。

アドホックネットワークは図 2.2 に示す。アドホックネットワークは、基地局が存在せず、ノード同士が直接通信を行う。例えば、ノード 1 からノード 8 にデータを送信する場合、ノード 1 は、ノード 6・5・7 を介してノード 8 に通信が行われる。また、これ以外にも、ノード 6・11・10 を通る経路もある。このように、アドホックネットワークでは、経路の途中にあるノードが故障しても、他の経路を通ることで、通信が可能になる。そのため、ノード間で通信を行う場合、経路制御がアドホックネットワークでは重要となる。



☒ 2.1: wireless local area network



☒ 2.2: ad-hoc network

また，アドホック無線ノードは，携帯電話やPDA等様々な形態をとり得るため，端末の演算，記憶，通信能力は多様性に富んでいる．そのため，アドホックノードは，近くの接続可能なノードを見つけるだけでなく，デバイスタイプなども認識しなくてはならない．様々なアドホックモバイル端末が存在するということは，端末のバッテリー容量も様々なであることを意味している．アドホック無線ネットワーク通信は，各ノードが他のノードからのパケットを転送することによって実現されるので，電力消費は重要な問題となる．

2.2 アドホックルーティングプロトコル

2.2.1 アドホックルーティングプロトコルの説明

アドホックネットワークは，ノードの移動があるためトポロジが急激に変化する．そのため，ノード間の経路情報を管理するルーティングプロトコルの必要性は大きい．そのルーティングプロトコルでは，アドホックネットワーク独自の特徴に対応したルーティングプロトコルが必要となる．そのため，いろいろな技術と連動したアドホックネットワークが構築され，現在では60種類以上のルーティングプロトコルが存在する．

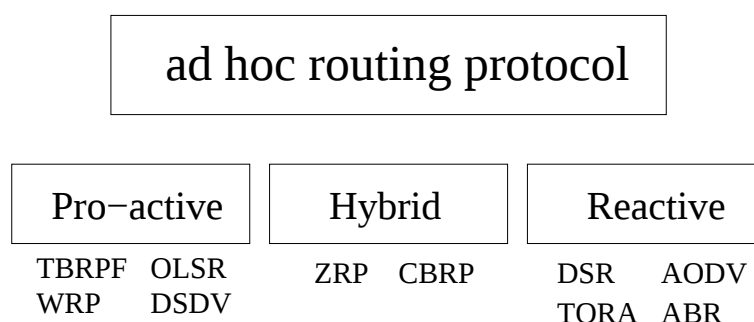


図 2.3: routing protocol

アドホックルーティングプロトコルは，現在図 2.3 のように 3 つに分類されている．各アドホックルーティングプロトコルの分類について，以下に説明を行う．

Pro-active 型

テーブル駆動型のルーティングプロトコルは，ネットワーク上の各々のノードから他の全てのノードへ，矛盾のない最新のルーティング情報を維持しようとする．そのようなプロトコルでは，各ノードはルーティング情報を格納するためルーティングテーブルを持っている．そして，ネットワークトポロジの変化に対応して，ネットワーク全体に経路の更新情報を送信する．この更新情報に沿ってルーティングテーブルを書き換え，ネットワー

クトポロジの整合性を維持する。

しかしこの通信では，常にパケットを送信して経路を維持する必要があるため，場合によっては，無駄な電波発信が頻繁に起こる．そのため，経路表の更新を行う周期の設定や経路表によってカバーする地理的範囲の設定が重要となる．常に最新の経路表を作るためには，電波の発信数が多くなり，電力の消費が大きくなる．そのため，Pro-active 型は，通信が頻繁に行われるネットワークに有効であると考えられている．通信が少ないネットワークでは，通信時以外にも無駄な経路の更新情報が流れてしまい，電力消費が大きくなってしまうからである．

なお，Pro-active 型でのルーティングプロトコル間の違いとは，ルーティングに関連した必要なテーブル数と，経路情報の送信方式の違いであることが多い．

Reactive 型

送信元始動によるオンデマンド型のルーティングプロトコルである．このルーティングは，送信元ノードが要求したときにのみ経路を作成する．あるノードにおいて宛先への経路が必要になった時，ネットワーク内で経路探索プロセスを起動する．いったん経路が発見，確立されると，宛先へのアクセスが不可能になるか経路が不必要になるまでは，何らかの手段によってその経路が維持される．

アドホックネットワークは，モバイルノードを使用することが多いため，ほとんどのノードが電池で駆動している．ゆえに，むやみやたらに電波を発信すると，すぐに電池がなくなってしまう．また，常に各ノードは移動しているので，数分前に作った経路表は，意味がないことが多い．そのため，通信が直前に経路表を作る Reactive 型が考えられた．通信を行わないときは，全く電波の発信が行われないため，駆動時間の長時間化にも貢献している．しかし，データの通信では，一度経路を確立する必要があるため，データが送信されるまでに時間が長くなってしまう．そのため，Reactive 型プロトコルは実際に通信可能になるまでの時間が長くなってしまってもかまわないようなネットワークに使用される．

Reactive 型のルーティングの特徴を以下にまとめる．

- データを通信するとき以外，通信をしない．
- 経路要求から経路決定までに遅延がある．

Hybrid 型

Pro-active 型のルーティングプロトコルと Reactive 型のルーティングプロトコルの両方を用いた複合的なルーティングプロトコルである．そのため，Pro-active 型と Reactive 型の利点，欠点を有している．ある条件下では Pro-active 型と Reactive 型を使い分けを行っているルーティングプロトコルが多い．このルーティングプロトコルで代表的なものに Zone Routing Protocol(ZRP) [4] がある．これは，近くにいるノードは Pro-active 型，遠

くにいるノードは Reactive 型で経路制御を行う。しかし、適切なクエリ制御が存在しないため、性能がとても悪い。このように、Hybrid 型のルーティングプロトコルは、経路制御が複雑なため、経路が不安定となり、現在実用的なものはないといえる。

現在のアドホックルーティングプロトコルの分類は、上記のような技術的な分類が行われているのみである。しかし、現在では Global Positioning System(GPS) の位置情報と連動して、経路を作成するルーティングプロトコルである Location-Aided Routing(LAR) [7] などが開発されている。これは、上記の分類に当てはまらず、他の技術と組み合わせることもルーティングプロトコルの開発では行われるようになってきた。また、上記のような分類だけでルーティングプロトコルの性質は定まらず、アドホックルーティングプロトコルの経路が決定するための基準によってもアドホックルーティングプロトコルの性質は異なってしまう。そのためこの分類では、どのルーティングプロトコルが用途に応じて適切であるかを判断することは難しい。アドホックネットワークの構築者は、どのルーティングプロトコルが適切であるか分からないため、各々でルーティングプロトコルを開発し、各々の用途で使用されている。そこで、適切なルーティングプロトコルを選択できるフレームワークを作成する必要がある。

第3章 アドホックルーティングプロトコルの性能指標

ここでは、アドホックルーティングプロトコルの性能指標を示す。この性能指標により、用途に適したルーティングプロトコルを選ぶことが可能となる。

3.1 性能指標の種類

現在ルーティングプロトコルの性能指標は、明確ではない。そのため、どのルーティングプロトコルが各々の用途によって、適切であるかが分からない。そこで、アドホックルーティングプロトコルを表す性能指標を明確にすることで、その性能指標に応じて分類できないかと考えた。

- 横軸

以下に示す評価指標は、性能を評価するための入力となる。この評価指標は、評価を行う際のパラメータとして与えるものとなる。

- 規模

ノードの数やアドホックネットワークの構築範囲がアドホックネットワークの性能への影響について評価するための性能指標である。イベントで使用する場合は、会場の広さや入場者数によって、アドホックネットワークの規模は決まる。そのため、会場の広さや入場数などの規模によってアドホックネットワークの管理者は、どのルーティングプロトコルが高性能であるか考察する必要がある。この性能指標は、災害時などいろいろな用途でも考慮する必要がある重要な性能指標となる。

この性能指標によって、アドホックネットワークの構築する規模に応じたルーティングプロトコルの決定が可能となる。

- 密度

ノードの密度のアドホックネットワークの性能への影響について考察するための性能指標である。各々の用途に応じた密度と比較することで適切なルーティングプロトコルを選択することが可能となる。また密度は、ノードの数とアドホックネットワークの構築範囲によって決定されるため、「規模」との関係も考

慮する必要がある。しかし、アドホックルーティングプロトコルを評価するに当たり、規模と密度の考え方は異なるため、別々に評価する必要がある。これは、密度が高いと、規模が大きくなるは同義ではないからである。

- － 移動性

アドホックネットワークの構築には、移動ノードが使用されることがある。なぜなら、PDA や携帯電話、ノートパソコンなどによってアドホックネットワークを構築することがあるからである。ルーティングプロトコルは、ノードが移動するとトポロジが変化するため、そのトポロジに追従して経路の変更を行う必要がある。この性能指標は、ルーティングプロトコルが、トポロジの変化に対応できるのかを表す。この性能指標はノードの移動がないアドホックネットワークでは、必要ない指標である。

- － 通信の頻度

通信は、状況やアプリケーションに応じて、通信の頻度は変化する。インターネットにおいても、ストリーミングを流す時と、web を見て回る場合では、通信の頻度は全く違う。アドホックネットワークは、特定の用途に用いるため、通信の頻度が多いか少ないかが予想できる。そのため、そのアドホックネットワークの通信の頻度がどちらかによって多いか少ないかが分かるのではないかと考える。

