

# 修士論文

アドホックネットワークにおける  
持続的なジオキャスト手法に関する研究

2009年 2月 4日 提出

指導教官 瀬崎薫准教授

情報理工学系研究科 電子情報学専攻

48-076430 古澤徹

# 目次

本論文の概要	7
第1章 序論	8
1.1 研究の背景と目的	8
1.2 本論文の構成	10
第2章 アドホックネットワークにおけるジオキャスト手法	11
2.1 概要	11
2.2 フラッディングベースの手法	11
2.2.1 LBM	11
2.2.2 GeoGRID	12
2.3 ルーティングベースの手法	13
2.3.1 GeoTORA	13
2.3.2 GGP	14
2.3.3 GFPG	14
2.4 従来手法の課題	15
第3章 ノードのモビリティを利用した配信手法	16
3.1 概要	16
3.2 ノードの移動パターンを制御する手法	16
3.2.1 移動パターンが固定されたノードを利用する手法	17
3.2.2 ノードの移動を動的に制御する手法	17
3.3 ランダムに移動するノードを利用した手法	18
3.3.1 感染型ルーティング	18
3.3.2 Spray and Wait ルーティング	19
3.3.3 従来手法の課題	20
第4章 持続的ジオキャスト手法の提案	21
4.1 概要	21
4.2 想定アプリケーション	21
4.3 想定しているネットワーク環境	21
4.4 持続的ジオキャスト手法	22

---

4.4.1	プロトコル	22
4.4.2	使用するパケットの種類	22
<b>第5章</b>	<b>シミュレーションによる評価</b>	<b>25</b>
5.1	概要	25
5.2	シミュレーション設定	25
5.3	シミュレーション実験結果	26
5.3.1	提案手法と従来手法の比較	26
5.3.2	ノード数の影響	28
5.3.3	移動ノードの割合の影響	28
5.3.4	ノードの移動速度の影響	30
5.3.5	まとめ	30
<b>第6章</b>	<b>位置情報を用いた統合システムの開発</b>	<b>32</b>
6.1	概要	32
6.2	使用機器	32
6.3	システム構成	34
6.3.1	位置情報統合ミドルウェア	34
6.3.2	STA 管理デーモン	36
6.3.3	ルーティングデーモン	36
6.3.4	ジオキャスト配信アプリケーション	37
6.3.5	地図ナビゲーションアプリケーション	37
6.3.6	各システム間の関係	39
<b>第7章</b>	<b>電子タグが配置された環境での動作実験</b>	<b>41</b>
7.1	概要	41
7.2	実験内容	41
7.2.1	システム設定	41
7.2.2	位置推定実験	42
7.2.3	持続的ジオキャスト配信実験	49
7.3	実験結果	49
7.3.1	アンケート結果	49
<b>第8章</b>	<b>結論</b>	<b>51</b>
8.1	本研究のまとめ	51
8.2	今後の課題	51
8.2.1	持続的ジオキャスト手法に関する課題	51
8.2.2	統合システムの開発課題	52
	<b>参考文献</b>	<b>53</b>

---

発表文献	56
謝辞	57



# 目 次

1.1	小型無線端末のネットワーク化	8
2.1	LBM における Forwarding Zone の設定	12
2.2	GeoGRID によるジオキャストの例	13
2.3	フェルマー点を用いた GGP によるジオキャスト	15
3.1	メッセージ・フェリーを用いたメッセージ配信の例	17
3.2	セッション制御の例	18
3.3	Epidemic Routing を用いた例	19
5.1	提案手法と既存手法の比較 (ノード数 100)	27
5.2	提案手法と既存手法の比較 (ノード数 200)	27
5.3	提案手法と既存手法の比較 (ノード数 400)	28
5.4	ノード数の影響	29
5.5	移動ノードの割合の影響	29
5.6	ノードの移動速度の影響	30
6.1	使用した機器	33
6.2	アクティブ RFID タグ	33
6.3	P2P 通信を用いた位置高精度化アルゴリズム	35
6.4	IPv6 への STA の埋め込み	36
6.5	地図ナビゲーションアプリケーション	38
6.6	統合システムの関係図	39
7.1	実験実施地域及び電子タグ配置図	42
7.2	実験当日の風景	43
7.3	実験 1 回目で周回したコース図	45
7.4	実験 2 回目で周回したコース図 1	45
7.5	実験 2 回目で周回したコース図 2	46
7.6	実験 2 回目で周回したコース図 3	46
7.7	実験 2 回目で周回したコース図 4	46
7.8	実験 2 回目で周回したコース図 5	47
7.9	実験 2 回目で周回したコース図 6	47

---

7.10 実験 2 回目で周回したコース図 7	47
7.11 実験 2 回目で周回したコース図 8	48
7.12 実験 2 回目で周回したコース図 9	48

# 表 目 次

5.1	シミュレーションの設定 . . . . .	26
7.1	実験 1 本目の位置推定手法の設定 . . . . .	44
7.2	実証実験アンケート結果 . . . . .	50

## 本論文の概要

アドホックネットワークにおいて、配信対象を位置で指定する配信手法はジオキャストとして知られている。本研究では、ジオキャストに一定の配信期間を設けた「持続的ジオキャスト」を実現する手法を提案している。具体的には、転送領域内に存在するノードは配信期間中情報を保持し続け、ノードの移動によって新たに出会ったノードに対して個別に情報を転送していく手法を用いている。シミュレーションの結果、ノードの移動性がメッセージの到着率向上に貢献することが確認された。また、ジオキャスト配信システムや位置推定システムなどを統合したシステムを開発し、屋外環境にて実証実験を行い、統合システムの動作確認を行った。

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景と目的

デバイス製造技術の向上などにより，無線通信機能を搭載した携帯用小型端末が広く偏在するようになってきた．図 1.1 のように，これらの端末が無線ネットワークを構成することで，あらゆる携帯端末がネットワークにつながっていくと考えられる．

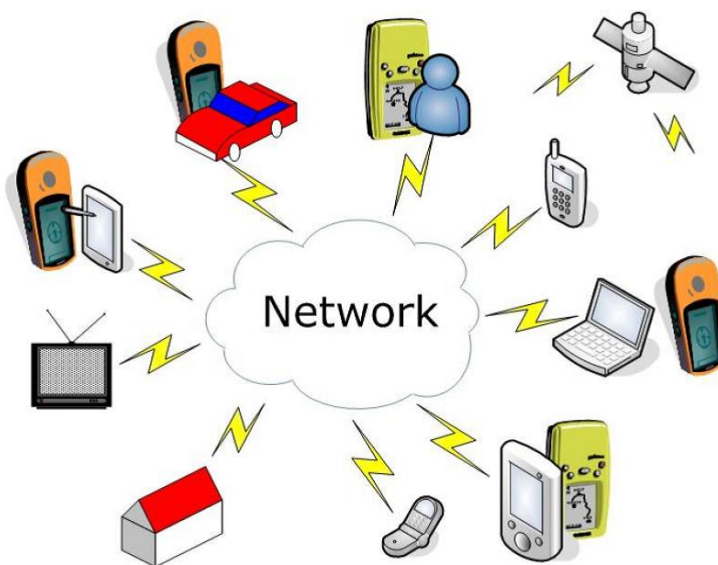


図 1.1: 小型無線端末のネットワーク化

複数の無線端末によって，短期的，動的に構成されるネットワークをモバイルアドホックネットワーク (Mobile Ad Hoc Network: MANET) と呼び，広く研究されてきている．無線端末は中継ノードにもなり，自身の無線通信半径外の無線端末にも，マルチホップによって通信することができる．アドホックネットワークによって，固定基地局などのインフラによらずにネットワークの構築が可能であり，無線センサによる地質や気象といったデータの取得，災害時の救助活動での情報ネットワーク構築，位置に基づいたサービスの提供といった様々な分野で活躍すると期待されている．

アドホックネットワークはいくつかの技術的な課題が存在する．特に，アドホックネットワークはノードの移動に伴いネットワークのトポロジーが頻繁に変化することから，従

来の固定有線ネットワークで用いられていたルーティング手法は適していない．そのため，アドホックネットワークに適したルーティング手法の開発は重要な課題であり，様々なルーティング手法が提案されている [12]．

このアドホックネットワークのルーティングに，ノードの位置情報を用いる手法が近年着目を浴びてきている．各ノードが周辺ノードの位置情報を用いてルーティングを行うことで，ネットワーク全体のトポロジーを把握しなくてもパケットを転送することが可能となるためである．GPS レシーバーのような位置測位デバイスが多くの端末に搭載されるようになってきており，無線 LAN の信号を用いた測位や周辺ノードとの通信から位置を測位する手法も広く研究されていることから，位置情報を利用したルーティングを適用することは十分現実的となってきた．

本研究では，位置情報を用いたアドホックネットワークにおける情報の配信手法として，ジオキャストに着目する．ジオキャストは，指定された配信地域に存在するノードに情報を配信する手法であり，位置情報に着目したルーティング手法が広く使われている．また，ジオキャストは，配信手法に有効だけでなく，ジオキャストそのものが有用なアプリケーションになると考えられる．例えば，ユーザの周辺の店舗情報の紹介に役立つといったビジネス用途が考えられる．また，災害時に危険地域に避難勧告メッセージを配信するといった，安全・安心を確保するためのアプリケーションにも有効となると考えられる．

しかし，従来研究されてきた多くのジオキャスト手法は，アドホックネットワークのノード密度が小さくなく，少なくとも送信ノードから配信対象ノードまで End-to-End のパスが存在するようなネットワーク環境が想定されていた．そのため，ノード密度が極端に低かったり，途中に無線通信を妨害するような障害物がある環境で，End-to-End のパスの確立が難しいようなネットワーク環境では，従来のジオキャスト手法では配信が難しい．

また，従来のジオキャスト研究においては，End-to-End のパスの存在を前提としているため，配信ノードが情報を送信した時刻と，配信対象ノードが情報を受信した時刻はほぼ一致していた．しかし，店舗情報の配信や避難勧告メッセージの配信といったアプリケーションでのジオキャスト配信を考えると，ジオキャストで配信される情報には一定の配信期間が設けられることが望ましい．例えば，店舗情報の配信は，店舗が開店している時間帯に周辺にやってきたノードに対して行われるべきである．また，避難勧告メッセージの配信は，危険が取り除かれるまで，周辺のノードに配信し続けるべきであろう．

そこで，本研究では，以下の 2 点の特徴をふまえたジオキャスト手法を提案する．第一に，配信する情報に一定の配信期間を設定した，持続的なジオキャストを行う．情報の送信直後に配信地域に存在するノードに対して情報を配信することはもちろん，配信開始後に後から配信地域に移動してきたノードに対しても情報を配信する．第二に，情報の送信者から送信時には End-to-End のパスが存在しない配信対象のノードに対しても，配信を目指す．本研究ではこの目的を達成するために，転送を担うノードが配信期間中情報を保持し続け，ノードの自由移動によって配信地域へ転送する手法を提案する．

また、我々はこれまでに、位置情報を応用したシステムを複数開発してきた。第一に、アドホック通信を用いた端末の位置情報高精度化システム [27] を開発した。第二に、端末の位置情報と時間をもとにしたアドホックネットワークにおけるアドレス管理を行うシステム [26] を開発した。第三に、推定された端末の位置情報をもとに、端末の現在地を地図上に表示するアプリケーション [28] を開発した。本研究では、提案する持続的ジオキャストの配信を行うシステムを開発し、これらのシステムを統合した、総合的なシステムの開発を目指す。さらに、このシステムを用いて、屋外環境での動作実験を行うことを目的とする。

## 1.2 本論文の構成

続く第 2 章では、モバイルアドホックネットワークにおけるジオキャスト手法の既存研究を紹介する。第 3 章では、ノードのモビリティを利用したルーティング手法の研究動向について述べる。第 4 章で、本研究で提案する持続的ジオキャスト手法について述べ、第 5 章ではシミュレーションによる評価を行う。第 6 章で、既存システムと提案したジオキャスト配信を行うシステムを統合したシステムの設計方法について述べる。第 7 章では、屋外環境での統合システムの動作実験について述べる。最後に、第 8 章で本論文の結論と今後の課題について述べる。

## 第2章 アドホックネットワークにおける ジオキャスト手法

### 2.1 概要

近年，無線デバイスを搭載した小型端末に，GPSのような位置情報取得機能が搭載される機種が多くなってきていることから，各端末の位置情報を利用した配信制御方法が可能となってきた．また，モバイルアドホックネットワークでは端末の移動に伴いネットワークのトポロジが頻繁に変化することから，ネットワークのトポロジを用いた従来の制御手法ではなく，端末の位置情報を利用した配信方法が着目を浴びてきている．特に，配信地域を設定し，端末の存在位置で受信対象を指定することで，特定の場所に存在するノードだけに情報を配信する手法はジオキャストとして，盛んに研究されている．

本章では，アドホックネットワークにおけるジオキャスト手法の既存研究を，フラッディングベースの手法と，ルーティングベースの手法に分けて紹介する．また，一定の配信時間を設けた持続的ジオキャストを実現するための課題を述べる．

