

2004年度 修士論文

MANET上における位置に特化した情報の省資源な
収集提供に関する研究

2005年2月2日(水)提出

指導：深澤 良彰 教授

早稲田大学 理工学研究科 情報ネットワーク専攻

学籍番号：3603U094-6

鄭 顕志

目次

1	はじめに	1
1.1	Mobile Ad-hoc Network とは	1
1.2	本論文の流れ	3
2	MANET の問題点とルーティング	4
2.1	MANET の問題	4
2.2	MANET でのルーティングアルゴリズム	4
2.3	Geocast	6
3	想定アプリケーション	9
3.1	被災地における情報収集提供アプリケーション	9
3.2	geocast の利用と問題点	10
4	本手法の詳細	11
4.1	モバイルエージェントとは	11
4.2	手法概要	12
4.3	Geographically Bound Mobile Agent	15
4.4	サービスリレー	20
5	評価と考察	24
5.1	シミュレータの実装	24
5.2	通信メッセージ量の評価	24
5.3	expected zone の最適値	30
5.4	サービスリレー適用の効果	36
5.5	本手法の適用分野に関する考察	39
5.5.1	適用分野の一般性	40
5.5.2	本手法の限界	41
6	関連研究	42
7	おわりに	45

1 はじめに

PDA や携帯電話の普及により、誰もが個人専用の携帯端末を常時持ち歩くようになった。特に携帯電話の普及は目覚ましく、電気通信事業者協会から発表によると、2004 年 2 月 6 日時点の日本における携帯電話の累計加入代数は約 8000 万台に達している (表 1)。これは日本国民の約 2 人に 1 人は携帯電話を所有している計算となる。

また、携帯電話の高機能化も目覚ましい。Java、または BREW アプリケーションに対応した携帯電話は、同発表によると、約 3000 万台に達している (表 1)。docomo の FOMA 901i シリーズに対応した Java 仕様である DoJa4.0 においては、CLDC1.1 に対応し、アプリケーション容量 100KB、スクラッチパッド容量 400KB まで拡張されている。携帯端末上で動作するアプリケーション環境としては非常にリッチなものであり、今後一層の拡張がなされていくものと思われる。

表 1: 電気通信事業者協会発表携帯電話契約者数 (2004 年 2 月 6 日現在)

キャリア	累計契約者数	アプリケーション対応	GPS 対応
docomo	4542 万 9600 台	2204 万台	-
au(KDDI)	1620 万 9300 台	229 万台 (BREW)	752 万台
ボーダフォン	1483 万 8100 台	768 万 1900 台	-
ツーカー	365 万 1800 台	-	-
累計	8012 万 8800 台	3203 万 1900 台	752 万台

さらに、携帯端末における通信機能も高度、多様化している。最新の携帯電話、PDA には、従来の赤外線だけでなく Bluetooth や、IEEE802.11b などの無線通信機能が標準搭載されるようになった。今後は IEEE802.11n や UWB に代表される、100Mbps を超える速度で通信可能な無線通信機能も搭載されていくものと思われる。これらの無線通信機能を用いることで、携帯端末が、近隣に存在する携帯端末を発見し、直接通信し合うアドホック通信が可能となる。また、多数の携帯端末のアドホック通信で構成されたネットワーク、Mobile Ad-hoc Network(MANET)にも期待が高まっている。

1.1 Mobile Ad-hoc Network とは

Mobile Ad-hoc Network(MANET) とは携帯端末間の直接無線通信で構築されるネットワークである。従来の無線ネットワークは、インターネットに接続した無線ルータに各端末が接続することで各端末がインターネットに接続し、お互い通信し合ったり、インターネット上のサービスを利用することが可能であった。しかし、MANET は端末間で直接通信をする形態をとるために、従来の無線ネットワークとは特徴、利点、問題点などが異なる

る。従来のバックボーンインフラを仮定した無線ネットワークと違い、次のような3つの特徴を持つ。

Mobile : 動的なトポロジ変化

MANET におけるノードは携帯端末で構成されているために、各ノードは物理的に移動する。また、各ノードは無線で通信しているため通信範囲には限界があり、各ノードは自身の通信範囲内に存在するノードとしか通信できない。よって、ノードが移動することによって、通信可能なノードは変化し、ネットワークトポロジも各ノードの移動によって動的に変化する。