- 縦軸

以下に示す性能指標は、出力となる部分である。これは、ルーティングプロトコルを評価するための指標となる。

- － 電力の使用効率

携帯電話やPDAなどのモバイルノードは、バッテリーで駆動していることが多い。バッテリーは、有限であり、バッテリーの容量を全て使うとそのノードは、使用が不能となってしまう。アドホックネットワークの場合、ノードが少なくなり、無線の範囲内にノードがいなくなると、マルチホップもできず、通信ができなくなる。そのため、そのバッテリーを効率良く使用し、ノードを長時間通信可能な状態にすることが必要となる。この性能指標は、バッテリーの効率利用を表している。

- － 変化に対する追従性

変化に対する追従性を表す。アドホックネットワークのルーティングプロトコルでは、トポロジの変化が急激なため、絶対に必要な能力である。そのため、全てのアドホックネットワークのルーティングプロトコルにおいて提供される特徴となる。この性能が悪いルーティングプロトコルは、使えないと言っても過言ではない。ノードの移動性に対する追従性、ノードの数など、アドホックネットワークの規模に対する追従性などによって表せる。

表 3.1: 入力と出力の関係

出力	電力効率 追従性 即応性
入力	
規模	
密度	
移動性	
通信の頻度	

表 3.2: ルーティングプロトコルの性能指標

	Pro-active 型	Reactive 型
規模		大規模
密度	高密度	低密度
移動性	低移動	
通信の頻度	多い	少ない

－ 経路確立までの即応性

この特徴は、経路が確立にどれだけ時間がかかるかを表す。これにより、速めに相手先に届けたい情報がある場合に、どのルーティングプロトコルだと経路の確立に時間がかからないかが分かる。

この性能指標によって、ある用途の適切なアドホックネットワークを選択することができる。これらの性能指標の中には、ルーティングプロトコルを評価するにあたり、実験を行うための性能指標となるもの（入力）と、得られる結果によって導き出される性能指標（出力）がある。規模、密度、移動性や通信の頻度は、実験を行う前に実験のパラメータとして与えることが可能である。しかし、電力効率や即応性は実験を行う前のパラメータとして与えることができず、実験の結果から分かるものである。入力と出力を表 3.1 に分ける。これにより、12通りの結果が出てくることが分かる。この12通りの結果によって、用途に応じた適切なアドホックルーティングプロトコルを選択することが可能となる。

なお、ルーティングプロトコルの3つの分類のうち、Pro-active 型と Reactive 型の特徴を表 3.2 に示す。Hybrid 型は、Pro-active 型と Reactive 型両方の特徴を併せ持ち、Hybrid 型のルーティングプロトコル各種に応じて特徴が変化する。

3.2 性能指標を求めるための実験パラメータと評価指標

この章では、ルーティングプロトコルの評価で用いられている性能指標について述べる。

3.2.1 実験パラメータや評価指標の多様性

アドホックネットワークのルーティングプロトコルは現在多く開発されてきた。ルーティングプロトコルの開発時には、ルーティングプロトコルの評価を行う。評価しなければ、そのルーティングプロトコルが有用であるか分からないからである。しかし、評価指標や実験パラメータ [3] [10] [6] [9] は、至る所でルーティングプロトコルが開発され、多数の性能指標がある。そのため、どの実験パラメータや評価指標で評価すれば、適切であるかが分からない。ある特徴を意図して作成したルーティングプロトコルでも、他の特徴があるかもしれない。さらに、違う実験パラメータでも、同じ性能指標を評価している可能性がある。そのため、実験パラメータや評価指標を適切な分類を行う必要がある。

3.2.2 性能指標の分類方法

本研究では、用途に応じて、適切なルーティングプロトコルを選択することを目的としている。適切なルーティングプロトコルを選択するためには、ルーティングプロトコルの性能指標を測定する必要がある。そのため、ルーティングプロトコルの性能指標によって、実際に使用されている実験パラメータや評価指標の分類を行う。

3.2.3 各性能指標を表すための実験パラメータと評価指標

現在、ルーティングプロトコルの評価には、多くのパラメータや評価指標が使用されている。ここでは、性能指標を表すための評価指標を分類し、従来使用されている実験パラメータと評価指標の説明を行う。

規模

- ノードの個数 [個]
ノードの個数は、密度や規模を表すのに使用されている。イベントの入場者数や非常時通信における被災者の数はある程度予想が可能である。そのときに、どのルーティングプロトコルが適しているのかが分かる。
- 面積 [m^2]
アドホックネットワークの構築範囲を表す。アドホックネットワークの構築範囲は、用途によって変化するため、評価する必要がある。この実験パラメータは、規模を

表すのに使用される．また，面積は密度に対しても，影響を持つ．

- 最大ホップ数 [個]

ホップ数が分かることで，ノードがどれだけ離れているかが分かる．この最大ホップ数は，構築面積が大きければ大きいほどホップ数は大きくなる．これが分かることにより，ネットワークの特性として，ホップ数に応じてどのような影響があるかが分かる．

密度

- ノード密度 [個/ m^2]

ノード密度は，一定の面積あたりのノードの個数を表す．これは，ルーティングプロトコルがノード数に関係なく，どれだけの密度で動作できるか評価できる．また，密度を一定にすることにより，どれだけの規模のアドホックネットワークも動作できるかも分かる．この実験パラメータは，密度を評価することに使用される．ただし，この実験パラメータも規模に対して，影響をもつ．

ノードの移動性

ノードの移動性を評価するに当たり，ノードが移動する頻度とノードが移動するスピードがある．それらを実験では，以下のパラメータを使用して評価を行う．

- pause time[s]

Random WayPoint の移動モデルで使用されているパラメータで，ノードの停止時間を示す．これは，Random Waypoint 以外の移動モデルでは使用することはできないが，ノードの移動性を表す実験パラメータとして広く使用されている．pause time の時間が短ければ，ノードが頻繁に動くためノードの移動性が高いといえる．ノードが頻繁に動けば，トポロジの変化が多く起こり，ノードの動作が少なければ，トポロジの変化は少ない．そのため，この実験パラメータは，ノードの移動性の評価のためのパラメータとしてよく使用される．

- ノードの移動速度 [m/s]

ノードの移動速度を実験のパラメータとして与え，評価を行う．なぜこのパラメータが必要なのは，アドホックネットワークが，人や車などノードの移動速度が違うノードで構成される可能性があるからである．ノードの移動速度を実験パラメータとして与えることで，ノードの移動性が高い．これにより，どの移動速度まで，アドホックネットワークが追従できるかが分かる．

通信の頻度

- 送信データ数 [個]

送信データ数は、送信したデータの数を表す。送信データ数が多い場合は、頻繁に通信を行っていることが分かる。これにより、通信の頻度の実験が可能となる。

電力の使用効率

電力の使用効率を評価するためには、ノード全体の平均電力の使用効率と、ノードごとの電力量のばらつきを評価する必要がある。なぜなら、電力の使用効率が高い場合でも、あるノードのみ電力の使用量が高い場合があるからである。

- 電力 [W]

この性能指標は、電力を効率良く使用することを目的とする。アドホックネットワークでは、モバイルによって構築されることが多く、バッテリーの消費を抑えることで、長時間ネットワークを構築できる。そのため、極力電力を抑えて使うことが必要であり、この評価指標を使用する。

- オーバヘッド [byte]

この性能指標は、経路作成や経路情報の更新に使われるデータ量を表す。このデータ量が多い場合は、その分電力が多く使用されていることを表す。この評価指標も、ノード全体の平均オーバヘッドや、ノードごとのオーバヘッドの量によって評価する必要がある。

- 経路制御用パケット/受信パケット [個] (平均パケット数)

ノード間の通信 1 パケット当たりの経路制御に使用したパケットの数をこの評価指標は表す。評価指標の値が小さければ、そのルーティングプロトコルは効率よくパケットを送信できていることが分かる。これにより、電力や帯域などの効率性が分かる。

- 経路制御用パケットサイズ/受信パケット数 [byte] (平均パケットサイズ)

ノード間の通信 1 パケット当たりの経路制御に使用したパケットの数をこの性能指標は表す。この値が小さければ、ルーティングのためのパケットが多くないことになる。これにより、電力や帯域などの効率性が分かる。

変化に対する追従性

- データの到達性 [%]

データの到達性は、送信したデータが受信先で受信した確率を示す。そのため、データの到達性があるということは、経路が確立されていることを示す。経路が確立されているとは、経路が変化しても追従していることを示す。そのため、この基準は、

経路の追従性を示す．経路情報を維持し続けることは，データを確実に届かせることができるため，アドホックネットワークにおいて重要である．

- スループット [byte/s]
アドホックネットワーク全体での通信速度を表す．この性能指標には，経路制御に使用されるパケットも含めたスループットかと送信したいデータのためのみのスループットがある．送信データのスループットを測定することにより，どれだけ多くのデータを送信できたかが分かる．また，この性能指標は帯域 [byte/s] と同じ意味を持つ．

経路確立までの即応性

- パスの経路確立時間 [s]
2つのノード間のパスが経路情報にない場合や，経路が変化する場合，経路が確立するまで時間がかかる．そのため，パスの接続までの時間による評価ができる．しかし，これはノード間の距離によって，経路が確立されるまでの時間が変化する．そのため，この評価指標を使用する場合，ノード間の距離も考慮する必要がある．この時間が短ければ，パスの確立や再確立への即応性があると言える．