### 2.2 フラッディングベースの手法

本節では，配信手法にフラッディング [1] を応用したジオキャスト手法を紹介する．フラッディングは，情報を受信したノードが即座に近接ノードに対してブロードキャストを行っていくことで，洪水のように周辺のノードに情報を配信していく手法である．

#### 2.2.1 LBM

LBM[2] は，パケットの転送を行う地域（フォワーディングゾーン）を限定してフラッディングを行う手法である．まず送信者は図 2.1 のように，配信地域と自ノードを含む最小の長方形をフォワーディングゾーンとして指定し，パケットを送信する．パケットを受信したノードは自分の現在位置を確認し，現在位置がフォワーディングゾーンの内側であれば，そのノードはフラッディングを行う．このときの位置がフォワーディングゾーンの外側であればそのままパケットを破棄する．この手順を繰り返して配信地域内のノードまでパケットを転送する．LBM は配信地域までの経路が複数あるのでパケッ



トの到着率が高い反面，トラヒックを大量に消費してしまうというオーバーヘッドも存在する．

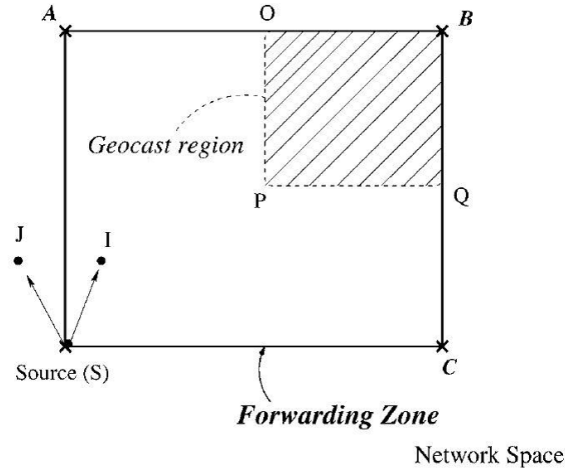


図 2.1: LBM における Forwarding Zone の設定

### 2.2.2 GeoGRID

GeoGRID[3] は，2 次元のグリッドを利用してパケットが転送される手法である．各ノードはあらかじめ自分の位置情報を交換しあい，グリッドの中央に最も近いノードがゲートウェイノードとして選出される．ゲートウェイノードは転送を行い，非ゲートウェイノードによる転送を制限する役割を担う．GeoGRID ではさらに転送を行うノードを制限するために，フォワーディングゾーンが使用される．フォワーディングゾーン外のゲートウェイノードのパケット転送を制限することによって，無駄なパケットの消費を抑える．

GeoGRID のジオキャストの手順概要を図 2.2 に示す．手順は以下のようになる．まず，送信者はフォワーディングゾーンを特定したのちに，ジオキャストパケットをすべての近隣ノードに対して送信する．このパケットを受け取った配信地域内のゲートウェイノードは，送信者と同様にすべての近隣ノードに対して転送を行う．非ゲートウェイノード，配信地域外のノードはパケットを受信したのちにそのまま破棄する．この手順は配信地域内のノードがパケットを受信するまで繰り返される．配信地域内のノードは，ゲートウェイノード，非ゲートウェイノードともにパケットを転送を行う．

フォワーディングゾーンの利用は LBM と同様であるが，グリッドを利用するためにパケットの転送に関わるノードの数が少なくなる．そのためジオキャストパケットの転送に関するトラヒック量は小さくなるが，一方でグリッドを構築するためのコストが生じる．

グリッドの大きさは GeoGRID の性能に大きな影響を与える [3]。グリッドが大きくなると配信率が向上するが、ジオキャストパケットに関わるトラフィック量が増える。反対にグリッドを小さくすると、配信率は下がるが、トラフィック量は減少する。グリッドサイズの見当はトレードオフがともなう。

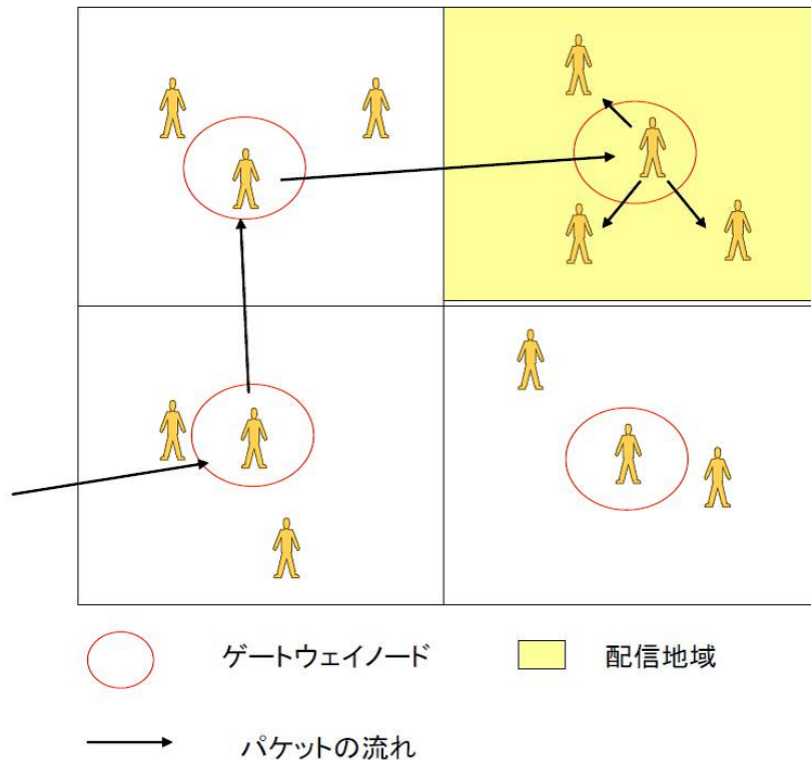


図 2.2: GeoGRID によるジオキャストの例

### 2.3 ルーティングベースの手法

次に、ルーティングベースのジオキャスト手法を紹介する。ルーティングベースの手法では、パケットが配信対象に転送されるまで、順番にユニキャストによって転送されていく。

代表的なルーティングベースのジオキャスト手法として、以下の3つの手法を紹介する。

#### 2.3.1 GeoTORA

GeoTORA[5] は V,D Park らによる TORA[4] を利用したジオキャストプロトコルである。TORA はユニキャスト送信に使用され、link reversal アルゴリズムを採用している。

GeoTORA ではTORA をジオキャストで利用するために、エニキャストを利用した手法が提案されている。エニキャストは端末のグループに同一のアドレスを割り振ることにより、グループ内のいずれかの端末へパケットを届ける手法である。

ジオキャストパケットの送信者は配信地域内の端末へ向けてTORA によるエニキャストを行う。エニキャストパケットを受信したノードは、ジオフラッディングに切り替えて転送を行う。配信地域内にいる端末はジオフラッディングを繰り返し、パケットを配信地域内の全端末へ転送する。

### 2.3.2 GGP

GGP[6] は複数エリアへのジオキャストが可能な手法である。複数のエリアに効率的にジオキャストするために、図 2.3 のようなフェルマー点を用いたツリーを形成する。フェルマー点は三角形 ABC に関して  $AP+BP+CP$  が最小となるような内部の点 P として定義される。

まず配信地域が 2 つの場合について述べる。この場合は送信者の現在地と各配信地域を中心に対するフェルマー点を求める。そして、そのフェルマー点の位置へ対してグリーディーフォワーディングを行う。パケットを受け取ったノードは現在地を確認し、よりフェルマー点に近いノードが存在すればパケットをグリーディーフォワーディングで転送する。自分より近いノードが存在しなければそのノードが各配信地域へ向けてグリーディーフォワーディングによりパケットを転送する。

続いて配信地域が 3 つの場合について述べる。まず二つの隣接する任意の配信地域を選択し、送信者の位置とのフェルマー点を求める。これを第一フェルマー点とする。次にこの第一フェルマー点と残った三つ目の配信地域、送信者の現在地のフェルマー点を求め、第二フェルマー点とする。送信者はまず初めに、第二フェルマー点を目的地としてグリーディーフォワーディングを行う。配信地域が二つの場合と同様に、第二フェルマー点に最も近いノードはパケット受けた後、3 つ目の配信地域と第一フェルマー点の二つ目的地に向けてグリーディーフォワーディングを行う。このパケットを受信した第一フェルマー点に最も近いノードは、残る二つの配信地域へ向けてグリーディーフォワーディングを行う。

配信地域が 4 つ以上の場合にも理論的には適応可能である。しかし [6] では配信地域が 4 つ以上になると、正常に機能しなくなることが示されている。

### 2.3.3 GFPG

これまでに述べられた手法は、配信地域内での転送はジオフラッディングを行うのみであった。ノードの密度が大きいときは、ジオフラッディングによる転送で十分である。しかしジオフラッディングはノードの密度が小さくなるにつれてパケットを受信できなくなるノードの数が多くなってしまいうという欠点をもつ。この問題に対処すべく、Seada

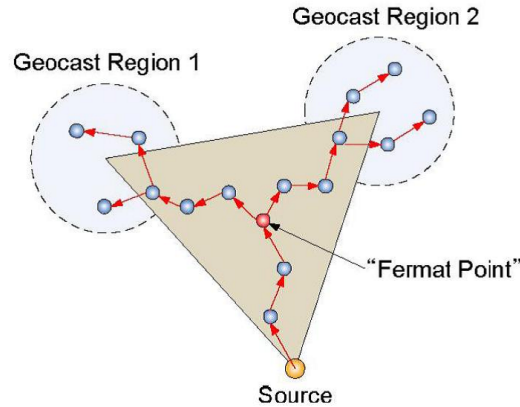


図 2.3: フェルマー点を用いた GGP によるジオキャスト

らは GFPG[7] を提案している。GFPG では配信地域内に送信経路が存在しない場合、配信地域外の送信経路を利用してパケットを転送する。GFPG によるジオキャストの手順は以下になる。まず送信者は、位置情報を用いた代表的なルーティング手法である GPSR[8] によりパケットを配信地域内のノードへ転送する。GPSR の目的地は配信地域の中心部である。パケットは配信地域まで転送された後、配信地域内のノードのフラッディングにより全ノードにパケットが転送される。フラッディングに加えて、もっとも外側のノードによる迂回経路の構築も行われる。もっとも外側に存在するノードは、自分の通信半径を東西南北に四分割し、それぞれの領域に存在する近隣ノードの数を計測する。近隣ノードが各領域にそれぞれ 1 つ以上存在しなかった場合、外側のノードへペリメータモードの GPSR パケットを送信する。

## 2.4 従来手法の課題

従来のジオキャストの配信手法は、アドホックネットワークのノードの密度が十分に高く、パケットを送信すれば直後に配信地域にパケットが届くようなネットワーク状況が想定されていた。しかし本研究では、ジオキャストに配信時間を設定し、配信時間の間に配信地域に存在するノード全てにパケットを送信することを目的としている。特に、配信開始直後には配信地域に存在しなかったが、配信期間中、後からノードが配信地域に移動してきた場合、そのノードにもパケットを届けることが必要となる。本章で紹介したような従来手法はメッセージの配信期間という概念が存在しないため、配信期間を設けるには一定間隔で同内容のパケットを何度も送信者が配信地域へ向けて送信する必要が生じ、ネットワークトラフィックが増大してしまうという問題がある。

## 第3章 ノードのモビリティを利用した配信手法

### 3.1 概要

アドホックネットワークにおけるルーティング手法の研究はこれまで盛んに行なわれており，DSR[9]やDSDV[10]，AODV[11]といった，多くのルーティングプロトコルが提案されてきた[12]．従来のアドホックネットワークでは，通信を行う2つのノードを結ぶ接続経路が常に存在するようなネットワーク環境が想定されてきた．しかし，アドホックネットワークのノード密度が少ない場合や，障害物が多く通信環境が劣悪な環境などでは，2つのノードを結ぶ接続経路が存在しない状況も少なからず存在することが考えられる．このような通信環境が劣悪な状況にも耐性を持ったネットワークはDTN(Disruption Tolerant Networks, Delay Tolerant Networks)[13]と呼ばれ，近年着目を浴びるようになってきた．DTNは，End-to-Endの接続を作ることができないような状態でも，任意の大きさのメッセージをHop-by-Hopに転送していくことにより，非同期だが宛先までメッセージを配送することが可能とする．

DTNにおいては，ルーティング制御をどのように行うかが大きな課題となっている．ノードのモビリティに着目し，End-to-Endの接続パスを張ることができない区間において，移動ノードにメッセージを運ばせる手法はDTNのルーティング手法として特に有効であり，着目を浴びている．

そこで本章では，ノードの移動を利用したルーティング手法の既存研究をまとめる．まず，移動によって転送を担うノードの移動パターンを制御するルーティング手法を紹介する．次に，移動パターンがランダムである全てのノードを利用したルーティングの従来手法を紹介し，本研究の提案手法との違いを述べる．