Ad-hoc : 自律的トポロジ生成

MANET は端末間の直接通信で構成されているため、ネットワークインフラの準備が必要ない。携帯端末が集まることで MANET が生成され、端末がいなくなることで消滅する。従来の無線ネットワークと違い、バックボーンネットワークを必要としない。

NETwork : 全てのノードはルータ機能を持つ

MANET においては基本的にマルチホップ通信が用いられ、複数のノードを経由して目的のノードとの通信を行う。直接通信可能な範囲外に存在するノードと通信を行う場合、直接通信範囲に存在するノードにメッセージを送信して、目的のノードにフォワードしてもらう。目的ノードまでの中間ノードはルータとして動作する。

インターネットが静的なトポロジを持ち、グローバルなネットワークであるのに対し、MANET は動的にトポロジが変化する、ローカルなネットワークであると言える。端末が存在する物理範囲がそのまま MANET のカバー範囲となる。MANET はこのような特徴を持つために、インターネットとは異なった利点を持つ。MANET の主な利点は次の3つが挙げられる。

即時性

MANET に対応する端末が集まればその場で容易にネットワークを構築できる。特定のアクセスポイントやサーバを用意する必要もなく、無料で容易に設置できるネットワークとして期待されている。

送信電力の抑制

通信を行いたい相手ノードが通信範囲内に存在しない場合、無線デバイスの出力を上げることで通信範囲を拡大するのではなく、マルチホップアクセスを行う。既存の無線ネットワークの基地局のように、特定の端末が広域をカバーする必要もない。このため、各端末の送信電力を抑えることが可能となる。

位置依存サービス

ネットワークトポロジと端末の物理トポロジがほぼ同じであり、物理位置に依存したサービスを提供しやすい。

このような利点を生かし、MANET は、軍用ネットワーク、車車間ネットワーク、災害地用のネットワークといった、インターネットでは解決できない要求に応えられるネットワークとしての期待が高まっている。特に MANET では位置依存情報を用いたサービスを扱うネットワークとして様々な応用例が考えられている。車車間ネットワークにおいては、各車間で MANET を構築することにより、近隣の渋滞情報や事故情報をリアルタイムに交換することができる。また、災害地においては、バックボーンネットワークが壊滅していても MANET を構築することで安否情報や必要物資といった情報の交換が行える。本論文では、MANET において、位置に依存した情報を省資源で収集するシステムを提案する。位置情報を考慮したモバイルエージェントを用いることで、MANET における資源問題を考慮した、省資源な情報収集を実現する。

1.2 本論文の流れ

本論文の構成を次に示す。2 章で MANET における課題と既存手法の問題点を挙げる。3 章で想定するアプリケーション例を示し、4 章で本システムの詳細を述べる。5 章でシミュレータによる評価を示し考察を行う。6 章で関連研究との比較を行い、7 章でまとめと今後の課題について述べる。

2 MANET の問題点とルーティング

本章では MANET における問題点とルーティングについて述べる。

2.1 MANET の問題

MANET は 1 章で述べた特徴から、MANET 固有の問題を持つ。MANET における主要な問題を次に 2 つ挙げる。

通信経路の脆弱性

トポロジが動的に激しく変化するため、経路の保持が非常に困難となる。そのため、一度成立した端末間の通信経路が、次に利用する時には利用不可能になっている可能性がある。例えば、メッセージが複数ノードを経由して送られる場合、その中間ノードが移動してしまうことで通信経路が断絶する。一般に、通信ノード間の距離が離れている場合、つまり中継ノードが多い場合、経路断絶の可能性は高くなる。

資源制約

MANET におけるノードは携帯端末であるため、ノードの計算資源、通信帯域はインターネットのノードと比較して貧弱である。また、各ノードは基本的にバッテリーで駆動しており、駆動時間に限界がある。各ノードはルータとしての機能も提供しており、メッセージのフォワーディングなどによる無線デバイスの使用、計算資源の使用によってもバッテリーを消費する。ノードの限られた資源を無駄に消費しないために、不必要な通信は最小限に抑える必要がある。

通信経路の問題は、静的なトポロジを仮定しているインターネットにおけるルーティングアルゴリズムでは解決できない。そこで、MANET に特化したルーティングアルゴリズムが提案されている。