上記の分類方法をまとめると，表 3.3 のような分類となる．

表 3.3: 実験パラメータと評価指標

		電力効率			
		電力	オーバーヘッド	平均パケット数	平均パケットサイズ
移動性	pause time ノードの移動速度				
規模	ノードの個数 面積 ホップの回数				
密度	ノードの密度				
通信の頻度	送信データ数				

		追従性	即応性
		データの到達性	パスの経路確立時間
移動性	pause time ノードの移動速度		
規模	ノードの個数 面積 ホップの回数		
密度	ノードの密度		
通信の頻度	送信データ数		

これらの実験パラメータや評価指標を用いることで、アドホックルーティングプロトコルの性能指標が分かる。これらの性能指標によって評価することで、どの用途に応じたルーティングプロトコルであるかが分かる。

第4章 評価方法

この章では，前章で示された性能指標によって評価するための方法を述べる．

4.1 アドホックネットワークの評価方法

4.1.1 実験環境

前章で性能指標を分類したが，その性能指標によってルーティングプロトコルを評価する必要がある．現在，アドホックネットワークの評価する環境において，ソフトウェアシミュレーションと実機による実験が行われてきた．それらの環境を以下にまとめる．

- ソフトウェアシミュレーション

ソフトウェアシミュレーションは，コンピュータ上でノードを再現し，コンピュータ上でネットワークの実験を行えるものである．ソフトウェアシミュレーションとして，代表的な物に，Network Simulator version 2(NS-2) [1] がある．実験環境を簡単に用意でき，コンピュータが1台あれば実験は可能であるという利点がある．また，実験ノードの数もほぼ無制限となり，実験の再現性もある．しかし，実際の実験環境ではないため，測定結果をそのまま使用できない．さらに，ノード数や実験環境に依存するが，実験時間が長くなる．例えば，1000 ノード，100 秒の実験を行った場合，実時間は3日間の時間がかかった．また，実際に実機で使用する実装以外に，ソフトウェアシミュレーション用のルーティングプロトコルの実装が必要となる．ソフトウェアシミュレーションの大半は，実験ログを出力し，一括管理もされており，そのログを解析することで，ルーティングプロトコルの評価が可能である．

- 実機による環境

実機による実験環境では，PDA などのモバイル端末を使用し，実際のルーティングプロトコルやアプリケーションを用いた実験が可能である．この実験環境では，実機を用い，実際の環境で実験が可能であるため，実験の精度は高い．実験時間と実時間は，同じ時間となる特徴がある．また，実際の環境で使用するプロトコルやアプリケーションが使用できる．しかし，ノードの用意や，実験場所の確保など，準備に時間，お金などコストが大きい．また，無線通信は気温など気象条件に左右されるため，同じ実験環境を用意するのが難しい．そのため，ルーティングプロトコルの評価し，比較することは，気象条件などを考慮する必要があり，難しくなる．実機

による実験では，tcpdump や ethereal などのアプリケーションを使用して，実験ログを収集でき，ルーティングプロトコルの解析も行うことができる．しかし，ノードごとに実験ログがあり，一括管理をするためのシステムが必要となる．

上記のような環境でアドホックネットワークの実験が行われている．しかし，実機による実験は，その環境を用意することに多大なお金や時間などのコストがかかるため，ソフトウェアシミュレーションのみの実験でルーティングプロトコルの評価や，実験が行われることが多い．しかし，ソフトウェアシミュレーションによる評価や実験だけでは，実際のマシンを使ったルーティングの動作は分からない．そこで，実際のアプリケーションやルーティングプロトコルの動作する疑似実験環境を作成した．

4.1.2 疑似実験環境

無線通信を有線通信でエミュレートすることで疑似実験環境を実現した．なぜなら，現在，有線ネットワークによる実験環境が多く構築されており，それらの資源を利用することが可能となるからである．この環境では，有線ネットワークの物理層やリンク層によって無線ネットワークをエミュレートすることでネットワーク層以上で動作するルーティングプロトコルやアプリケーションの実験が可能とする．有線ネットワークと無線ネットワークの違いとして，無線は無線の範囲内に入らなければ通信ができないという特徴を持っている．そのため，ノード間の通信の到達性を変化させる必要がある．

無線ネットワーク

本章では，本研究のシミュレーション対象である無線ネットワークについて述べる．さらに，有線ネットワーク上で無線ネットワークのエミュレーションを実現するための課題を挙げる．

- 想定する無線ネットワーク

ネットワークの形態は，基地局等を必要としないアドホックネットワークを想定する．今回想定しているアドホックネットワークは，ノードとノードが無線で直接通信を行う．想定する無線ネットワークのトポロジの例を，図 4.1 に示し，以下に特徴を挙げる．

- ー ノード A の無線の伝送範囲にノード B，D が入っているので，ノード A からのデータはノード B，D にのみ届き，ノード C は，伝送範囲外なのでデータは届かない．表 4.1 は，図 4.1 の無線環境における各ノード間のデータの到達性を表す．送信ノードからデータが到達するノードは○，データが到達しないノードは×で表す．

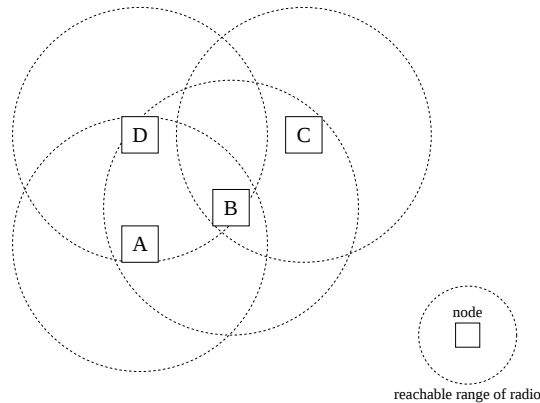


図 4.1: 無線ネットワークのトポロジ例

表 4.1: ノード間のデータの到達性

	A	B	C	D
A	-	○	×	○
B	○	-	○	○
C	×	○	-	×
D	○	○	×	-

- ノード A の無線の伝送範囲内に存在するノード B, D にのみ, ノード A からの ARP 等のイーサフレームを到着させる必要がある。これは, データの到達性がネットワーク層に関係するのではなく, リンク層に関係することから必要である。
- ノードは移動が可能である。そのため, 表 4.1 では, ノード A とノード C 間でデータは到達できないが, ノードが移動することで通信できる可能性がある。そのため, どのノード間の通信でも, データの到達できる距離になれば通信が可能になるシステムの実装が必要である。

● 有線ネットワークとの相違点

無線ネットワークのシミュレーション環境を構築するため, 有線ネットワークとの相違点を考えねばならない。以下に相違点を示す。

- データの到達性の偏在
ノード間で通信する場合, 距離や障害物等の要因によってデータの到達性が変

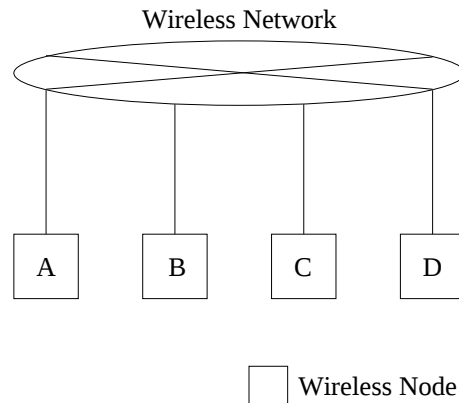


図 4.2: シミュレーショントポロジ

化する．

- － 帯域
無線通信に使用できる周波数は限られているため，実行帯域は比較的狭い．
- － コリジョン
コリジョン検知・再送の方法が異なる．

無線の実験を行う場合に，データの到達性の偏在による実験結果への影響が大きくなると考えたため，本研究では，データの到達性の偏在を扱う．

設計

有線ネットワーク上でデータの到達性を变化させる機構を設け，無線ネットワークのデータの到達性の偏在をエミュレートする．今回は，データの到達性の偏在に影響する原因の中でノード間の距離に着目する．その際のデータの到達性は，想定した無線ノード間の距離から算出する．具体的には，ノード ID と時刻と場所が書かれたデータを用意し，その時間に沿ったノード間の距離を計算する．ノード間の距離の計算方法は，ユークリッド距離によって行う．

データの到達性を变化させるためには，送信ノードと受信ノードの間でデータの到達性の制御を行う必要がある．データの到達性を制御する位置は，ノード内や送信ノードと受信ノードの間が考えられる．

ノード内でデータの到達性を制御した場合，実験ノードのみでトポロジが構成でき，設計が容易である．しかし，データの到達性は，ノードの内的要因ではなく，外的要因であるため，ノード内で行うことは適切ではない．また，ノードを制御するためのプログラムが実験するアプリケーション等に影響を及ぼさないとは限らない．そのため，ノード外でデータの到達性を制御をする必要がある．