### 3.2 ノードの移動パターンを制御する手法

本節では，一定の移動パターンによって制御された，特定のノードにメッセージの転送を担わせる手法を紹介する．

### 3.2.1 移動パターンが固定されたノードを利用する手法

Zhao らは、公共交通機関のように一定の行動パターンを持つノードが他のノードからの転送メッセージを預かり（このノードをメッセージ・フェリーと呼ぶ）、ネットワークの断続区間をメッセージ・フェリーが移動することで目的のノードにメッセージを転送する手法を提案した。この手法を用いたメッセージ配信の例を図 3.1 に示す。

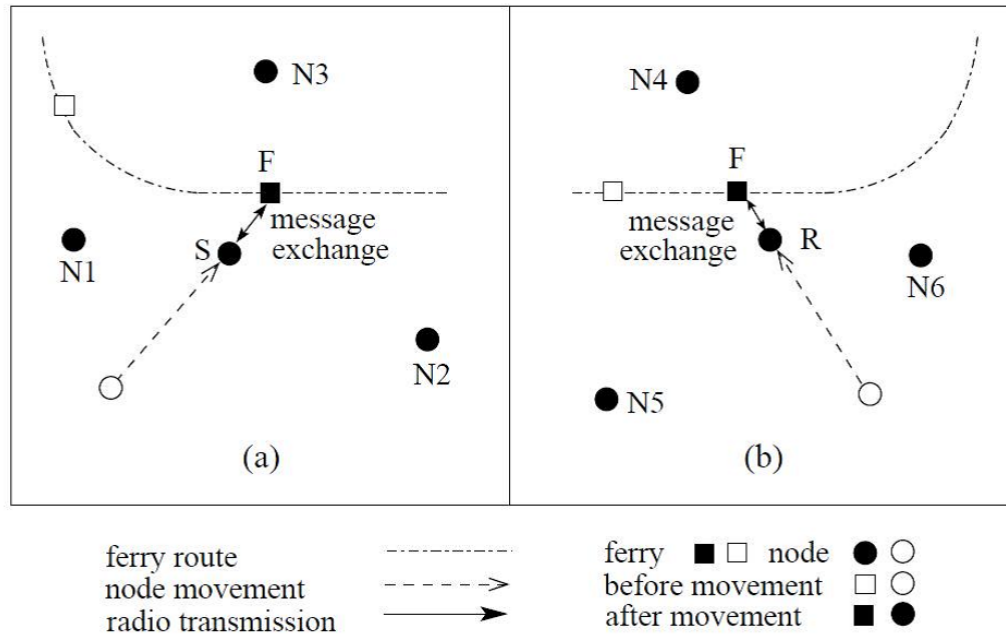


図 3.1: メッセージ・フェリーを用いたメッセージ配信の例

この手法は、移動によってメッセージを転送するための専用のノードを用意しなければならない。本研究の提案手法では、空間上を自由に移動する全てのユーザにメッセージを運ばせる点が異なっている。

### 3.2.2 ノードの移動を動的に制御する手法

David らは、アドホックネットワークにおけるノードのエネルギー使用効率を改善するため、転送ノードの移動パターンを動的に制御する手法を提案している [16]。各ノードは自律分散的に、周辺ノードとの接続情報のみを用いて移動パターンを制御している。

Suzuki らは、センサノードの周囲に存在するノード数や速度、バッファサイズに基づいて、離れたネットワーク間のセッションを動的に設定する手法を提案している [17]。設定されたセッションに基づいて、メッセージを預かったロボットセンサノードが移動によって離れたノードへメッセージを転送する、また、システム全体の配信遅延の最小化や

消費エネルギー効率の最大化をするため，無線通信品質や移動容易性に基づいて，ノードの移動を制御する手法を提案している．このシステムのセッション制御手法の例を図 3.2 に示す．

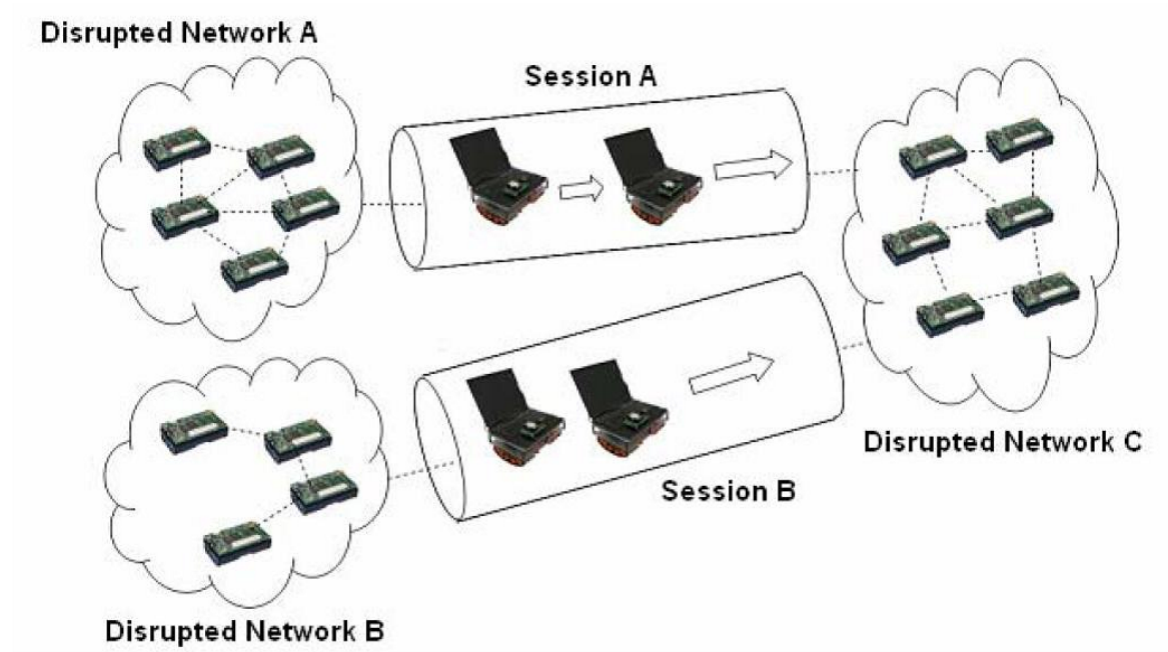


図 3.2: セッション制御の例

いずれの手法も，メッセージを転送するノードはロボットであり，移動方向や速度，時間が制御されている．本研究では，自由に動くユーザにメッセージを転送させる点が異なる．

### 3.3 ランダムに移動するノードを利用した手法

本節では，ランダムな移動パターンを持つノードの移動によってメッセージを転送させる手法の既存研究を紹介する．

#### 3.3.1 感染型ルーティング

Epidemic Routing (感染型ルーティング) [18] は Vahdat らによって提案されたルーティング手法である．出会ったノード同士で保持しているメッセージのコピーを，互いに相手ノードの中に作ることによって，メッセージを次々と伝搬させていき，最終的に



宛先ノードへ辿りつかせる方法である．Epidemic Routing を用いた例を図 3.3 に示す．ソースノードを  $S$ ，メッセージの配信対象ノードを  $D$  とする．時刻  $t_1$  にソースノードがメッセージを送信すると， $S$  に近接するノード  $C_1, C_2$  にメッセージがコピーされる（図 3.3(a)）．この時点では  $S$  と  $D$  をつなぐパスが存在しないため  $D$  にはメッセージが届かない．次に，時刻  $t_2$  までに  $C_2$  が  $C_3$  の近接に移動し， $C_3$  の通信半径に入ると， $C_2$  はメッセージを  $C_3$  にコピーする（図 3.3(b)）． $D$  は  $C_3$  の通信半径内にあるので， $C_3$  はメッセージを受信直後に  $D$  にメッセージをコピーし，目的のノードにメッセージが配信される．

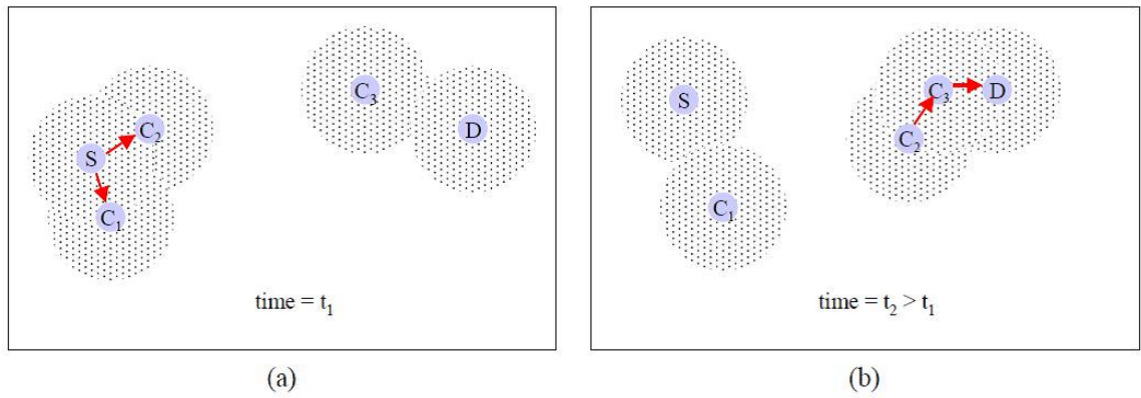


図 3.3: Epidemic Routing を用いた例

本手法は出会ったノード全てに対してメッセージのコピーを作成していくため，最小時間で宛先までメッセージを配送することが可能であるが，大部分の余分なノードへメッセージを転送してしまうため， unnecessaryなトラフィックが大量に発生する．また，各ノードがメッセージを保持するためのバッファサイズも大きくなる．

### 3.3.2 Spray and Wait ルーティング

Spray and Wait 方式 [19] は，メッセージのソースノードが，時間の経過とともに会える各ノードにメッセージコピーを作成していく (Spray)．Spray の段階は決められた数のコピーが作成されると終了する．次に，メッセージコピーを持ったノードが移動し，宛先ノードに出会うまで待つ (Wait)．こうしてメッセージを持ったノードが宛先ノードに出会うことで，メッセージを受け渡すことが達成できるルーティング方式である．単純な Epidemic Routing と比べ，Spray 時のみのコピーで済むため，通信コストを低く抑えることができる．ノードの行動パターンがランダムで広範囲にわたる場合には効率が良いが，行動パターンがランダムでない場合はうまく配信できない可能性が高くなる．



### 3.3.3 従来手法の課題

本節で紹介した感染型ルーティングおよび Spray and Wait ルーティングはいずれも、四方にメッセージが伝搬していくため、目的のノードから離れていく方向に対してもメッセージが伝搬していき、不要なトラフィックが多く発生するという問題があった。本研究では、各ノードが位置情報を取得することができる状況を想定しているため、位置情報を用いることで、不要なトラフィックの発生を抑えることが可能となる。

## 第4章 持続的ジオキャスト手法の提案

### 4.1 概要

本章では、我々の提案する持続的なジオキャスト手法を紹介する。まず、本手法の利用が想定されているネットワーク環境や応用アプリケーションについて述べ、次に具体的なプロトコルについて述べる。

### 4.2 想定アプリケーション

本研究では、送信側と受信側に同期性が求められない情報配信を行うジオキャストアプリケーションを想定している。例えば、災害時の危険情報の配信であれば、危険が取り除かれるまで配信され続ける本手法は有効である。子供の安全を守るため不審者の出現情報を配信するアプリケーションであれば、不審者がいなくなり、安全が確保されるまで配信され続ける本手法が適している。交通事故などの道路交通情報配信であれば、事故処理が終了するまで配信され続ける必要があり、本手法が活用できる。店舗の販売情報配信は、販売時間中やキャンペーン期間中の間のみ、配信され続ければ都合が良い。

### 4.3 想定しているネットワーク環境

本手法は、アドホックネットワークでの適用が想定されている。携帯端末へのジオキャスト配信は、アドホックネットワークでなく、通信キャリアが構築した既存の通信インフラを用いる手法も考えられる。しかし、仮に大きな災害が発生し、既存インフラのシステムが麻痺してしまった場合、配信を行うことができなくなる。本研究では、災害時の位置に基づいた危険情報配信アプリケーションでの使用も想定しているため、災害時にも使用しやすいことからアドホックネットワークでの適用を想定した。

また、全てのノードは、GPS に代表されるような何らかの手段によって位置が推定されており、推定された位置情報をルーティングに使用可能であるとしている。近年は多くの携帯端末に GPS 受信機が搭載されてきており、携帯端末における位置測位が身近になっていることから、この想定は十分に現実的といえる。

また、全てのノードが自由に空間を動き回る状況を想定している。ロボットなどを用いて移動パターンを制御する手法は、特別なノードの用意が必要となるためコストがかかり、使用可能な地域が制限されるためである。

## 4.4 持続的ジオキャスト手法

本節では、提案手法のプロトコルの概要と、使用するパケットの型について説明する。

### 4.4.1 プロトコル

本手法では、次のように二段階に分けた配信を行う。

第一段階 はじめに、パケットはLBM[2]によって送信者から配信地域へフラッディングベースで送信される。パケットを受け取ったノードは自分の現在地を確認し、パケットのヘッダに記述されている範囲に含まれていたらパケットを転送する。通常フラッディングをした後、パケットは破棄されてしまうが、本手法ではヘッダに書かれている時間パケットを保持する。また範囲外にいるノードも受信したパケットを破棄せずに一定時間保持する。今後、このノードが配信地域の内部に移動した場合、アプリケーション層のプログラムへの転送や、パケットが不足している他のノードへの再送を行うためである。