2.2 MANET でのルーティングアルゴリズム

MANET においては、従来のルーティングアルゴリズム以上に、経路の探索及び保持という処理が重要となる。さらに、MANET ではノードの資源が限られているため、ルーティングに関わるメッセージ量を抑制する必要がある。このような問題を解決するために、MANET 上におけるルーティングアルゴリズムが多数提案されてきた [1][2][3][4]。MANET 上のルーティングアルゴリズムは大きく分けて次の 3 つに分類できる。

- proactive 型ルーティングアルゴリズム

- reactive 型ルーティングアルゴリズム
- hybrid 型ルーティングアルゴリズム

proactive 型ルーティングアルゴリズムは、端末間で定期的に経路情報を交換し合うことによって最新の経路情報を事前に作成するアルゴリズムである。proactive 型は、あらかじめ最新の経路表を作成しているため、メッセージ送信要求からメッセージ送信までにかかる時間が、reactive 型と比べて短い。しかし、常に経路情報を交換しているために、トポロジ変化が激しい場合やノード数が多い場合、経路表更新のためのメッセージ量が膨大となってしまう。代表的なアルゴリズムとしては OLSR[1] が挙げられる。OLSR ではルータ機能を持つノード数を制限することでメッセージ量を低減している。

reactive 型ルーティングアルゴリズムは、経路使用時に経路探索を行い、最新の経路を得るアルゴリズムである。reactive 型は、経路利用要求時にのみ経路を検索するため、proactive 型と比較し、経路検索にかかるメッセージ量は抑えられる。しかし、経路使用要求がきてはじめて経路探索を行うために、proactive 型と比較し経路利用の即応性に劣る。代表的なアルゴリズムとしては、DSR[2]、AODV[3] などが挙げられる。DSR は事前に検索した経路をキャッシュとして保存しておき、再度要求が来た場合は、まずキャッシュに保存された経路を利用することで即応性を上げている。経路が利用できなかった場合は、経路探索を再度行う。AODV では、経路が切断されたことを発見すると、その経路を利用する全てのノードに経路切断を通知し、キャッシュを破棄させる。

hybrid 型ルーティングアルゴリズムは、proactive 型と reactive 型を状況によって使い分けることでお互いの欠点を補うアルゴリズムである。代表的なアルゴリズムとしては ZRP[4] がある。ZRP では、近隣のノードに対しては proactive 型の経路探索を、距離が離れているノードに対しては reactive 型の経路探索を行うことでメッセージ量を抑え、且つ即応性に優れた経路利用が行える。

これらのアルゴリズムは、経路探索を行う際にメッセージ flooding を用いる。flooding は、無作為にメッセージを送信、転送を繰り返すことで、いつかはメッセージが目的のノードに到達するという考えに基づいた方式である。flooding では、転送を繰り返すため、目的のノードを見つけるために膨大な量のメッセージ転送が生じる。通常は TTL を設定し、転送回数に制限を設けることで必要以上にメッセージが転送されることを防ぐ。しかし、一般に、経路探索者は、目的ノードまで何ホップ必要となるかは知り得ない。TTL を小さく指定することによって、目的のノードまでメッセージが到達しない可能性がある。このような問題を解消するためには Expanding Ring Search を用いる。Expanding Ring Search は、最初は TTL を小さく設定し経路探索を行う。一定時間経過しても応答がなかった場合は TTL を増やして再度経路探索を行う。このような動作を繰り返すことによって、目的ノードまでのホップ数が不明な場合でも、必要回数以上の転送を行うことなく経路探

索が行える。

flooding による経路検索要求は、経路探索者から到達しうる全てのノードに行き渡る。従って、パケットの消失等がなければ、存在するルートは必ず発見されるため、信頼性を必要とする場合には有効である。その反面、無作為に要求をばら撒くため、ルーティングに関わるパケット量は非常に多くなり、非効率的なプロトコルとなる。

2.3 Geocast

AODV や ZRP などとは異なり、特定地域内に存在するノードに対するメッセージ送信を、低メッセージ量で実現する手法が提案されている [5][6][7][8][9][10]。これらのような、特定地域内にあるノードへのメッセージ送信は geocast[5] と呼ばれる。geocast を実現するルーティングプロトコルは flooding 方式、no flooding 方式、directed flooding 方式の 3 つに分類できる (図 1)。