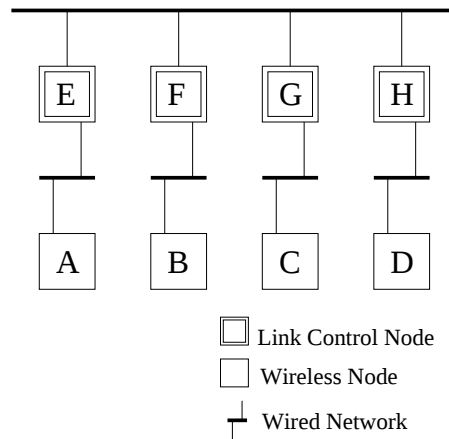


図 4.3: システムトポロジ

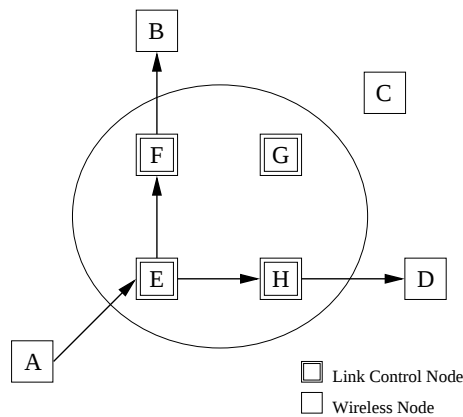


図 4.4: データの流れ

図 4.2 は，無線ネットワークのトポロジを表す．データの到達性の変化は，無線ノードである A-D と無線ネットワークの間にデータの到達性を制御する装置を置くことで実現する．上記のように無線ネットワークを有線ネットワーク上でエミュレートしたトポロジを図 4.3 に示す．図 4.3 の Link Control Node(LCN) は，データの到達性を制御する装置である．例えば，表 4.1 の場合，ノード A は，ノード B,D にはデータを送信できるが，ノード C にはデータを送信できない．LCN である E が，表 4.1 に基づいたノード A と他ノードとの到達性の情報を持ち，その情報に基づいてデータの転送を行う．この場合では，LCN E が LCN F, H を介してノード C 以外のノードにデータを送信する (図 4.4)．この処理を LCN で行うことにより，無線ネットワークのエミュレーションが実現される．

また，前章で述べたように，本実験環境の仕様として，送信ノードと受信ノード間をイーサフレームによって通信できるシステムにする必要がある．イーサフレームを全てのノードに届ける方法として，今回は UDP トンネルを用いた．イーサフレームが UDP で

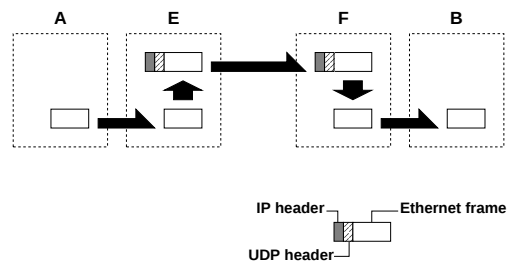


図 4.5: カプセル化

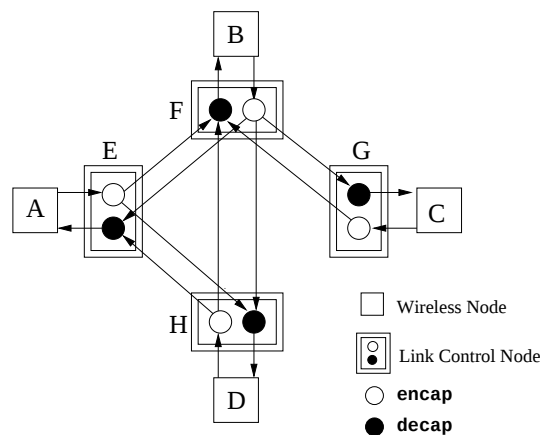


図 4.6: ソフトウェア

カプセル化される様子を図 4.5 に示す．ノード A からノード B にデータを送信する場合，LCN E でイーサフレームを UDP でカプセル化し，LCN F へ送信する．LCN F で UDP ペイロードからイーサフレームを取り出し，ノード B にイーサフレームで送信する．これにより，イーサフレームによって全てのノードと通信できる．また，UDP トンネルは，特定のノードに向けて，データをユニキャストで送信する．そのため，特定のノードにのみデータの転送が可能となり，データが到達できるノードを変化させることができる．上記の LCN E と F での処理を行うプログラムをそれぞれ *encap*, *decap* と呼ぶ．シミュレーション全体では図 4.6 のような配置となる．*encap* でイーサフレームを UDP ペイロードにカプセル化を行い，*decap* で UDP ペイロードからイーサフレームを取り出す．これにより，ノード間でイーサフレームを送受信でき，またそのイーサフレームが受信できるノードを変化させる環境を構築できた．

次に，実験のシミュレーションの手順について示す．実験のシミュレーションの手順は以下のように行う．

1. 各時刻による各無線ノードの位置を決定
2. 位置から各無線ノード間の距離を時刻毎に算出

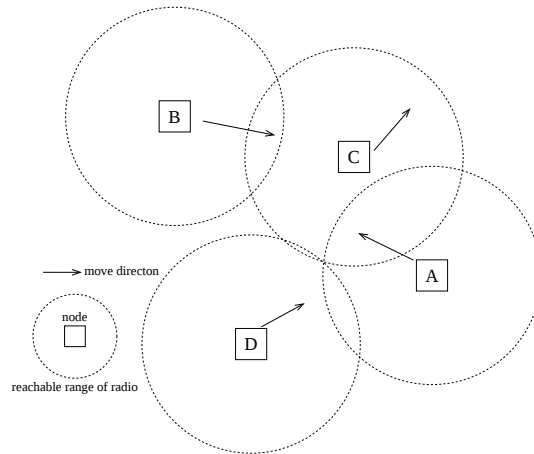


図 4.7: テストトポロジ

3. 算出した距離からデータの到達性を算出
4. 各 LCN へ通信ノードの到達情報を送信
5. 各 LCN の時刻を 0 にする
6. 各 LCN で decap を起動
7. 各 LCN の時刻を一つ進める
8. その時刻の到達情報をもとに encap を起動
9. 7 へ戻る .

これにより，ノードの到達性は，時刻ごとに变化させることができる．

実装

encap と decap は UNIX 上で開発を行い，C 言語を使用し実装を行った．イーサネットフレームの受信を行うために libpcap [8] を用いた．また，libpcap の拡張を行うことにより，libpcap でイーサフレームの送信を行えるようにした．なお，FreeBSD と Linux で動作の確認を行った．実ノードのシミュレーションの進行は，kuroyuri [13] を用いて行う．kuroyuri は，StarBED Project [13] により開発された実験支援システムの一つである．また，encap で使用するデータの到達性の情報を計算するプログラムを perl で作成した．

評価

● データ到達性の変化

無線ノードの移動に伴った到達性の変化を確認する実験を行った．無線ノードを移動させ，その到達性を計測する (図 4.7)．ノードは，矢印の向きに移動し，ノード間

表 4.2: 実験諸元

ノード数	4	[台]
データの最大到達距離	150	[m]
移動範囲	500 x 500	[m]
ノードのスピード	0 ~ 5	[m/s]
移動モデル	random walk	
実験時間	100	[s]

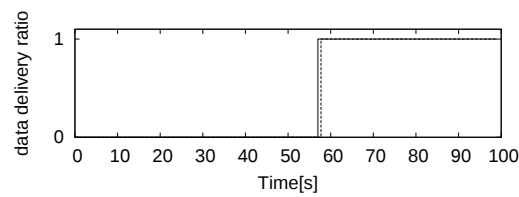


図 4.8: A-B 間の ICMP 応答

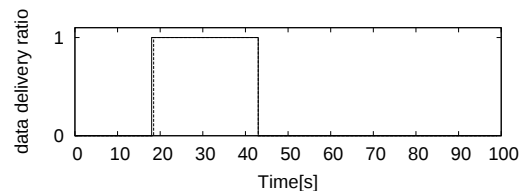


図 4.9: A-C 間の ICMP 応答

の距離を変化させることでデータの到達性も変化する．実験諸元を表 4.2 に示す．到達性の変化は，ノード A からノード B, C, D に ICMP を送信することで計測する．そのため，実験は，前述のシミュレーション手順に以下の ICMP を送出するステップを追加して行った．

9. 各通信ノードから全通信ノードへ向けて ping を実行 (ICMP 送出):10ms 間隔
10. ping の結果を記録
11. 7 へ戻る

図 4.8 は，送信ノード A から受信ノード B へ ICMP を送信した結果である．送信ノード A として，受信ノード C と受信ノード D に関する結果は，それぞれ図 4.9, 図 4.10 に示す．実線は想定値を示し，点線は測定値を示す．3 つの結果において，想定

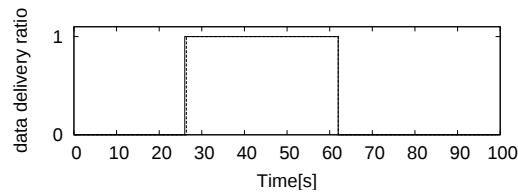


図 4.10: A-D 間の ICMP 応答

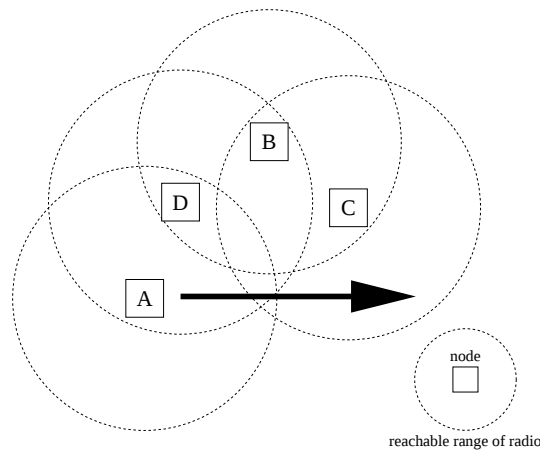


図 4.11: アドホックネットワークの実験トポロジ

値と測定値がほぼ同じ値を示しているので，ノード間の距離による無線イーサネットの到達性変化のシミュレーションが成功したとみなせる．しかし，最初にノード B,C,D がノード A の伝送範囲内に入った時の想定値と実測値の時刻の間にずれがあった．これは，この時刻のずれの間 ping が届かなかったことを示す．この時刻のずれは，送信元ノードが ARP によるアドレス解決に要した時間である．想定している無線ネットワークでも ARP によって，受信先の MAC アドレスを探すので，到達時刻のずれを考慮した設計は必要ないと考えられる．