第二段階 パケットをすべて保持したノードは第二段階に移行する。第二段階ではパケットが不足しているノードに再送を行う。再送はパケットをすべて保持しているノードが行い、ヘッダに書かれている配信時間のあいだ行われる。第二段階中にパケットが揃ったノードは、次にパケットが不足しているノードに出会った際には再送を行う。

新たなノードの接近を知るために、各ノードは一定時間ごとに送信しているHello Packetを利用する。Hello Packetを受信したノードは、パケットのヘッダから相手ノードの位置情報を取得する。相手が配信地域内にいるのであれば、パケットの不足について問い合わせるためのinquiry Packetの送信履歴を確認する。過去に送信したことがない場合は、パケットの不足状況を調査するためにinquiry Packetを送信する。

inquiry Packetを受信したノードは、自ノードが保持しているパケットを確認する。パケットがひとつでも不足していた場合は、不足しているパケットのシーケンスナンバーをヘッダに書き込んだinquiry Reply Packetをinquiry Packetを送った相手に対して送信する。パケットをすべて保持していた場合は、inquiry Packetを破棄し、inquiry Reply Packetは送信しない。inquiry Reply Packetを受信した前述のノードは、ヘッダに記載されている不足パケットをひとつずつ再送する。

以上の手順をジオキャストパケットのヘッダに書かれている時間、繰り返す。時間が経過するにつれて、パケットをすべて保持した配信地域内のノードは多くなる。

### 4.4.2 使用するパケットの種類

本手法では、以下に述べる5種類のパケットを使用している。

**Hello Packet** Hello Packet は一定時間ごとに、自ノードのアドレスや位置情報を書き込んで送信するパケットであり、近隣にいるノードに情報を提供するために使用される。各ノードは他ノードの Hello Packet を受信することにより、ノードの存在や位置を知ることができる。Hello Packet は一般的にネットワークポロジの把握や経路構築など様々な目的で使用される。本手法ではノードの接近を知るために使用する。

**LBM Packet** ジオキャストの送信者によって使用される。配信したメッセージを送るために使用する送信者はヘッダに以下の情報を書き込む。

- ノード ID
- シークエンスナンバー
- 識別子
- 送信位置
- 配信場所
- 再送の終了時間
- 配信する距離

ノード ID と識別子は送られた情報を一意に特定するために使用される。分割された LBM Packet をひとつのパケットに復元するためにシークエンスナンバーを使用する。各ノードは送信者の位置と配信する距離から配信地域を特定し、現在地が配信地域に含まれるかを判断する。再送の終了時間で示される時間になったら、各ノードはパケットを破棄し、これ以降、第二段階における再送手順も行わない。

**Inquiry Packet** パケットの不足状況を調べるために使用される。送信者はヘッダに以下の情報を書き込む。

- ジオキャストを送信したノードの ID
- 識別子
- 送信位置
- 配信場所
- 再送の終了時間
- 配信する距離

ジオキャストを送信したノードのノード ID, 識別子, ジオキャストパケットの送信者場所, 配信場所, 再送の終了時間, 配信する距離は, ジオキャストの送信者が書き込んだ値である。LBM のパケットをひとつも受信できなかったノードはこれらの値を知ることができないため, Inquiry Packet にて指定する。パケットをひとつも保持していないノードが, Inquiry Packet を受け取った場合, このパケットのヘッダから必要な情報を取得する。

**Inquiry Reply Packet** inquiry Packet の返信のために使用される。ヘッダには不足パケットのシーケンスナンバーが書き込まれる。Inquiry Reply Packet を受信したノードは, ヘッダを参照することによって, 不足しているパケットを再送する。

**Retransmission Packet** Inquiry Reply Packet に記述してある不足パケットを再送するために使用される。ペイロードは LBM Packet のペイロードと同一である。再送は LBM Packet の送信者だけでなく, 全パケットを保持しているすべてのノードによって行われる。

## 第5章 シミュレーションによる評価

### 5.1 概要

前章では、本研究の提案手法である持続的ジオキャストの具体的な内容を述べた。本章では、この持続的ジオキャスト手法の基本的な特性を、シミュレーション実験によって評価していく。

### 5.2 シミュレーション設定

シミュレータには、カリフォルニア大学バークレイ校で開発され、現在も拡張が続けられているネットワークシミュレータ ns2[31] を用いて行った。無線伝播や電波干渉などを考慮して実装されており、実際の環境に近い環境を提供している。データリンク層として IEEE 801.11 の実装を利用することも可能である。また、ノードのモビリティモデルも複数用意されていて容易に利用できる。

本研究で提案したジオキャストのプロトコルは、ネットワーク層のプロトコルとして実装した。データリンク層には IEEE802.11b を利用している。

基本的なシミュレーション設定を表 5.1 に示す。ただし、これらの値は基本的な値であり、シミュレーション内容によってはノード数、ノードの移動速度を変化させている。表 5.1 と設定が異なる場合は、シミュレーション実験結果の項目に記す。

シミュレーションの基本的なシナリオは次の通りである。1 つだけ存在する送信ノードは座標 (300,300) に配置され、その他のノードは領域上にランダムに配置される。シミュレーション開始直後、送信ノードから配信領域 (座標 (750,750) の周辺 300m 以内の円) に向けてメッセージが送信される。メッセージのサイズは 512Bytes とした。これは、およそ日本語 140 文字程度のショートメッセージのサイズを想定している ..

シミュレーション開始後は、全てのノードはランダムウェイポイントモデルに基づいて移動する。ランダムウェイポイントモデルは、各ノードがランダムに目的地と速度を決定して移動し、目的地に到着した後、一定時間停止したのち、次の目的地と速度を再度ランダムに決定して移動するモデルである。初期値はシミュレーションごとにランダムに決定される。

表 5.1: シミュレーションの設定

項目	値
領域	1500m × 1500m
配信領域	領域中央から 300m 以内
ノード数	400
ノードの最低速度	3.5m/s
ノードの最高速度	4.5m/s
ランダムウェイポイントにおける平均休憩時間	5s
通信半径	100m
ビーコン送信間隔	5s
シミュレーション時間	360s
送信メッセージサイズ	512Bytes

### 5.3 シミュレーション実験結果

本節では、シミュレーション結果を示す。本節で以下に示すシミュレーション結果のグラフは、横軸が送信開始後からの経過時間 [s]、縦軸がパケットの到着率を示している。パケットの到着率とは、ある瞬間における、配信領域内にいるノード数に対する配信領域内に存在かつパケットを受信しているノード数の割合を示している。

#### 5.3.1 提案手法と従来手法の比較

図 5.1, 図 5.2, 図 5.3 に、提案手法の到着率の時間変化と、既存手法の到着率の時間変化を示す。既存手法として、ここでは LBM[2] を用いた。図 5.1 はノード数が 100, 図 5.2 はノード数が 200, 図 5.3 はノード数が 400 の場合の結果を示している。図 5.1, 図 5.2 の場合、ノード数が少ないため最初のフラッディングがほとんど成功していなく、既存手法の到着率はほぼ 0 のままである。図 5.3 のように、ノード数がある程度大きいと最初のフラッディングによる配信が成功するノードが一定数存在する。しかし、配信後、パケットを受信したノードが配信領域から外へ移動していき、代わりにパケットを受信していないノードが配信領域へ新たに新入してくるため、従来手法ではパケットの到着率が時間をおうにつれ下がっていく。一方、提案手法では、ノードの移動によって、パケットを受信していないノードに対して、受信済みのノードが次々とパケットを転送していくので、時間がたつにつれ到着率が向上していくことが見て取れる。

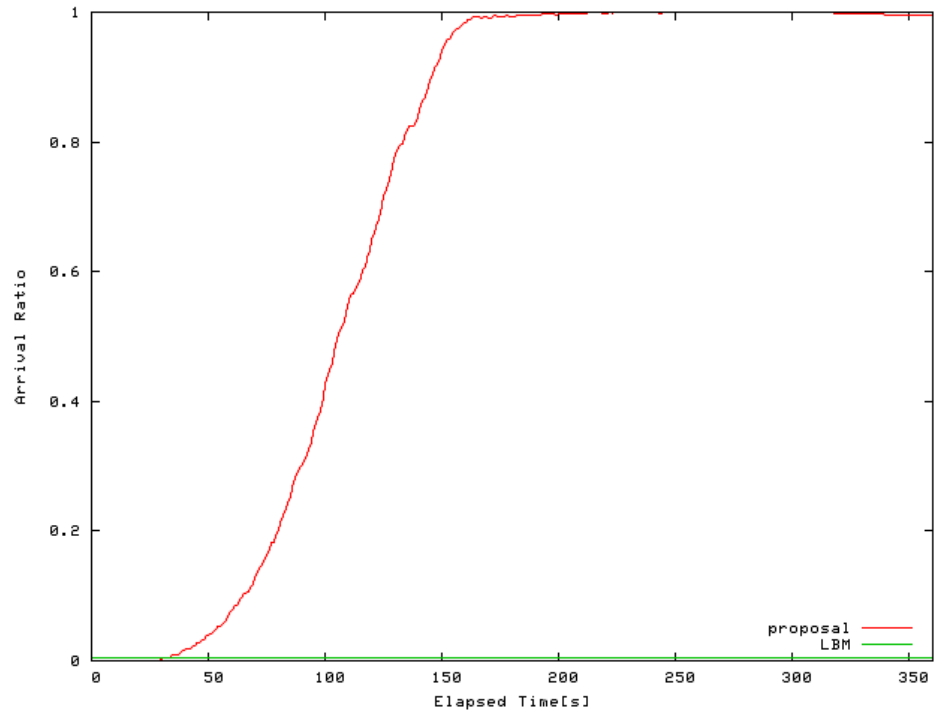


図 5.1: 提案手法と既存手法の比較 (ノード数 100)

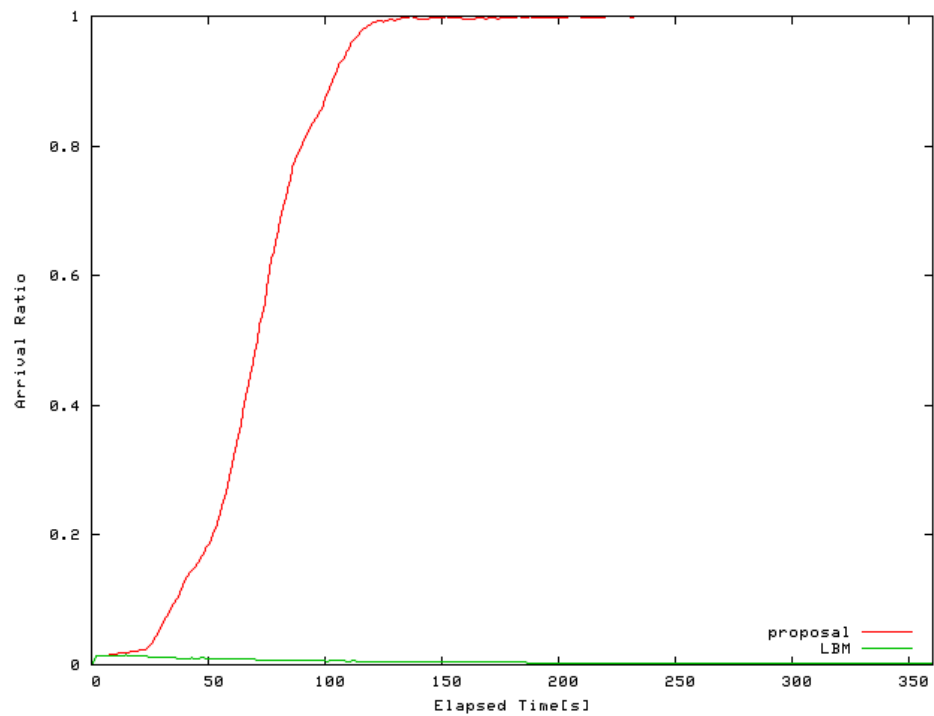


図 5.2: 提案手法と既存手法の比較 (ノード数 200)