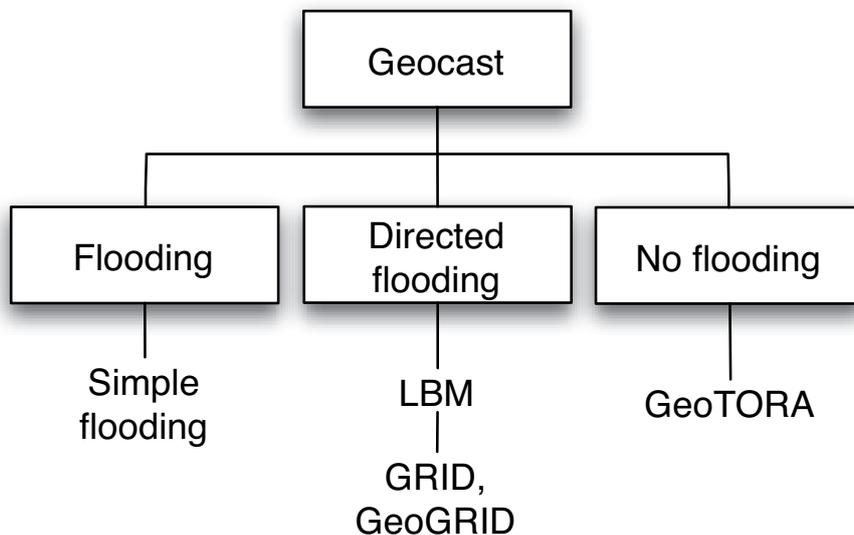


図 1: geocast の分類

flooding 方式では、ルーティングメッセージ量の抑制など、ルーティングの効率化は考慮されておらず、資源制約を考える場合、あまり実用的ではない。

no flooding 方式は、指定地域までのメッセージルーティングに、flooding を使わず、他のルーティングプロトコルを使用する。指定地域内では flooding を用いる。代表的な geocast ルーティングアルゴリズムとしては GeoTORA[10] がある。

Directed flooding 方式では、メッセージの宛先地域である geocast region の他に、フォワーディングを行う地域である forwarding zone を設定することで、転送を行うノードを