- アドホックネットワークを用いた実験

この実験では，今回提案した実験環境で，実際に使用されているプロトコルやアプリケーションの動作の検証を行う．アドホックネットワークのルーティングプロトコルは，AODV [12] を用い，図 4.11 のような，トポロジで実験を行う．また，表 4.3 は，実験諸元を表す．

本実験では，ノード A に FTP(File Transfer Protocol) サーバを起動し，ノード B からノード A のファイルを FTP によって取得する．ノード A は移動するため，最初はノード D を介してファイルを取得する．途中でノード D と接続が切れるため，経

表 4.3: アドホックネットワークの実験諸元

ルーティングプロトコル	AODV
ノード数	4 [台]
データの最大到達距離	150 [m]
ノードのスピード	4 [m/s]
実験時間	75 [s]

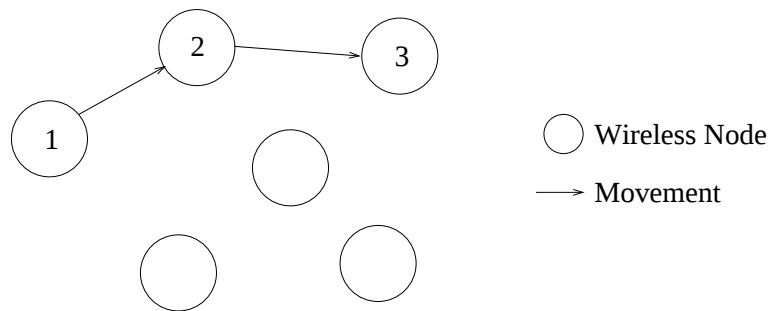


図 4.12: Random Waypoint

路が変わりノード C を介してファイルの取得を行う。全てのノードで、tcpdump を動作させ、結果を取得する。この結果よりファイルの取得経路の変化を確認した。これにより、今回提案する実験環境で、ネットワーク層以上のプロトコルやアプリケーションの動作について、確認できた。

4.1.3 移動モデル

ここでは、ノードの移動モデルについて述べる。ノードの移動方法は、ノードの移動性の評価に影響する。そのため、ノードの移動性を評価するのに適した、Random Waypoint [6] を使用した。Random Waypoint には、Pause Time[s] と呼ばれるノードの移動性の性能指標が定義されている。図 4.12 は、Random Waypoint の動作の説明を表す。ノードは、最初 1 の場所において、次に 2 の場所、3 の場所に移動する。そのとき、ノードは、2 の場所で Pause Time の時間待ってから、3 の場所に移動する。このように、Pause time 待ってから、次の場所へと繰り返すものが Random Waypoint の移動モデルである。

4.1.4 予備実験に使用したルーティングプロトコル

ここでは、評価に使用したルーティングプロトコルについて述べる。

- Dynamic Source Routing (DSR) [5]
- Ad hoc On-demand Distance Vector Routing (AODV) [12]
- Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) [2]
- Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA) [11]
- Zone Routing Protocol(ZRP) [4]

4.2 評価方法を用いた評価例

前節の実験環境を用いて、評価を行う。実験環境として、ソフトウェアシミュレーションである NS-2 を用いて実験を行った。

4.2.1 ソフトウェアシミュレーション

ソフトウェアシミュレーションでは、同一のシナリオや同一の環境を実現できるため、ルーティングプロトコルの評価に使用することが可能である。反面、実際のアプリケーションによるパケットの動作や実際のネットワークを実現することは困難である。そのため、ソフトウェアシミュレーションでは、ルーティングの評価を行うことに用いる。

移動性

ここでは、移動性についての評価を上記にあげたルーティングプロトコルにおいて測定を行った。その結果を図 4.13 に示す。pause time において ZRP の減少はあるが、全体的には変化は小さいことが分かる。また、AODV や DSR, DSDV の pause time による変化はほとんどないことが分かる。

上記の結果の中で AODV に着目し、その移動性について全体的な評価を行う。この評価では、ノードの移動性として表した、pause time とノードの速度両方を行う。speed 毎に packet delivery ratio と pause time の結果を図 4.14 に示す。これにより人の speed 程度であれば、ノード移動性は AODV のデータの到達性に影響がないことが分かる。そのため、AODV はノードの移動性に強いといえる。

密度

ここでは、密度においてデータの到達性の変化について評価する。図 4.15 にノード密度とデータの到達性の関係を示す。これにより、ZRP と TORA がノード密度が増加するとデータの到達性が低くなることが分かる。また、 $400[\text{個}/\text{km}^2]$ 程度であれば、AODV, DSR, DSDV はデータの到達性において変化がないことが分かる。

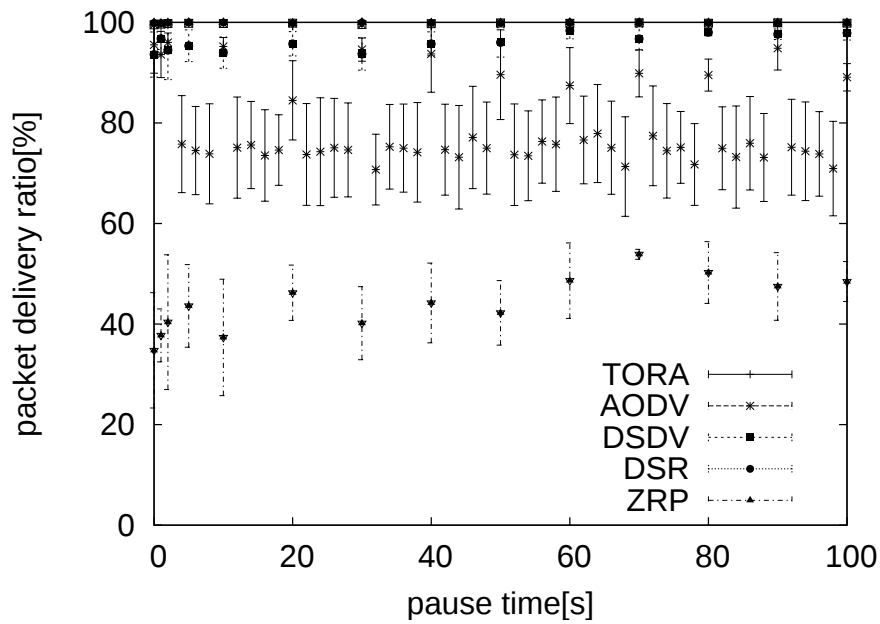


図 4.13: pause time とデータ到達性の関係

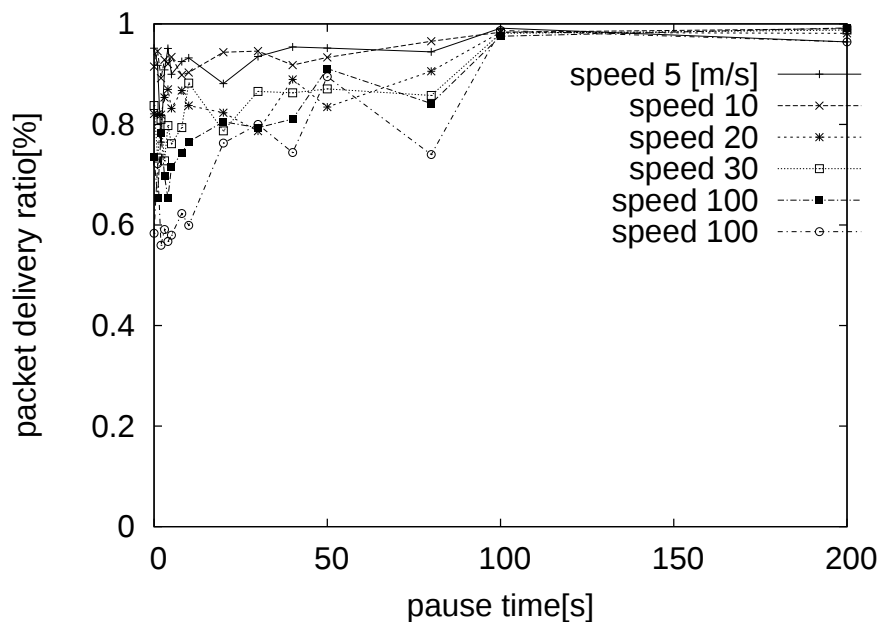


図 4.14: ノード速度毎の pause time とデータ到達性の関係 (AODV)

この後，AODV について全体的な評価を行った．これを図 4.16 に示す．この評価は，密度を一定にして，横軸にノード数を取り評価を行った．そのため，横軸のノード数が変