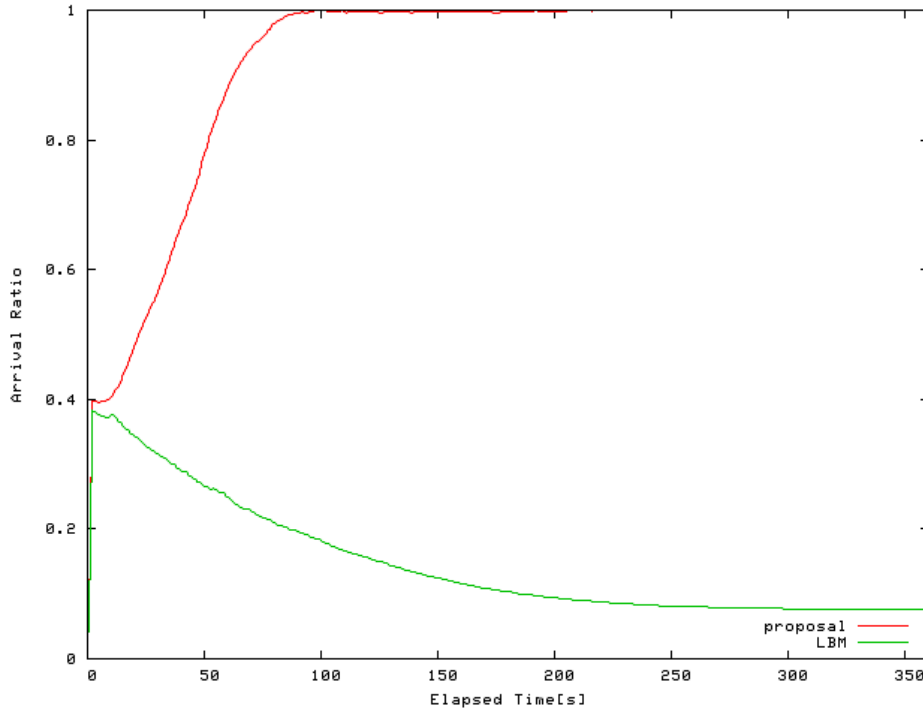


図 5.3: 提案手法と既存手法の比較 (ノード数 400)

### 5.3.2 ノード数の影響

図 5.4 は、ノード数を 100, 200, 300, 400 と変化させた場合の時間経過と到着率の関係を表したものである。グラフより、ノード数が増加していくにつれて、到着率が早く上昇していくことがわかる。また、ノード数 100 のように、非常に空間中のノード数が少ない場合でも、ある程度時間が経過すればパケットの到着率を上昇させることが可能であることがわかる。

### 5.3.3 移動ノードの割合の影響

これまでのシミュレーションは全ノードが自由に移動していた。図 5.5 は、一定数のノードのみが移動をした場合の時間経過とパケット到着率の関係を表したものである。全ノード数は 200 とし、移動ノードの割合が 33%, 66%, 100% の 3 通りの状況について調べている。移動ノードの割合が大きいほど、到着率がより早く向上していく結果となっている。

ノードの移動はネットワークのトポロジを頻繁に変化させるため、従来のアドホックネットワークにおけるルーティング手法では、移動ノードの増加にともないルーティングが困難になる手法が多く存在していた。本手法では、ノードの移動率が上昇するほど配信性能が向上していくという結果となっている。

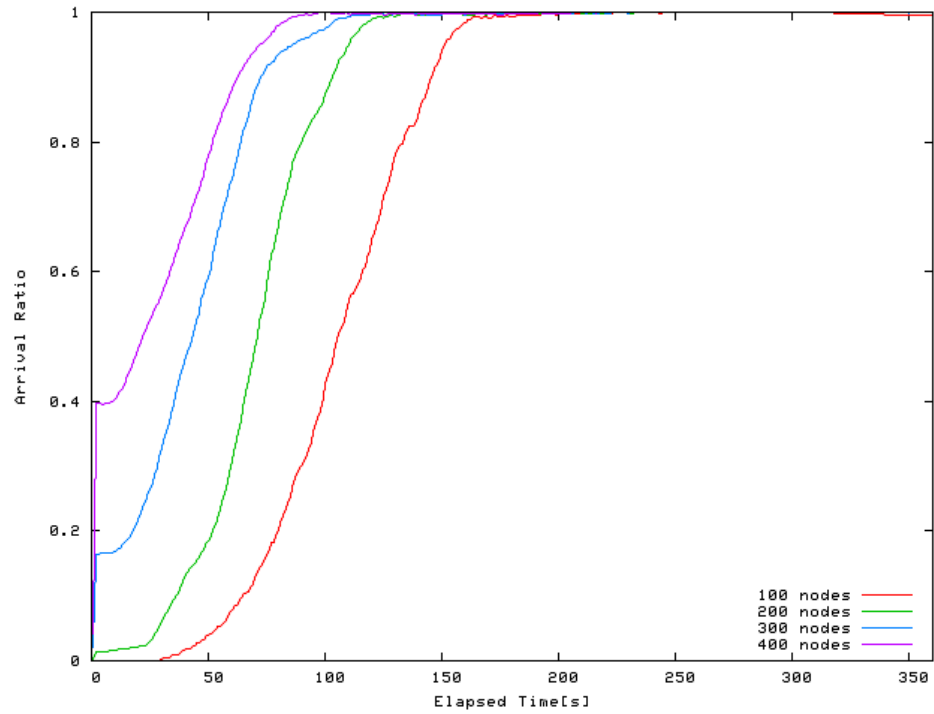


図 5.4: ノード数の影響

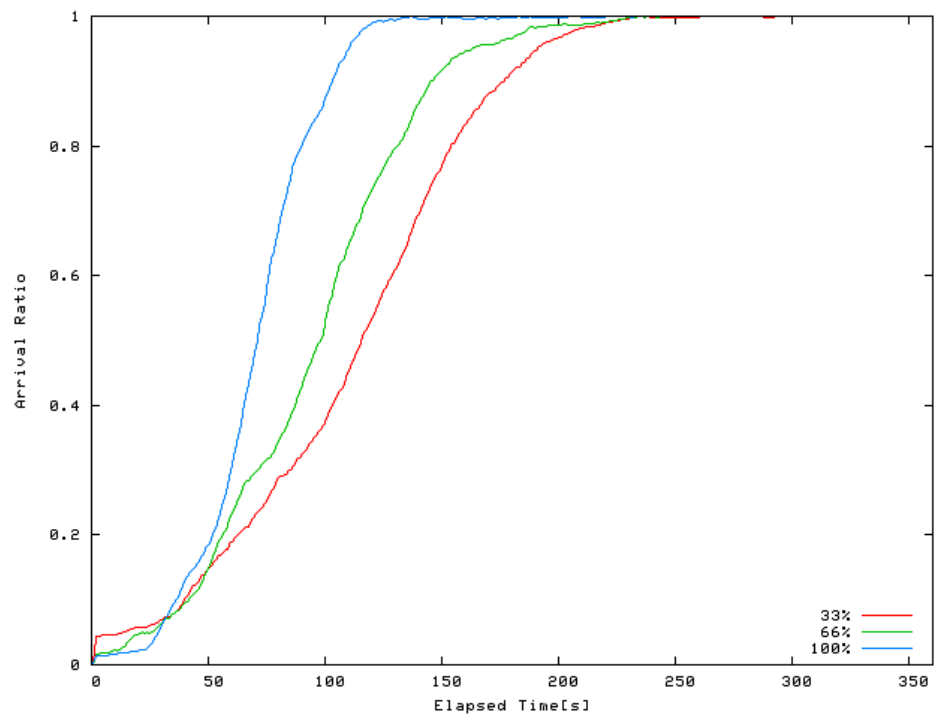


図 5.5: 移動ノードの割合の影響

### 5.3.4 ノードの移動速度の影響

図 5.6 は、全ノードの移動速度を変化させた場合の時間経過とパケット到着率の関係を表している。とは異なり、全てのノードを移動させている。全ノード数は 200 であり、ノードの平均移動速度が 2m/s, 4m/s, 6m/s, 8m/s, 10m/s の場合の結果を示している。ノードの最低速度は平均移動速度-0.5[m/s] とし、最高速度は平均移動速度+0.5[m/s] とした。

グラフより、ノードの移動速度が大きいほど、配信開始後からの経過時間に対して到着率の上昇が速くなっていることがわかる。

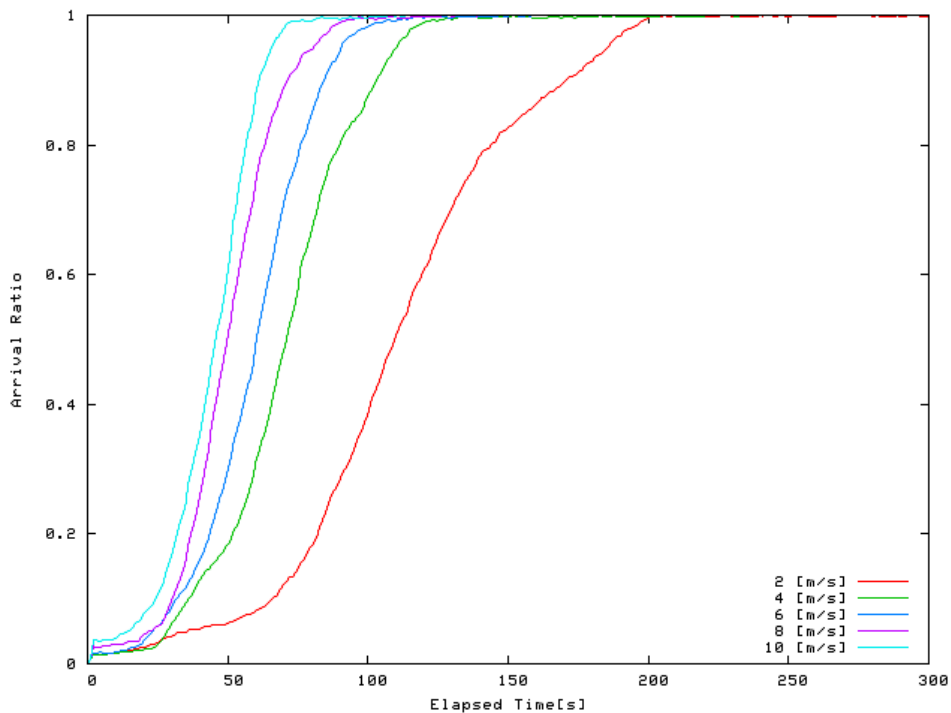


図 5.6: ノードの移動速度の影響

### 5.3.5 まとめ

本章では、提案した持続的ジオキャスト手法の基本性能をシミュレーションによって評価した。シミュレーションによって、ノードの移動する数が多いほど、そしてノードの移動する速さが多いほど、配信後の経過時間に対するパケットの到着率は早く上昇していくことが示された。

5.3.1 で見たように、従来のジオキャスト手法で持続的ジオキャストを実現する場合は、ノードの移動によってパケットの配信性能は低下していくことが普通であった。しかし、

5.3.4 , 5.3.4 の結果からわかるように , 本手法を用いれば , ノードの移動が大きくなるほど配信性能が上昇するという結果が得られた .

## 第6章 位置情報を用いた統合システムの開発

### 6.1 概要

我々はこれまでに、位置情報を応用した様々なシステムを開発してきた。具体的には、アドホック通信を用いた端末の位置情報高精度化システム [27]、端末の位置情報と時間をもとにしたアドホックネットワークにおけるアドレス管理を行うシステム [26]、推定された端末の位置情報をもとに、端末の現在地を地図上に表示するアプリケーション [28] を開発してきた。本章では、提案する持続的ジオキャストの配信を行うシステムを開発し、そのシステムとこれまでに開発してきたシステムを統合した、総合的なシステムの設計内容について述べる。

### 6.2 使用機器

本システムを構成する機器を図 6.1 に示す。端末には、lenovo 社製の Thinkpad X60 を使用し、OS には Ubuntu Linux(8.04) [29] を用いた。無線通信には端末に内蔵されている無線 LAN デバイス (Atheros 社製) を用いた。ドライバには、Atheros 社が公開しているオープンソースの Linux 版無線 LAN ドライバである Madwifi [30] を使用した。

他に、位置情報を取得するための外部デバイスとして、ポイントマン DRM (図 6.1 右の機器) と、RFID リーダー (図 6.1 左のアンテナ) を使用した。ポイントマン DRM は米国の HoneyWell 社から販売されている位置推定用機器であり、GPS レシーバーの他に、地磁気センサ、加速度センサ、気圧センサが付属している。ユーザはポイントマン DRM を腰部分に身につけて歩いて使用する。地磁気センサによってユーザの歩く方角が、加速度センサによってユーザの歩く速さが推定される。

RFID リーダーは、図 6.2 のようなアクティブ RFID タグの ID を読み込む機器である。タグとの通信距離は、5m から 15m 程度である。通信距離は、RFID リーダーのアンテナ設定によって調整することが可能である。



図 6.1: 使用した機器



図 6.2: アクティブ RFID タグ

## 6.3 システム構成

このシステムは、3つのデーモンプログラム (Location Middleware, STA Management Daemon, Routing Daemon) と、それらに付随するアプリケーションから構成される。

まず各システムの動作概要について個別に述べ、次にシステム間の関係について説明する。

### 6.3.1 位置情報統合ミドルウェア

位置情報統合ミドルウェア (Location Middleware) は、端末の位置情報の統合管理を行うデーモンプログラムである。GPS, RFID リーダー, ポイントマン DRM といった様々な外部デバイスからの信号を利用して推定された端末の位置情報を、本プログラムが統合管理する。また、近接ノードと遭遇時に、端末の位置情報等を交換し合い、それらの情報を用いて MLE(Maximum Likelihood Estimation) を利用した位置推定も行う。

本プログラムでは、以下の推定手法を用いている。

#### GPS による位置推定

ポイントマン DRM には GPS レシーバーが付属しており、ポイントマン単体で GPS による位置推定が可能である。ポイントマンから送られてきた位置情報をそのまま端末の位置として推定する。