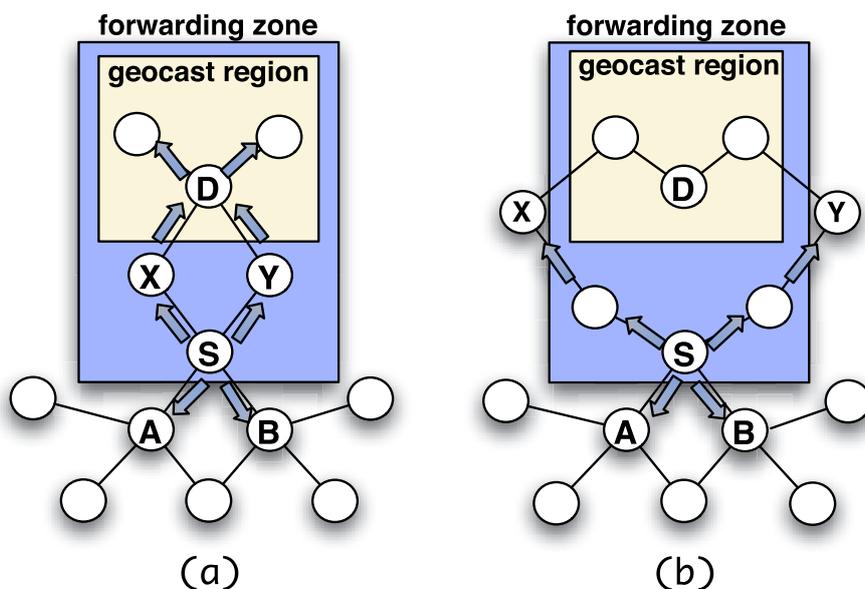


図 2: forwarding zone の設定

制限する。各ノードは GPS などを用いて位置情報を持つものと仮定している。各ノードはメッセージを受信すると、自分が、メッセージに記載された forwarding zone 内に位置している場合のみメッセージを転送する。例えば、図 2(a) のようなトポロジを考える。ノード S はメッセージ送信者であり、geocast region を図 2 のように設定しているものとする。geocast region にはノード D のみ存在する。(a) の場合、S はまず自分の通信範囲内にメッセージを送信する。このときメッセージは電波に乗せて一回だけ送信される。送信されたメッセージは A、B、X、Y の 4 ノードで受信される。ノード X、Y は自身の位置を確認し、forwarding zone に属しているため、受信したメッセージをノード X、Y 各々の通信範囲に送信する。ノード X、Y から転送されたメッセージはノード S と D で受信される。各ノードは転送したメッセージの ID を一定期間保持しておく。ノード S は、受信したメッセージの ID から、そのメッセージが以前に送信したメッセージであることを確認し、メッセージを破棄する。このような仕組みによって、メッセージが循環転送されることを防ぐ。ノード D は、受信したメッセージの geocast region に位置しているため、自身宛のメッセージであると判断し、メッセージを処理する。さらにノード D は forwarding zone にも属しているためメッセージ転送を行う。ノード S から送信されたメッセージはノード A、B でも受信される。しかし、ノード A、B はメッセージに記載された forwarding zone に属していないため、メッセージ転送を行わない。このような仕組みによって、不要なメッセージ転送を防いでいる。

forwarding zone は少なくともメッセージ送信者とメッセージ受信者を含むように設定

される必要がある。加えて、forwarding zone は送信者受信者間の経路を含むように設定されなければならない。forwarding zone の設定を小さくすることで、後者の条件を満たせない場合がある。例えば、図 2(b) のトポロジを考える。(b) のトポロジも、(a) のトポロジと同様に、送信者 S と受信者 D 間のメッセージ経路は存在している。ノード S が送信したメッセージは転送されてノード X、Y で受信されるが、X、Y は forwarding zone に属していないためメッセージを破棄する。このような場合は、forwarding zone を大きく設定して再送信するか、flooding 方式を使う。forwarding zone を大きく設定することで、指定地域内の全てのノードにメッセージが到達する確率は向上するが、メッセージ転送オーバーヘッドも増加してしまう。代表的な Directed flooding 方式の geocast ルーティングアルゴリズムは、LBM[8]、GeoGRID[9] などがある。

geocast を用いることで、近くにいる友人発見や、特定位置にいる人への広告配信、車間の渋滞、事故情報交換といった、新しいアプリケーションが実現可能となる。3 章で本研究が想定するアプリケーション例を示す。

3 想定アプリケーション

本章では、本論文で提案する手法で実現されるアプリケーション例を示す。

3.1 被災地における情報収集提供アプリケーション

阪神淡路大震災以降、災害対策が重要視されるようになった。特に、災害発生後の情報収集は、災害救助、支援を行う場合、非常に重要である。被災地に関する情報収集を十分に行うことで、効率的な災害活動が行える。しかし、災害発生後に被災地の情報収集を行うことは非常に困難である。その大きな原因の一つは、通信網の断絶である。被災地では、電気、水道、ガスといったライフラインと同様に、通信インフラも大きな打撃を受けている。2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震の中心被災地では、ケーブルの断線などを原因として、発生から半月が経過しても固定電話、携帯電話、PHS などの通信網は復旧していない。このため、災害救助者は、ラジオなどを通じて、被災者に情報を提供することはできるが、安否情報や必要物資情報など、被災者からの情報収集を行うことができない。ラジオにおける情報の配信も、被災地全域にわたる情報を提供している場合が多く、情報の粒度が荒く、特定の地域内に関する情報を選択的に提供することはできない。また、情報の収集に関しても、実際に現地では、被災地では地面に必要物資を大きく書くという非常に原始的且つ非効率的な方法で、現地上空のへりに情報を伝えていた(図 3)。



図 3: 被災地の状況

固定通信インフラがつかえない被災地において、MANET は非常に有効なネットワークインフラとなり得る。MANET は無線通信機能を備えた携帯端末があれば容易に構築できるため、通信ケーブルや電力網が壊滅状態であっても、設置可能である。被災者が携帯電話や PDA を持って避難することは現実的な想定であり、それらの携帯端末を用いて MANET を構築し、情報交換することが可能となる。災害救助者も、構築された MANET

の一部に接続することで、被災者側からの情報を収集したり、被災者側へより詳細な情報を提供することができる。このような、災害地における、MANET を用いた情報収集提供アプリケーションを考える。