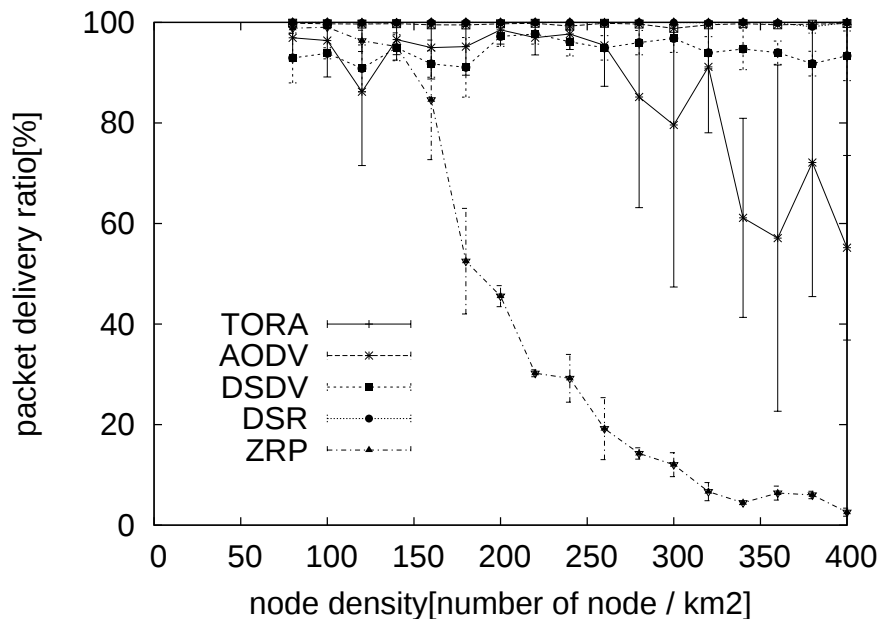


図 4.15: ノード密度とデータ到達性の関係

化するとこのグラフでは、面積も変化を行っていた。いろいろな密度で評価を行ったため、密度だけでなく規模の評価もこのグラフでは可能となる。これより、AODV はノードの数は 300 ノードぐらいからパケットの到達性が下がっていることが分かる。そのため、AODV は、300 ノードぐらいまでは、使用できると考えられる。また、ノードの密度が高いほうが、データの到達性の低下がノード数が増加しても小さいことが分かる。そのため、Reactive 型は低密度に使用されていると言われるが、高密度のほうがノード数は多く使用できることが分かり、その評価は正しくないといえる。このグラフを出すことにより、密度によってどれだけの規模の実験が可能であるかが分かる。

規模

AODV のノード数と構築範囲とデータの到達性の関係を 3 次元グラフとして図 4.17 に表す。このグラフより、AODV はノード数によって、性能が良くなるアドホックネットワークの構築範囲が分かる。このグラフでは 300 m の構築範囲にピークがあると考えられる。

ここでは、評価の一部を示す。しかし、ソフトウェアシミュレーションにおいて、ログの解析を行うことで、全ての評価指標や実験パラメータによる評価が可能となる。また、

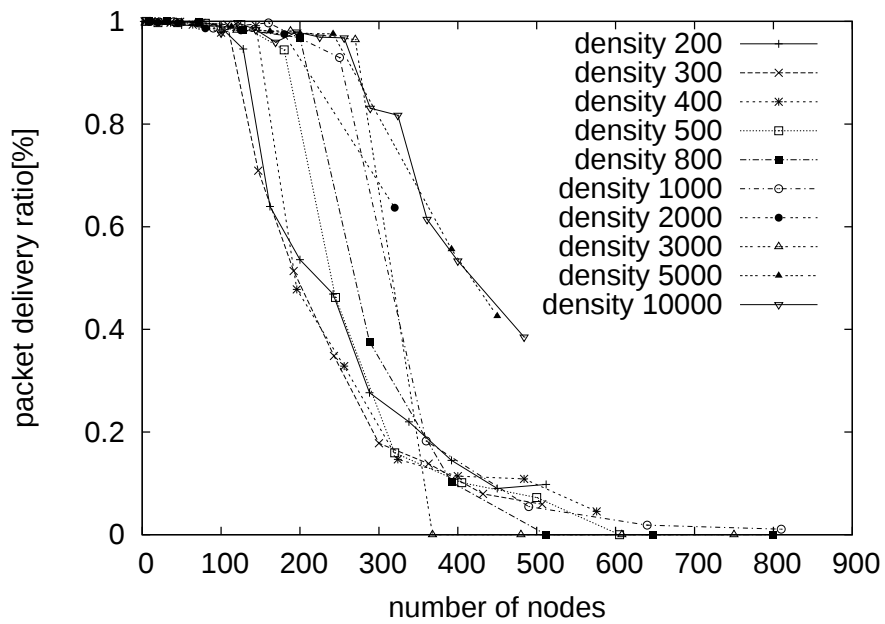


図 4.16: 密度一定におけるノード数とデータの到達性の関係

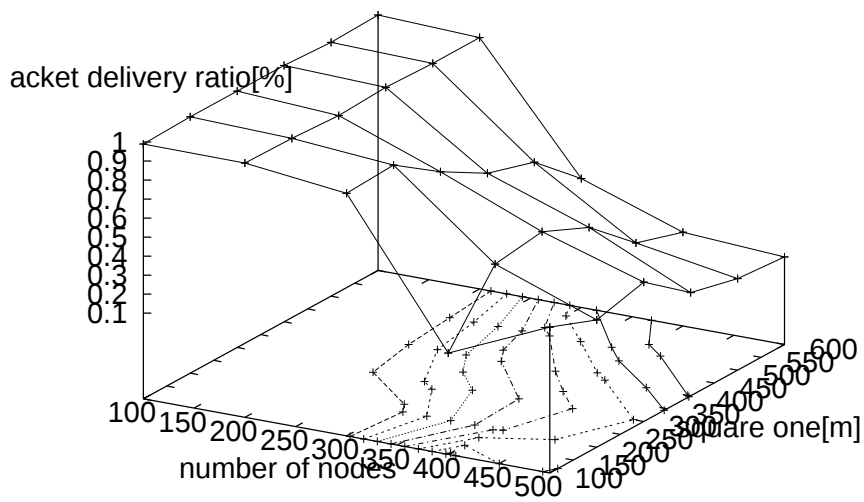


図 4.17: ノード数と構築範囲とデータの到達性の関係

定量的な評価を行うことにより上記のように、いろいろなことが考察できることをここで示す。

4.2.2 有線ネットワークによる疑似実験環境

この実験環境では、AODV を用いて評価を行った。今回は 20 台規模まで、動作を確認した。ping を使用して、データの到達性を測定したが、20 台規模では、データの到達性の変化を見ることはできなかった。また、ssh や FTP や HTTP などのプロトコルなどの実験が可能であるかを確認した。

4.3 まとめ

これらの特徴を定量的に評価することにより、適切なルーティングプロトコルを選択するフレームワークを作成できると考える。これにより、ある特定の用途に用いるための、適切なルーティングプロトコルの選択が可能になる。

第5章 非常時通信への適用

前章で考察したフレームワークを用いて、非常時通信に適したルーティングプロトコルについて述べる。非常時通信下での条件と性能指標を考察し、適したルーティングプロトコルを述べる。

5.1 非常時通信中で使用できるインフラ

地震などの災害による非常時の場合、有線ネットワークや無線 LAN、電話などのインフラの故障により、ネットワークが使用できなくなる可能性がある。しかし、地震などの災害において、家族などの生存情報や食料などのライフライン情報など、非常時における情報はとても重要な物が多い。そのため、インフラのない場所でも、無線通信を用いてノード間で自律的に通信を行うアドホックネットワークが非常時の通信において使用できると考えられた。現在は、バイクにモバイルを取り付け、アドホックネットワークを構築する方法が使用されている。しかし、現在の多くの人々は、いくつものモバイル端末(携帯電話や PDA) を持ち歩くことが多くなってきている。また、携帯用ゲーム機にも無線通信を行える物が開発されてきたり、無線通信を用いて、家庭内でもインターネットに接続することが多くなってきた。また、それらの通信端末は、バッテリーによって電源がそれらのインフラがアドホックネットワークを構築すれば、有線のネットワークの変わりとなり、情報を通信することができないかを考えた。その場合ノードとして、携帯電話などの移動するノードと無線 LAN 基地局など移動しないノードに分けられる。図 5.1 は、有線ネットワークが使用できる非常時通信が行われる前のネットワークを表す。これは、無線 LAN や携帯電話などに近いネットワークを表している。以下には、災害などが起きた場合の非常時におけるネットワークの形態について図 5.1 を考慮して、考察する。

- 移動ノードのみのアドホックネットワーク

図 5.2 は、移動ノードのみによって構成されるアドホックネットワークを表す。これは、基地局などの固定ノードが故障し、人が持つ携帯電話などの移動ノードしかない状態を表す。

- 固定ノードのみのアドホックネットワーク

図 5.3 は、固定ノードのみによって構成されるアドホックネットワークを表す。無線基地局のみで構成され、移動ノードを考慮しないアドホックネットワークを表す。このインフラはノードの移動を考慮しなくても良いため、経路制御が容易になる。