#### RFID リーダーによる位置推定

本手法による位置推定は、街中のいたるところにアクティブ RFID タグが設置されており、各タグの ID と位置情報 (緯度, 経度) の組み合わせを記憶したデータベースを端末がローカルに保有していることを前提としている。RFID リーダーによって端末がタグの ID を読み取ると、データベースから対応する位置情報を取り出し、それを端末の位置と推定する。

#### 自律航行モジュールによる位置推定

ポイントマン DRM に搭載されている磁気センサおよび加速度センサによって、端末の進む方角と距離が取得される。これにより、GPS や RFID タグによる位置推定ができない場所においても、ある程度端末の位置推定を行うことが可能となる。

## 近接ノードとの情報交換を用いた位置推定

[27] によって提案された位置推定手法である．位置推定は以下のような方法で行われる．ポイントマン DRM による歩行距離の推定値，および進行方向角の推定値の誤差はガウス分布に従っている．一方，進行方向角の推定値の誤差は十分小さいため，ユーザの存在誤差範囲は 2 次元 Gauss 分布をとり，楕円形に近似することができる．

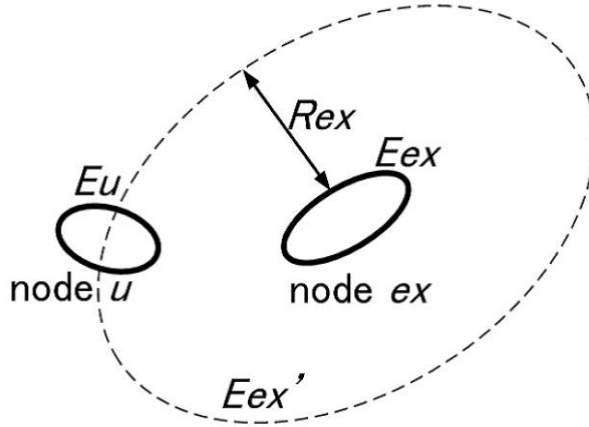


図 6.3: P2P 通信を用いた位置高精度化アルゴリズム

図 6.3 に，他端末との位置情報の交換，および高精度化アルゴリズムの概要を示す．各端末は自身の存在範囲を，2 次元 Gauss 分布，すなわち分散共分散行列，平均ベクトルにより保持する．端末  $i$  はタイムスロットごとに Hello メッセージとして，自身の存在範囲  $L_i$ ，通信半径  $R_i$ ，存在範囲を最後に更新してから経過時間  $T_i$  を隣接端末にブロードキャストする．各端末は Hello メッセージを受信し，位置情報の高精度化アルゴリズムを実行し，自身の存在範囲  $L_i$  を更新する．以下に，端末  $u$  が隣接端末  $ex$  より Hello メッセージを受信した場合を考える．

1. 端末  $u$  は自身の存在範囲  $L_u$ ，すなわち平均ベクトル  $\mu_u$ ，分散共分散行列  $\Sigma_u$  から確率楕円  $E_u$  を生成する．
2. 受信した端末  $ex$  の存在範囲  $L_{ex}$  より同様に確率楕円  $E_{ex}$  を生成する．この確率楕円  $E_{ex}$  を，端末  $ex$  の通信半径  $R_{ex}$  だけ拡大したものを  $E_{ex}'$  とする．
3. 自身の確率楕円  $E_u$  と隣接端末の通信範囲  $E_{ex}'$  の共通範囲  $Z$  を求める．まず  $E_u$  を満たす格子点集合  $N_u$  を生成する．次に  $N_u' \subseteq E_{ex}'$  かつ  $N_u' \subseteq N_u$  となる  $N_u'$  を求める．
4.  $N_u'$  より平均ベクトル  $\mu_u'$  および分散共分散行列  $\sigma_u'$  を求め，自身の存在範囲を  $L_u'$  に更新する．

以上が高精度化アルゴリズムのステップである．



### 6.3.2 STA 管理デーモン

STA 管理デーモン (STA Management Daemon) は, [26] によって開発された各端末のアドレスを生成・管理するデーモンプログラムである. STA (Spatio-Temporal Address) は [25] によって提案されたアドレス体系である. STA は, Location Middleware によって得られた端末の緯度, 経度, 高度, および時刻に基づいて生成される. 同時刻かつ同位置に複数の端末は存在しないことを仮定すれば, アドレスの重複は発生せず, 一意性が保障される.

図 6.4 のように, 本プログラムでは, STA を IPv6 アドレスに組み込んで実装されている. IPv6 アドレスの後半の 80 ビットを用い, 緯度経度にそれぞれ 26 ビット, 高さに 14 ビット, 時刻に 14 ビットが割り当てられる. これにより, 端末の緯度経度情報は 2m の粒度, 高さは 1m の粒度, 時刻は 10 秒の粒度で表現することが可能である. またネットワーク層のプログラムとして実装されているため, `ifconfig` などの各種 Linux コマンドにてアドレスを参照することが可能であり, ソケットプログラミングでの送信先・送信元アドレスとして使用することも可能である.

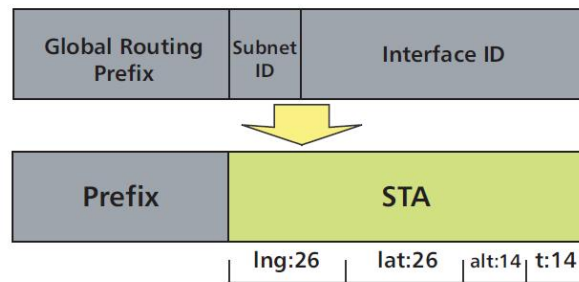


図 6.4: IPv6 への STA の埋め込み

### 6.3.3 ルーティングデーモン

ルーティングデーモン (Routing Daemon) は, 本研究で提案したジオキャスト配信のためのルーティングを行うデーモンプログラムである. すべてのジオキャスト配信パケットの送受信はデーモンプログラムによって行われ, 必要なパケットがアプリケーションプログラムに転送される. 送受信は IPv6 上のソケットプログラムによって行う. 以下にデーモンプログラムが行う処理を述べる.

- 近隣ノードの管理

近接ノードから送られる Hello Packet から得た情報により, 通信半径内にいるノードの情報を管理する. 管理される情報は, ノードの識別子と緯度経度情報, およびその情報を得たときの時間である. 記録の有効時間は 15 秒としている. 15 秒間 Hello Packet を受け取らなかったノードは, 近隣テーブルから削除される.

- 再送履歴の管理

不必要な Inquiry Packet の送信を防ぐために使用される．

- 受信パケットの保管

第二段階にて再送を行うためのパケットを保管する．

- パケットの送受信

全パケットの送受信を行う．LBM Packet の実際の送信は，デーモンプログラムによって行われるが，パケットを生成するのは，アプリケーションプログラムである．デーモンプログラムは受け取ったパケットをそのまま送信する役割を担う．また，ヘッダを参照し，自ノードあてのパケットであると判断した場合は，そのパケットをアプリケーションプログラムに転送する．一方，Hello Packet, Inquiry Packet, Inquiry Reply Packet, Retransmission Packet の生成は，デーモンプログラムにて行う．また，受信したこれらのパケットもアプリケーションプログラムに渡すことはない．なお，本実装では，Hello Packet の送信間隔は 5 秒としている．

#### 6.3.4 ジオキャスト配信アプリケーション

パラメータをユーザが入力し，持続的ジオキャストの配信を行うアプリケーションである．また，受信したメッセージの表示を行う．ユーザが入力する項目は，パケットの数，配信地域，第二段階の継続時間である．配信地域は，配信地域の中心座標，および中心からの距離で指定される．また継続時間は分単位で指定される．アプリケーションプログラムはこれらの情報を含んだパケットをデーモンプログラムに転送し，LBM Packet の送信要求を行う．

#### 6.3.5 地図ナビゲーションアプリケーション

LocationMiddleware によって推定された端末の位置と推定誤差範囲，および電子タグ基準点の位置を地図上に表示するアプリケーションである．アプリケーションの動作例を図 6.5 に示す．本アプリケーションでは，端末の位置の他，これまでに通った軌跡も表示している．

表示地図には，国土地理院より提供された「数値地図 2500 空間データ基盤世界測地系対応版」[32] を用いている．地図データはノート PC にローカルに保存されている．近年，Google Maps API[33] のように，インターネット上で無料公開されている地図情報サービスの利用が普及しているが，本研究では地図データをローカルに保存する手法が採用されている．これは，本研究のシステムでは位置情報高精度化のために P2P 通信を行っているため，インターネットに常時無線接続することが難しいためである．