3.2 geocast の利用と問題点

本アプリケーションが対象とするような、被災地における情報には次のようなものが考えられる。

被災地への提供情報

- 全体的な被害状況
- 安否情報
- 指定された避難場所
- 復旧状況の今後の見通し

被災地からの提供情報

- 局所的な被害状況
- 安否確認
- 実際の避難場所
- 必要物資

このように、交換される情報には、特定地域に特化した位置依存情報が多い。例えば、避難場所はその地区によって異なるし、必要物資はその場所にいる人たちにとって必要なものである。MANET において位置依存情報を収集提供する手法としては、geocast がある。特に災害地では、電力網が断絶し、各携帯端末はバッテリー駆動をしているため、省資源な情報交換が重要となる。MANET において省資源な geocast を行うプロトコルとしては、directed flooding 方式である LBM や GeoGRID などがある。しかし、directed flooding 方式の geocast だけでは十分に省資源な情報の収集提供は行えない。情報収集者と情報提供者が MANET 上に離れて存在している場合、forwarding zone を大きく設定する必要がある、それに伴い転送メッセージ量も増加する。さらに、情報収集者と情報提供者が頻繁に通信を行う場合は、経路上の多数の端末の資源を消費することとなる。

そこで、本論文では、モバイルエージェントを用いることで、位置依存情報の省資源な収集提供手法を提案する。本手法を用いることで、単純に geocast を用いた場合より、省資源な情報交換が行える。本手法の詳細を 4 章で述べる。

4 本手法の詳細

本章では、本論文で提案する手法の詳細を述べる。本手法は、モバイルエージェントを用いることで geocast を単純に用いる場合より、省資源で位置依存情報を収集提供することが期待できる。まずモバイルエージェントの概要とその利点を述べ、次にモバイルエージェントを用いた情報収集システムについて説明する。

4.1 モバイルエージェントとは

モバイルエージェントとは、ネットワーク上のコンピュータを主体的に移動しながら、処理を進めるプログラムである [11]。最大の特徴は、プログラムコードだけでなく、その実行内容、つまりプログラム実行時の変数内容も同時に移動し、その移動先で処理を継続できる点である。これにより、モバイルエージェントは生成されたシステムに縛られることなく、ネットワークを自由に行き来できるようになり、結果、豊富なネットワーク資源を有効に活用できるのである。

既存技術との比較

ネットワークを移動するプログラム技術はモバイルエージェントが初めてではなく、次のような分散環境技術が従来より存在した。

- プロセスマイグレーション
- リモート・エバリュエーション
- モバイルオブジェクト

ただし、これら既存技術は負荷分散や耐故障性に主眼を置き、実行中プログラムを計算負荷の重いコンピュータから軽いコンピュータに受動的に移動させることが主な目的であった。それに対し、モバイルエージェントは移動性を積極的に利用し、高次の分散処理を実現するものである [11]。

モバイルエージェントの利点

モバイルエージェントの利点の1つとしては、通信トラフィックの軽減がある。ネットワークを利用して大量のデータを処理するタイプのアプリケーションをモバイルエージェントを利用して構築することにより、ネットワークトラフィックを大幅に軽減させることができる。従来のクライアント/サーバ型のアプリケーションでは、クライアントとサーバの間で大量のデータの受け渡しを頻繁に行なわなければならない。モバイルエージェ

ントを用いる場合、エージェントを一旦対象サーバに送り出してしまえば、それ以降のデータ処理はサーバとエージェントとの間でローカルに行なうことができる。ネットワークを介した通信をローカルな通信に置き換えることで、トラフィックの大幅な軽減が可能となる(図4)。このように、情報提供者と利用者間での通信量が多い場合や、ネットワーク帯域が狭い場合、モバイルエージェントは有効であると言われている。