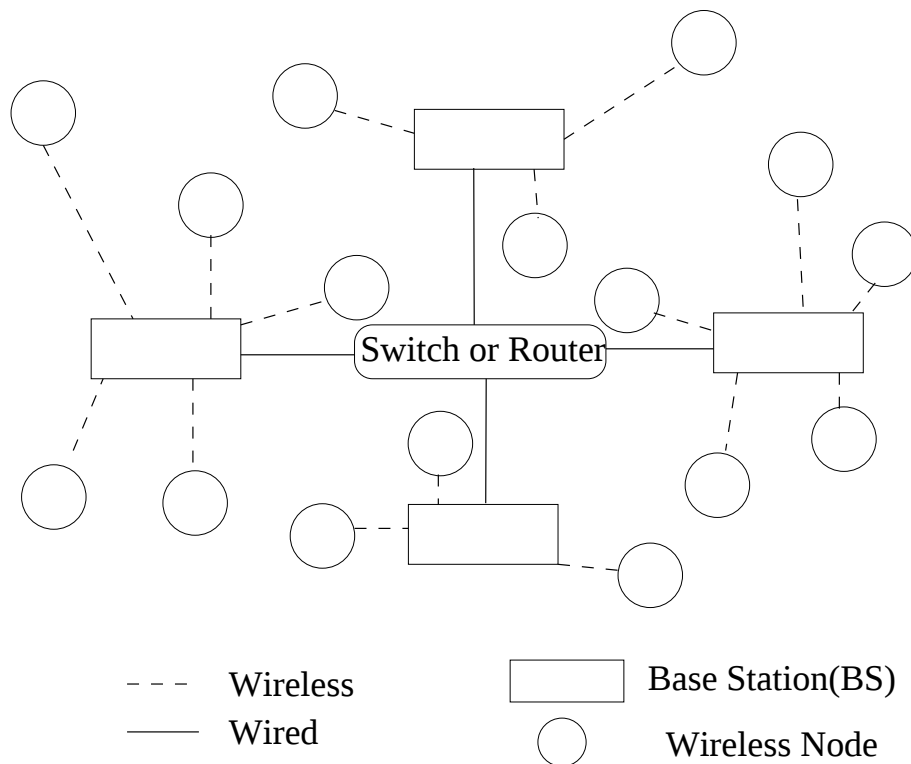


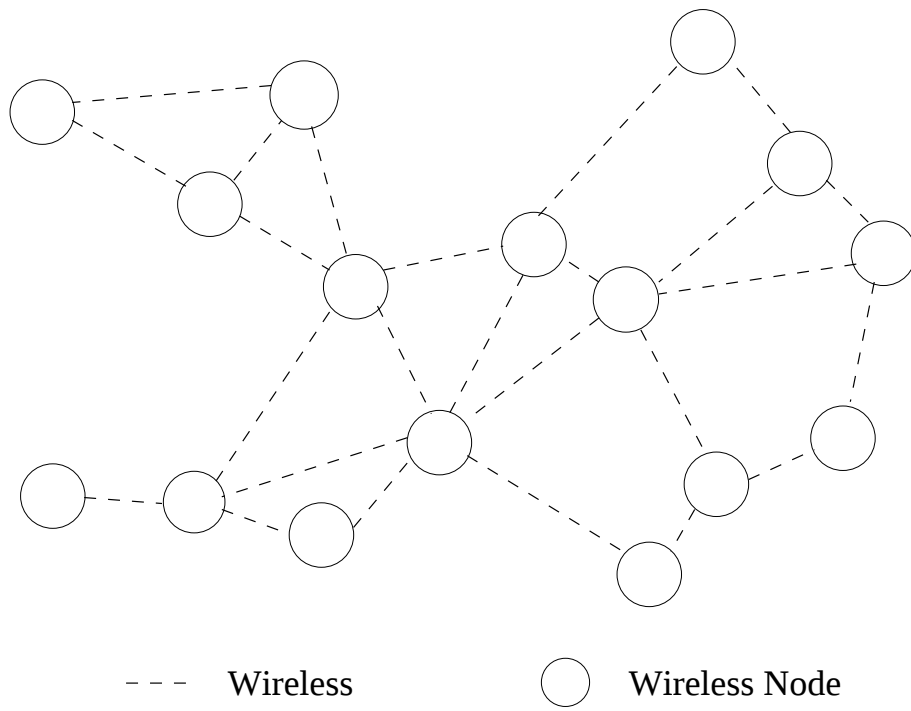
図 5.1: Wireless network

- 移動ノードと固定ノードによるアドホックネットワーク

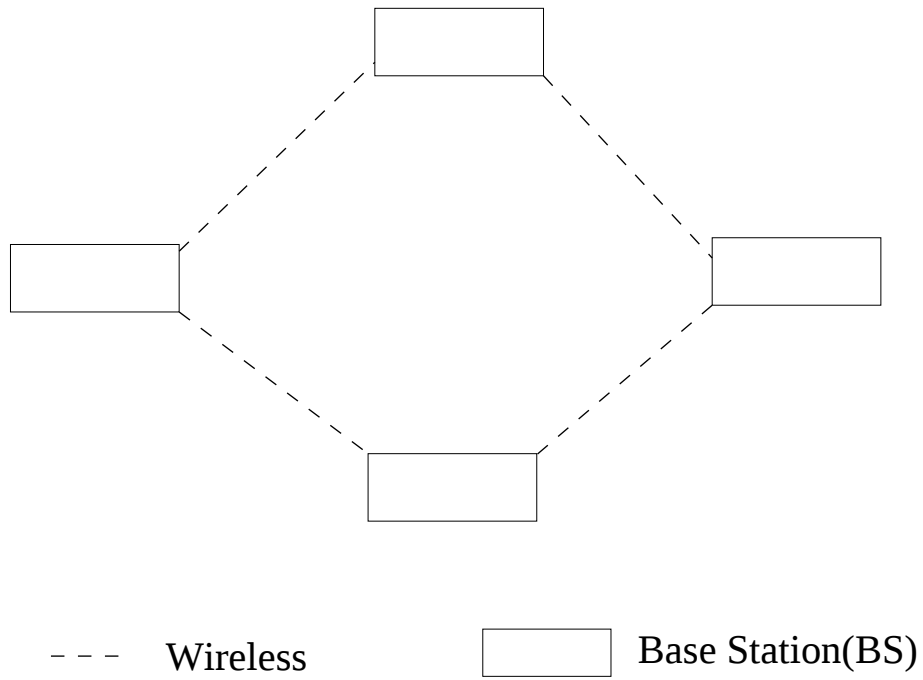
図 5.4 は、移動ノードと固定ノードによって構成されるアドホックネットワークを表す。ただし、移動ノードは、固定ノードと通信を行い、移動ノード同士は通信を行わないことを想定する。これは、無線 LAN に近いネットワークの形態となる。なぜなら、図 5.1 は、無線 LAN や携帯電話のネットワーク形態を表しており、移動ノードはどちらも固定ノードと接続して、通信を行っている。このネットワークの形態は、無線 LAN では有線によって構築していたネットワークをアドホックネットワークで代用を行った。これにより、

図 5.5 は、移動ノードと固定ノードによって構成されるアドホックネットワークを表す。こちらは、全てのノードでアドホックネットワークを構築し、移動ノード同士でも通信が可能となる。

また、使用できる無線周波数帯域の違いもある。携帯電話だと、電話用の周波数帯域によるアドホックネットワークが構築でき、無線 LAN においては、11b や 11a のアドホックネットワークが構築できる。このように、使うデバイスによって、違ったアドホックネットワークが構築できる。さらに、持っているノードによっては 2 つ以上のアドホックネッ



☒ 5.2: Mobile Ad-hoc network by moving node



☒ 5.3: Mobile Ad-hoc network by fixed node

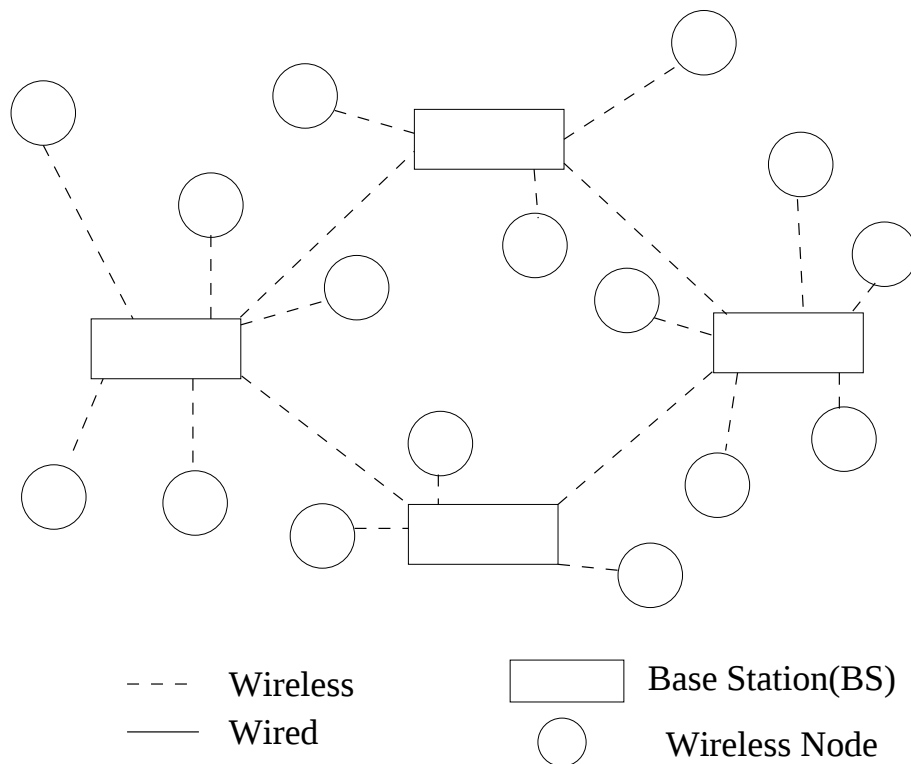


図 5.4: Mobile Ad-hoc network by moving node and fixed node

トワークの構築に使用される可能性がある．非常時通信においては，2つ以上のアドホックネットワーク中でのルーティングが必要になる可能性がある．

5.2 非常時通信で必要な性能指標

地震などの災害は，現在日本全国，世界各国で起きる可能性がある．近年では，阪神大震災，新潟県中越地震，スマトラ沖地震・津波等が起きている．また，地震だけでなく，台風などによる水害などによる災害も日本では数多く起きている．これらの，自然災害では，場所や災害の規模によって，被災範囲や被災者の数は違う．そのため，規模や密度の性能指標が必要となる．地域によってルーティングプロトコルが変更する必要があるかもしれない．