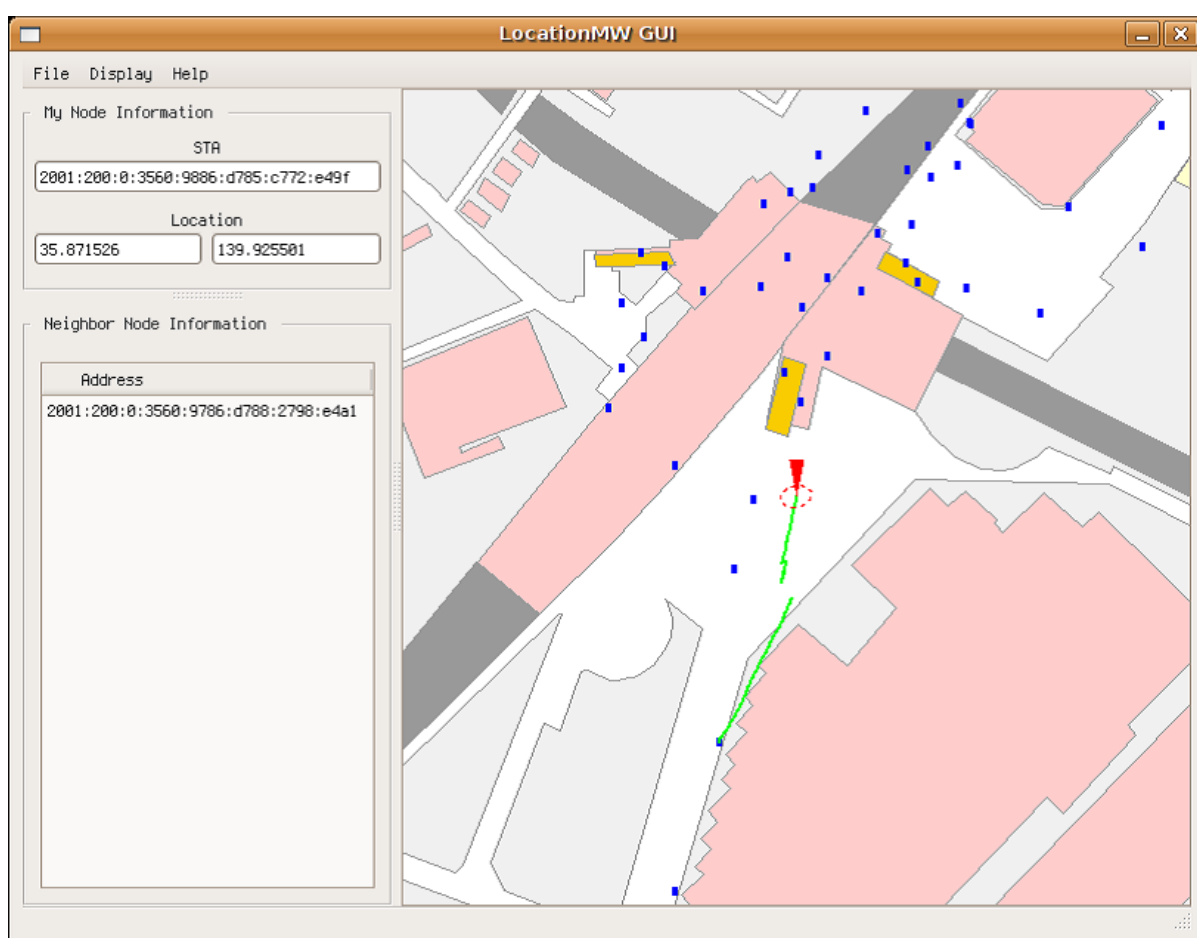


図 6.5: 地図ナビゲーションアプリケーション

### 6.3.6 各システム間の関係

我々が開発した統合システムの関係図を，図 6.6 に示す．統合システムでは，各システム間で次のようなデータの送受信を行っている．

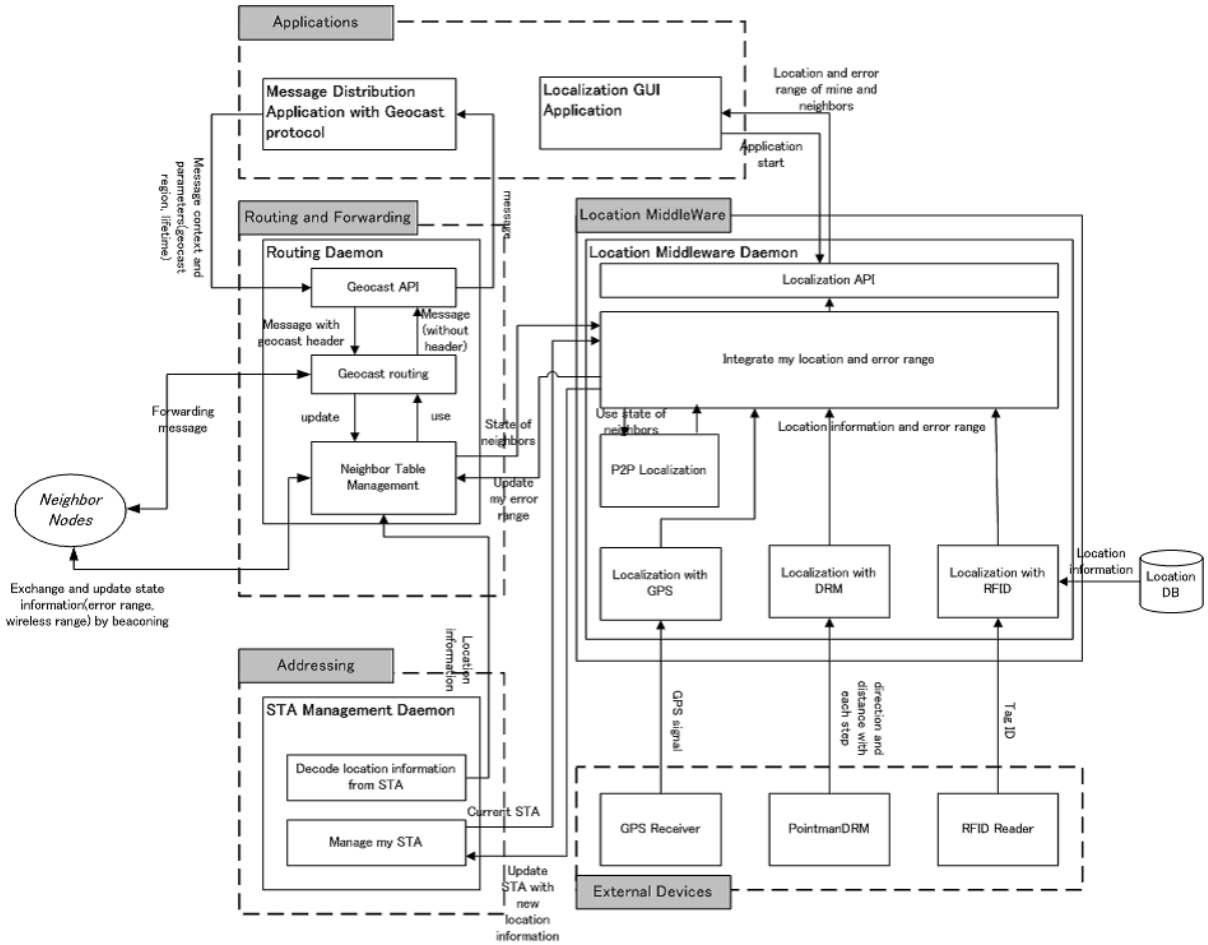


図 6.6: 統合システムの関係図

**Location Middleware と STA 管理デーモン** Location Middleware によって推定された位置情報が STA 管理デーモンへ送信され，STA 管理デーモンにて端末の STA がアップデートされる．また，端末の現在の STA 情報が Location Middleware に送信される．

**Routing Daemon と STA 管理デーモン** STA 管理デーモンによって生成された STA を用いて，Routing Daemon で他ノードとの通信が行われる．また，STA を逆変換することで得られる位置情報を用いて，端末の位置情報を組み込んだビーコンパケットが生成される．

**Location Middleware と Routing Daemon** Location Middleware によって推定された端末の存在誤差範囲が Routing Daemon に送信され、ビーコンパケットに組み込まれて他ノードへ送信される。ビーコンパケットの受信によってアップデートされた近接ノード情報をもとに、他ノードの位置情報、存在誤差範囲を Location Middleware に送信し、位置情報高精度化アルゴリズムが実行される。

**Routing Daemon とジオキャスト配信アプリケーション** ジオキャスト配信アプリケーション側から各種パラメータを Routing Daemon へ送り、ジオキャスト配信を行う。また、Routing Daemon が受信したパケットの情報を配信アプリケーションへ送信し、端末のターミナル上に表示される。

**Location Middleware と地図ナビゲーションアプリケーション** Location Middleware によって推定された端末の位置、存在誤差範囲、および電子タグ基準点の位置情報がアプリケーションへ送信され、それらが地図上に表示される。

## 第7章 電子タグが配置された環境での動作実験

### 7.1 概要

我々は電子タグ基準点を用いた位置推定システムを開発してきた。このシステムは、町中のあちこちに電子タグ基準点が設置されている環境での利用が想定されている。従って、本システムの有効性を評価するには、実際に電子タグが多数配置された環境での動作実験が必要となる。

また、第5章で本研究で提案した持続的ジオキャスト手法をシミュレーションによって評価した。しかし、現実には無線通信は様々な物理条件によって影響を大きく受けるので、シミュレーションではなく実機を用いた検証を行うことが望ましい。

本章では、実際に屋外環境に多数の電子タグ基準点を設置し、位置推定を複数の手法で行うことで、実用環境での位置推定の動作状況および精度を評価する。また、同時に持続的ジオキャストの配信を行うことで、屋外環境での動作評価を行う。

### 7.2 実験内容

2008年11月26日、千葉県流山市の流山おおたかの森駅（千葉県流山市）周辺にアクティブRFIDタグを総計172個配置し、我々が開発した統合システムを用いた位置推定実験、およびデータ配信実験を行った。実験が行われた流山おおたかの森駅周辺と、設置された電子タグが記載された地図を図7.1に示す。電子タグは駅周辺の道沿いの他、トンネル下や駅構内など、GPS信号の受信が難しい場所に重点的に配置された。

#### 7.2.1 システム設定

開発した統合システムで用いた無線LANドライバであるMadwifi[30]では無線LANの電波出力強度を連続的に設定することができない。最低出力の設定では通信半径が5m程度となるが、次段階の出力設定では80m～150mとなり、最低出力以外の送信出力設定では、無線通信の通信半径が一定しない。統合システムで用いたP2P通信による位置高精度化手法では、通信半径が一定であることが前提条件となっているため、端末の通信半径は5m程度に設定した。

## 第 7. 電子タグが配置された環境での動作実験



図 7.1: 実験実施地域及び電子タグ配置図

### 7.2.2 位置推定実験

#### 概要

電子タグが多数配置された駅周辺の道を通るコースを地図で指定し、開発した地図ナビゲーションアプリケーションを起動したまま、18人のユーザにコースを1周歩いてもらった。ユーザは、実験開始後に二人ずつ30秒間隔で出発していった。実験後、実際に歩いた道のりと、地図ナビゲーションアプリケーションによって推定された位置の軌跡を比較することで、本システムの位置推定の精度を調査することを目的とした。また、地図ナビゲーションアプリケーションの実用性に関するアンケート評価を併せて行った。実験は2回行った。以下、それぞれの実験内容を述べる。

#### 実験1本目

1回目の実験では、全ユーザ(18人)のうち、半数が図7.3を時計回りに周回してくるコースを、残りの半数が図7.3を反時計回りに周回してくるコースを指定した。それぞれのコースについて、ユーザは異なる位置推定手法が設定された。表7.2.2に設定内容を示す。

同様のコースをユーザ毎に位置推定手法の設定を変えて比較することで、GPSによる位置推定、電子タグによる位置推定、電子タグとPointman、P2P通信全てを用いた位置





図 7.2: 実験当日の風景

推定手法の精度の比較を目指した。

### 実験 2 本目

2 回目の実験では，全ユーザ (18 人) が電子タグ，Pointman，P2P 通信の全ての位置推定手法を用いる状態にした．かわりにコースを 18 通り用意し，全ユーザが別々のコースをたどるように指定した．コースは，図 7.4 から図 7.12 の 9 通り用意し，時計回りのコースに一人，反時計回りのコースに一人を割り当てた．同様のコースで時計回りに周回するユーザと反時計回りに周回するユーザを割り当てたのは，最低 1 回は他のユーザとすれ違う機会を設けることで，P2P 通信を用いた位置推定を 1 度以上実行させるためである．

実験終了後に 18 人の位置推定精度を調査することで，我々の開発した位置推定手法が，電子タグが配置整備された屋外環境で実際に精度良く動作するかどうかを調査することを目指した．

いずれのコースも，駅構内やトンネル下，通学路など，電子タグが配置された地域を中心に周回するコースとした．ただし，コース 9 については，電子タグが全く配置されていない区間を長期間通行するコース設定としている．これは，電子タグが配置されていない環境で，Pointman による自律航行推測でどれだけ位置の精度が得られるかを調査するために設定した．



表 7.1: 実験 1 本目の位置推定手法の設定

ユーザ ID	位置推定手法	コース
1	GPS	反時計回り
2	GPS	反時計回り
3	GPS	時計回り
4	GPS	時計回り
5	RFID	反時計回り
6	RFID	反時計回り
7	RFID	時計回り
8	RFID	時計回り
9	Pointman, RFID	反時計回り
10	Pointman, RFID	反時計回り
11	Pointman, RFID	時計回り
12	Pointman, RFID	時計回り
13	Pointman, RFID, P2P	反時計回り
14	Pointman, RFID, P2P	反時計回り
15	Pointman, RFID, P2P	時計回り
16	Pointman, RFID, P2P	時計回り
17	Pointman, RFID, P2P	反時計回り
18	Pointman, RFID, P2P	時計回り



図 7.3: 実験 1 回目で周回したコース図



図 7.4: 実験 2 回目で周回したコース図 1

## 第 7. 電子タグが配置された環境での動作実験



図 7.5: 実験 2 回目で周回したコース図 2



図 7.6: 実験 2 回目で周回したコース図 3



図 7.7: 実験 2 回目で周回したコース図 4

## 第 7. 電子タグが配置された環境での動作実験



図 7.8: 実験 2 回目で周回したコース図 5

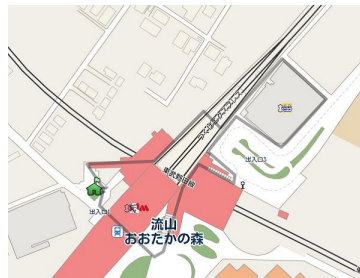


図 7.9: 実験 2 回目で周回したコース図 6



図 7.10: 実験 2 回目で周回したコース図 7



図 7.11: 実験 2 回目で周回したコース図 8



図 7.12: 実験 2 回目で周回したコース図 9

### アンケート評価

実験 1 本目終了後，2 本目終了後，実験全体終了後に，実験に参加したユーザに位置推定実験に関する以下のアンケートに答えてもらった．

アンケート項目 アンケート項目には，以下の質問を用意した．以下の項目は，実験 1 本目終了後，2 本目終了後の 2 回回答してもらった．

- システムに何か不具合が生じたか
- システムに不具合が生じた場合，どのような不具合が生じたか
- 道に迷うことなく指定の道順を正しくたどることができたか
- 道に迷った場合，迷ったときの状況
- システムに表示されたあなたの位置と実際に表示された位置との誤差はどの程度だったか（誤差大きい，誤差やや大きい，どちらでもない，誤差ほぼなし，誤差なし，の 5 通りの選択肢を用意した）
- 他の実験参加者と何人位ずれ違ったか

また，実験終了後の質問項目に，以下の質問を用意した．

- 今回の実験で用いたシステムは何の役にたつと思うか
- その他，自由記入欄

### 7.2.3 持続的ジオキャスト配信実験

持続的ジオキャストの配信実験は，7.2.2 の実験と同時に 2 回行った．

実験開始と同時に，出発拠点から持続的ジオキャストメッセージの配信を 1 度だけ行った．ジオキャスト配信領域は，拠点周辺 2km とした．すなわち，ユーザが歩くコースは全て配信領域とした．これは，端末の通信半径が 5m 程度に設定されたため，ノードが移動によって出会った近接ノードに対してパケットの転送に成功する可能性が高くないため，配信領域を狭めるとパケットを受信するノード数が非常に少なくなってしまう可能性があったためである．

実験開始直後に 2 台のユーザにパケットを配信し，2 台のユーザがその後に残りの 16 台のユーザに対してどれだけパケットを伝搬していくことができるかの調査を目指した．

## 7.3 実験結果

実験結果を示す．実験の結果，半数以上の端末で実験の最中にナビゲーションアプリケーションがフリーズしてしまうという現象に見舞われてしまい，正しい位置推定のログデータを抽出することができなくなった．また，実験開始直後のジオキャストメッセージの最初の配信時に，2 台のユーザにメッセージが届いていなかったため，伝搬が全く行われない結果となった．

しかしながら，実験の最中に，我々の開発したナビゲーションアプリケーションは正常に動作することをデモンストレーションによって示された．具体的には，電子タグによる位置推定，Pointman を用いた自律航行による位置の推定，すれ違い際の P2P 通信による位置の高精度化が行われる状況を，多数の報道機関関係者が見学している中，実証された．