地震等が起きた場合，電線などの断線により，電力が確保できなくなる．そのため，携帯電話や基地局等のノードは，バッテリーによって駆動する．バッテリー内の電力は，有限な資源であるため，効率良く使用することが必要となる．そこで，電力を効率よく使用する評価結果によって，ルーティングプロトコルを選択する必要がある．また，電力を使い果たしたノードは，アドホックネットワークに接続できなくなるため，ノードの密度は少しずつ小さくなる．そのため，ノードの密度の減少に対応する必要がある．

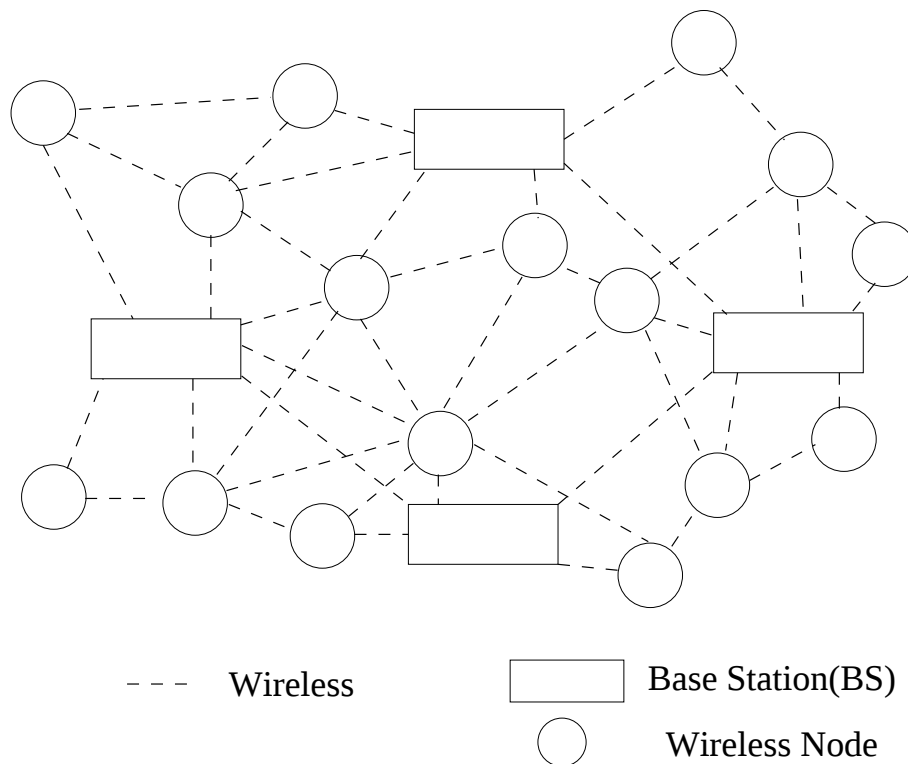


図 5.5: Mobile Ad-hoc network by moving node and fixed node

また、被災者の生存情報は、できるだけ速く知る必要がある。なぜなら、この情報により、誰が行方不明者であるか分かるからである。その行方不明者の情報が、効率のよい救助へと役立てられると考えた。そのため、通信が確立されるまでの即応性の高いルーティングプロトコルが必要となる。

生存情報は、全てのノードが1回以上生存情報の管理サーバに送信される。送信のタイミングは、地震が起きた直後が考えられる。生存情報を知りたい人は、地震直後に知りたいためである。そのため、地震などの災害が起きた場合、生存情報のデータが頻繁に流れる。その後、食料の情報が、一つのノードから全員に流れる。しかし、食料などの情報は、生存情報ほど頻繁に流れない。

これらの特徴によって非常時通信のルーティングプロトコルが決定されるべきである。その特徴を以下にまとめる。

- ネットワークの規模
- 電力の使用効率
- 通信の即応性
- ノードの密度

5.2.1 移動ノードのみで構築されたアドホックネットワーク

移動ノードには、携帯電話や、PDA、ノートパソコン、携帯ゲーム機など人が持ち運びできるものが挙げられる。これらの移動ノードによってアドホックネットワークを構築する場合、どのアドホックルーティングプロトコルの特徴が必要であるかを考える。

- 密度
最初分散していた被災者は、避難場所に集まることを考える必要がある。その場合、ノードの密度が大きくなる。ノードの密度が大きくなっても、対応できるアドホックルーティングプロトコルが必要となる。
- 移動性
携帯電話などの携帯端末は人などが所持しているため、人などが移動することで、トポロジは変化する。これらのノードの移動性によるトポロジの変化に対応できるルーティングプロトコルが必要となる。

5.2.2 固定ノードのみで構築されたアドホックネットワーク

固定ノードとしては、基地局があげられる。基地局を、バッテリーで動作させることができれば、それらでアドホックネットワークが構築できると考えた。全て固定ノードで、アドホックネットワークは構築されるため、新しく必要な特徴はない。

5.2.3 固定、移動ノードにより構築されたアドホックネットワーク

固定ノードと移動ノードが両方あるアドホックネットワークが考えられる。

固定ノード、移動ノードともにアドホックネットワークを構築する方法

- ノードの移動性
固定ノードのみならず、移動ノードもあるため、トポロジの変化が激しい。これらのノードの移動に対応できるルーティングプロトコルが必要となる。
- ノードの密度
移動ノードがあるため、ノードの密度も変化する。移動ノードは、災害が起きた場合、避難所に行くため、ノードの密度は高くなる。そのため密度が高くなっても使用できるルーティングプロトコルが必要となる。

移動ノードは、固定ノードのみと通信を行い、固定ノード間でアドホックネットワークを構築する方法

移動ノードは固定ノードと接続することで通信が可能となり、移動ノード同士では通信が不可能となるアドホックネットワークとなる。そのため、固定ノード同士でアドホックネットワークを構成し、移動ノードはそのインフラを利用し、通信を行う。アドホックルーティングプロトコルにおいては、移動ノード使用しないため、ノードの移動性については考慮する必要はなくなる。そのため、新しい性能指標は必要がなくなる。

5.2.4 ルーティングプロトコルの決定方法

前節で非常時通信に必要なルーティングプロトコルの性能指標を示した。非常時通信に置いて、上記のようなネットワークの形態が考えられ、これらは地域によって変化する。これらの性能指標と、前章の方法で性能を評価したルーティングプロトコルと比べることで、適切なルーティングプロトコルの選択が可能となる。

第6章 今後の課題

本論文では，ルーティングプロトコルの性能指標によって，実験パラメータや評価指標の分類を行った．また，性能指標を導くための評価環境や評価方法について述べた．しかし，そのため，全ての性能指標において，評価を行い，適切なルーティングプロトコルを選択するためのフレームワークを作成する必要がある．

第7章 おわりに

本研究では，用途に応じて，適切なルーティングプロトコルを選択するためのフレームワークの作成を目的とした．そのために，ルーティングプロトコルのを定量的に評価するための性能指標に分類を行った．また，性能指標を測定するための評価方法について述べた．これにより，ルーティングプロトコルの適切な選択をするためのフレームワークの作成ができる．また，そのフレームワークを用いて，非常時通信でのルーティングプロトコルの選択基準について考察を行った．

謝辞

本研究を行うに当たり，篠田陽一教授には日頃から多大なる御指導をいただき，厚くお礼申し上げます．また，有益な議論をさせていただいた篠田研究室の方々に感謝の意を表します

参考文献

- [1] The network simulator. <http://www.isi.edu/ns/nam/ns/>.
- [2] C. P. . P. Bhagwat. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for Mobile Comuters. In *Proc. ACM SIGCOMM'94*, 1994.
- [3] C. E. Perkins, E. M. Royer, S. R. Das and M. K. Marina. Performance Comparison of Two On-Demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks. *IEEE Personal Commun. Mag.*, Feb 2001.
- [4] Z. Haas and M. Perlman. The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Network. in *IETF MANET Draft*, June 1999.
- [5] D. Johnson, D. Maltz, Y. C. HU and J. Jetcheva. The Dynamic Source Routing for Mobile Ad Hoc Networks. In *Internet Draft*, April 2003.
- [6] J. Broch, D. Maltz, D. Johnson, Y. C. Hu and J. Jetcheva. A Performance Comparison of Multi-hop Wireless Ad hoc Network Routing Protocols. In *Proc. the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Moblile Computing and Networking(MobiCom)*, October 1998.
- [7] Y.-B. KO and V. N. H. Location-Aided Routing in mobaile Ad hoc networks. In *Proc. ACM/IEEE Mobicom*, October 1998.
- [8] Lawrence Berkeley National labs Network Research Group. libpcap. <http://ftp.ee.lb1.gov/>.
- [9] E. Royer, P. Melliar-Smith and L. Moser. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks. In *Proc. IEEE International Conference on Communications*, June 2001.
- [10] P. Johansson, T. Larsson, N.Headman, B. Mielczarek and M. Degermark. Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc networks. In *Proc. IEEE/ACM MOBICOM'99*, Aug 1999.
- [11] V. PARK and S. CORSON. Temporally-ordered routing algorithm (tora) version 1. *Internet Draft*.

- [12] C. Perkins and E. Royer. Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing. In *Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, February 1999.
- [13] StarBED Project. KUROYURI. <http://www.starbed.org>.
- [14] C-K. Toh. アドホックモバイルワイヤレスネットワーク-プロトコルとシステム-. 共立出版, 2003. 構造計画研究所.