### 7.3.1 アンケート結果

アンケート結果をまとめたものを表 7.2 に示す．アンケートの結果，システムに不具合が生じた人数が 1 本目 2 本目ともに 9 人となり，参加者の半数に不具合が生じた結果となった．不具合理由は全て，実験開始後の歩行途中に突然ナビゲーションアプリケーションがダウンしてしまうというものだった．

ナビゲーションによって道順をたどることができた人数も，実験 1 本目 2 本目ともに 9 人となった．これは，ナビゲーションアプリケーションがダウンしてしまった参加者

表 7.2: 実証実験アンケート結果

項目	実験 1 本目	実験 2 本目
システムに不具合が生じた人数	9 人 (50)	9 人 (50%)
地図ナビゲーションによって道順を迷わずたどることができた人数	9 人 (50%)	9 人 (50%)
実験中すれ違った人数 (平均値)	6.7 人	3.8 人
誤差の程度 (平均値)	2.4	1.7
誤差の程度 (平均値), システム不具合者の評価を除く場合	2.6	1.7

が、現在地が表示されなくなってしまうために道順が混乱してしまったことが原因である。

誤差の大きさは、最大評価（誤差なし）を 5，最低評価（誤差大きい）を 1 とし、回答の平均値をとったところ、実験 1 本目の平均値が 2.4，実験 2 本目の平均値が 1.7 となった。システムに不具合が生じた参加者の評価を除いた場合の誤差の大きさの平均値は、実験 1 本目が 2.6，実験 2 本目が 1.7 となった。システムに不具合が生じなかった場合でも、位置推定の誤差が非常に大きいという結果となった。アンケート結果の自由記述欄にて、電子タグ基準点の付近を通過しても位置情報のアップデートが行われないことが多いという記述が多く見られた。電子タグによる位置推定機能に何らかの問題が生じていたと考えられる。

実験で用いたシステムは何の役に立つと思うかという質問の回答では、「GPS が使えない屋内環境での位置検出」に役立つという回答が多く、7 人の回答が得られた。

## 第8章 結論

### 8.1 本研究のまとめ

本研究では、一定時間の配信時間を設けた「持続的ジオキャスト」の手法を提案した。本手法は、ジオキャストの送信時刻と受信時刻の同期性を求めないかわりに、ノードの自由な移動によって情報を空間的に分散し、転送していく手法である。シミュレーション評価によって、ノードの動く割合や速さによって情報伝達の精度が向上していくことを示した。

また、本研究では、我々がこれまでに開発してきた電子タグやP2P通信を用いた位置推定システム、時空間アドレス管理システム、持続的ジオキャスト配信システム、地図ナビゲーションアプリケーションを統合したシステムを開発した。位置推定に使用する電子タグ基準点を実際に屋外環境に多数設置し、複数ユーザで本システムの屋外環境での動作実験を試み、開発したシステムが実際に動作したことを確認した。

### 8.2 今後の課題

最後に、本研究の今後の課題を述べる。

#### 8.2.1 持続的ジオキャスト手法に関する課題

**受信までに要する時間** 持続的ジオキャストを実際に適用するにあたっては、到着率だけでなく、ノードが配信地域に進入してから情報を受信するまでに要する時間も重要となる。例えば、危険情報の緊急配信に利用する例を考えると、ノードが配信地域に進入したらできる限り早く情報を受信する必要がある。また、同じ配信地域であっても、配信地域の中央付近と、外側の境界付近では、配信に要する時間の重要性は異なってくる。配信地域の中央に近づくほど、確実かつ迅速に情報が配信されるような手法が望ましいといえる。

**送信者と配信地域の距離** 本研究では送信場所から配信地域までの距離が比較的近い場合を想定したシミュレーション評価を行った。しかし、配信地域が送信場所から非常に離れている場合、多数のノードに不要な情報を保持させることになるため、何らかの対策を講じる必要があるといえる。例えば、配信地域に情報が一度伝達したら、情報を保



持するのは配信地域に存在するノードだけで，配信地域外の Forwarding Zone に存在するノードは情報を除去するようなプロトコルがあれば，ノードが不要な情報を保持する確率が下がると考えられる．

実世界環境に近い環境での適用 本研究では，シミュレーション評価でのノードのモビリティモデルにランダムウェイポイントモデルを用いた．ランダムウェイポイントモデルは，ノードの行動パターンとしてアドホックネットワークのシミュレーションで広く用いられてきたモデルである．しかし，ランダムウェイポイントモデルは実世界での人間のモビリティモデルとは大きく異なることが知られている [21] ．

近年，実際の人間の行動履歴から解析された，より実世界の行動に近いモビリティモデルが多く提案されている [22][23][24] ．より精度の高いモビリティモデルによって評価を行っていく必要がある．

### 8.2.2 統合システムの開発課題

実験による定量的評価 本研究では，電子タグ基準点を多数配置した環境での位置推定実験およびジオキャスト配信実験を試みたが，システムに不具合が発生し，定量的な評価にいたらなかった．不具合修正後再実験を行い，位置推定の精度やジオキャスト配信性能の定量的な評価を改めて行っていく必要がある．

ナビゲーションとジオキャスト配信アプリケーションの統合 本研究で開発した地図ナビゲーションアプリケーションは，ユーザの推定された現在地を表示させる機能のみを持っている．このアプリケーションに，持続的ジオキャストによる情報配信機能を追加することで，ユーザがその配信地域にメッセージを残すことができる．多くのユーザが本システムを用いて持続的ジオキャストを行えば，ある期間，ある地域では，どのような話題が注目を浴びているのかがわかるというような，位置に基づいた新サービスへの応用が考えられる．

## 参考文献

- [1] H. Lim, and C. Kim, "Flooding in Wireless Ad Hoc Networks," *Computer Communications*, Vol. 24, pp. 353–363, 2001.
- [2] Y. B. Ko, and N. H. Vaidya, "Flooding-based Geocasting Protocols for Mobile Ad Hoc Networks," *ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications(MONET) journal*, Vol. 7, pp. 471–480, December 2002.
- [3] Wen-Hwa Liao, Yu-Chee Tseng, and Jang-Ping Shen, "GeoGrid: A Geocasting Protocol for Mobile Ad Hoc Networks Based on GRID," *Journal of Internet Technology*, Vol. 1, pp. 23–32, 2000.
- [4] V. D. Park, and M. S. Corson, "A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, Kobe, Japan, April 1997.
- [5] Y. B. Ko, and N. H. Vaidya, "GeoTORA: A Protocol for Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks," in *Proc. of 8th Int'l. Conf. Network Protocols(ICNP)*, Osaka, Japan, 2000.
- [6] Sung-Hee Lee, and Y. B. Ko, "Geometry-driven Scheme for Geocast Routing in Mobile Ad Hoc Networks," *Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 638–642, 2006.
- [7] K. Seada, and A. Helmy, "Efficient Geocasting with Perfefct Delivery in Wireless Networks," in *Proc. of WCNC*, Mar. 2004.
- [8] B. Karp, and H. T. Kung, "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," in *Proc. of ACM/IEEE MobiCom*, pp. 243–254, Aug 2000.
- [9] D. Johnson, and D. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad-hoc Wireless Networks," in *Proc. of ACM SIGCOMM*, August 1996.
- [10] C. Perkins, and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-sequenced Distance-vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," *Computer Communication Review*, 24, October 1994.

- 
- [11] C. Perkins, and E. Royer, “Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing,” in 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, February 1999.
  - [12] Mehran Abolhasan, Tadeusz Wysocki, and Eryk Dutkiewicz, “A Review of Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks,” *Ad Hoc Networks*, Vol. 2, pp. 1–22, January 2004.
  - [13] Kevin Fall, “A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets,” in *Proc. of ACM SIGCOMM*, August. 2003.
  - [14] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, “A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks,” in *Proc. of MobiHoc 2004*, May 24–26, 2004.
  - [15] V. D. Park, and M. S. Corson, “A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks,” in *Proc. of IEEE INFOCOM*, Kobe, Japan, Apr. 1997.
  - [16] D. K. Goldenberg, Jie Lin, A. Stephen Morse, Brad E. Rosen, and Y. Richard Yang, “Towards Mobility as a Network Control Primitive,” in *Proc. of MobiHoc 2004*, May 24–26, 2004.
  - [17] Ryohei Suzuki, Tsuyoshi Suzuki, Kaoru Sezaki, and Yoshito Tobe, “Billiards: Policy-based Session Control Protocol in Disruption Tolerant Sensor Networks,” *Special section on Ubiquitous Sensor Networks, IEICE Trans. on Comm*, 2007.
  - [18] Amin Vahdat, and David Becker, “Epidemic Routing for Partially-connected Ad-hoc Networks,” *Technical Report CS-2000-06*, Duke University, July 2000.
  - [19] Jorg Hahner, Christian Becker, and Kurt Rothermel, “A Protocol for Data Dissemination in Frequently Partitioned Mobile Ad Hoc Networks,” *IEEE ISCC*, 2003.
  - [20] Antonis Panagakis, Athanasios Vaios, and Ioannis Stavrakakis, “Study of Two-Hop Message Spreading in DTNs,” *IEEE WiOpt*, 2007.
  - [21] J. Yoon, M. Liu, and B. Noble, “Random Waypoint Considered Harmful,” in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 1312–1321, 2003.
  - [22] D. Bhattacharjee, A. Rao, C. Shah, M. Shah, and A. Helmy, “Empirical Modeling of Campus-Wide Pedestrian Mobility: Observations on the USC Campus,” in *Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference*, September 2004.
  - [23] M. Kim, D. Kotz, and S. Kim, “Extracting a Mobility Model from Real User Traces,” in *Proc. of the IEEE INFOCOM*, 2006.

- [24] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, and S. Chong, “On the Levy-walk Nature of Human Mobility: Do Humans Walk like Monkeys?”, Technical Report, North Carolina State University, 2007.
- [25] 山崎 浩輔, 瀬崎 薫, “時空間での唯一性を利用したアドレッシングに関する一検討,” 信学技報, NS6 月, 2004.
- [26] 岡野 諭, 瀬崎 薫, “時空間アドレス割り当て機構の設計と実装,” 電子情報通信学会総合大会, B-7-225, 2007 年 3 月発表 .
- [27] 田中 隆浩, 岡野 諭, 瀬崎 薫, “アドホックネットワークを利用したシームレスな位置情報の取得,” 第 6 回アドホックネットワークワークショップ, 2007.
- [28] 仲村 陽一, 島田 健太, 瀬崎 薫, 三好 匠, “アドホックネットワークを利用したシームレスな位置情報表示アプリケーション,” 電子情報通信学会総合大会, B-21-7, 2008.
- [29] Ubuntu Linux, <http://www.ubuntu.com>
- [30] MadWifi, “Multiband Atheros Driver for Wireless Fidelity,” <http://madwifi.org/>
- [31] NS, “The Network Simulator - ns2 -”, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [32] “国土地理院 数値地図 2500(空間データ基盤),” <http://www.gsi.go.jp/MAP/CD-ROM/2500/t2500.htm>
- [33] “Google Maps API,” <http://code.google.com/apis/maps/index.html>

## 発表文献

Kaoru Sezaki, Shin'ichi Konomi, Ryohei Suzuki and Tohru Furusawa, "An RFID-Based Positioning System for Ad-Hoc Networks," ACM MobiHoc 2008(demo), HongKong, May. 2008.

古澤 徹, 瀬崎 薫, "アドホックネットワークにおける持続的なジオキャスト手法の検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-21-12, 2008 年 9 月.

古澤 徹, 木實 新一, 瀬崎 薫, "アドホックネットワークと電子タグを利用した位置推定システムの開発," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-20-30, 2009 年 3 月発表予定.

# 謝辞

研究を進めるにあたり，多くの方々に助けていただきました．まず，指導教官として直接ご指導いただき，また研究に対して有益なご指導，ご批評，そして励ましの言葉を下さいました，瀬崎薫准教授にあつくお礼申し上げます．

木實新一特任准教授には，プロジェクトを進めるにあたって細かいところまで様々なアドバイスを頂きました．深く感謝いたします．

また，日常より研究環境の整備に尽力してくださった松本夏穂秘書，小野裕子秘書に感謝いたします．

博士課程の角田忠信さん，鈴木亮平さん，陳紅陽には，日頃から研究内容の相談にのってくださり，学会の発表練習なども手伝っていただき，本当にありがとうございました．

修士2年のマーティンス マルセロ エンリケ テイシェイラ君，プロジェクトの準備では大変お世話になりました．本当に感謝しています．

修士1年の金善日さん，カクテン君，辻川良輔君，松原俊太郎君には，修士1年にも関わらずプロジェクトの主要メンバーとして準備を手伝っていただき，大変感謝しています．みなさんが研究室に来てから研究室がにぎやかになり，研究生活を大いに楽しめました．

研究員の李明媚さんには，研究内容についてご助言いただきました．研究生のパイプーン ウォンサースuttiクン君には，毎日遅くまで熱心に勉強を頑張る姿を見て，地道な努力の大切さを教えられました．

最後にもう一度，関係者皆様に深くお礼申し上げます．修士研究の2年間，大変お世話になりました．