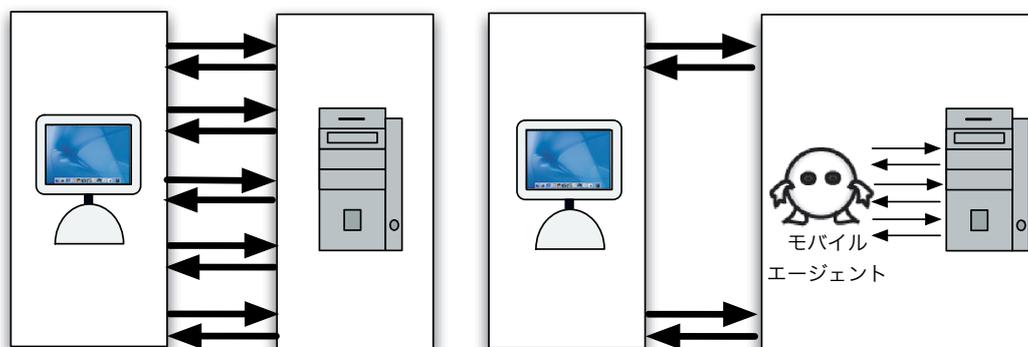


図 4: クライアントサーバ間通信トラフィックの軽減

この利点は MANET 上のアプリケーションにおいても同様に有効である。MANET において、頻繁に情報の交換を行うアプリケーションの場合、情報収集者と情報提供者間の距離が離れていると、その通信は多数のノードを経由する必要があるため、資源消費量が非常に大きくなる(図5)。モバイルエージェントを情報提供者に近いノードに派遣することにより、以降の通信を、消費資源量が大きい遠距離の通信ではなく、消費資源量が小さい近距離の通信で行うことが可能となる(図5)。モバイルエージェントを用いることで、MANET において省資源な情報収集が行えることが期待できる。

4.2 手法概要

3章で示した被災地における情報収集提供アプリケーションを例にし、本手法の概要を述べる。本手法では、モバイルエージェントを用いることにより省資源な情報収集の実現を目標とする。概要図を図6に示す。

まず、アプリケーションの仮定を示す。

- 各ノードは無線通信機能を持つ携帯電話や PDA
- 各ノードは GPS などを用いて位置情報を持つ

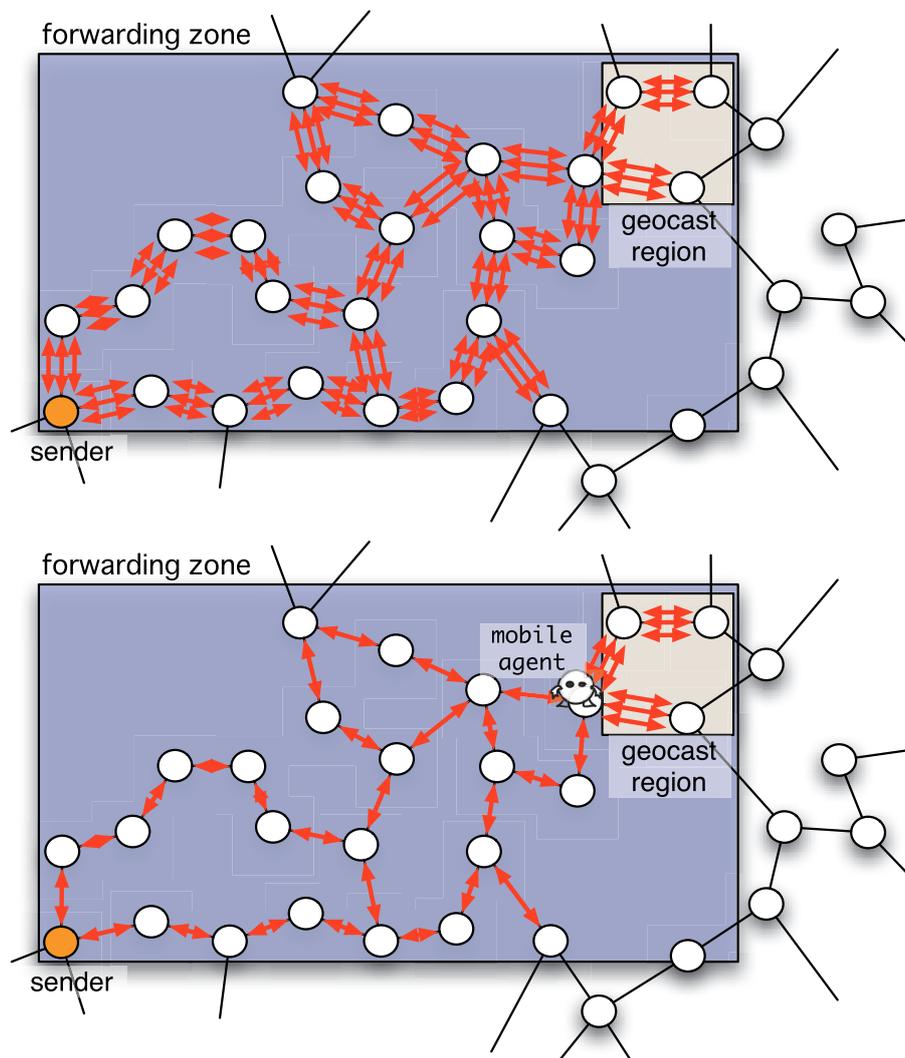


図 5: MANET での通信量の軽減

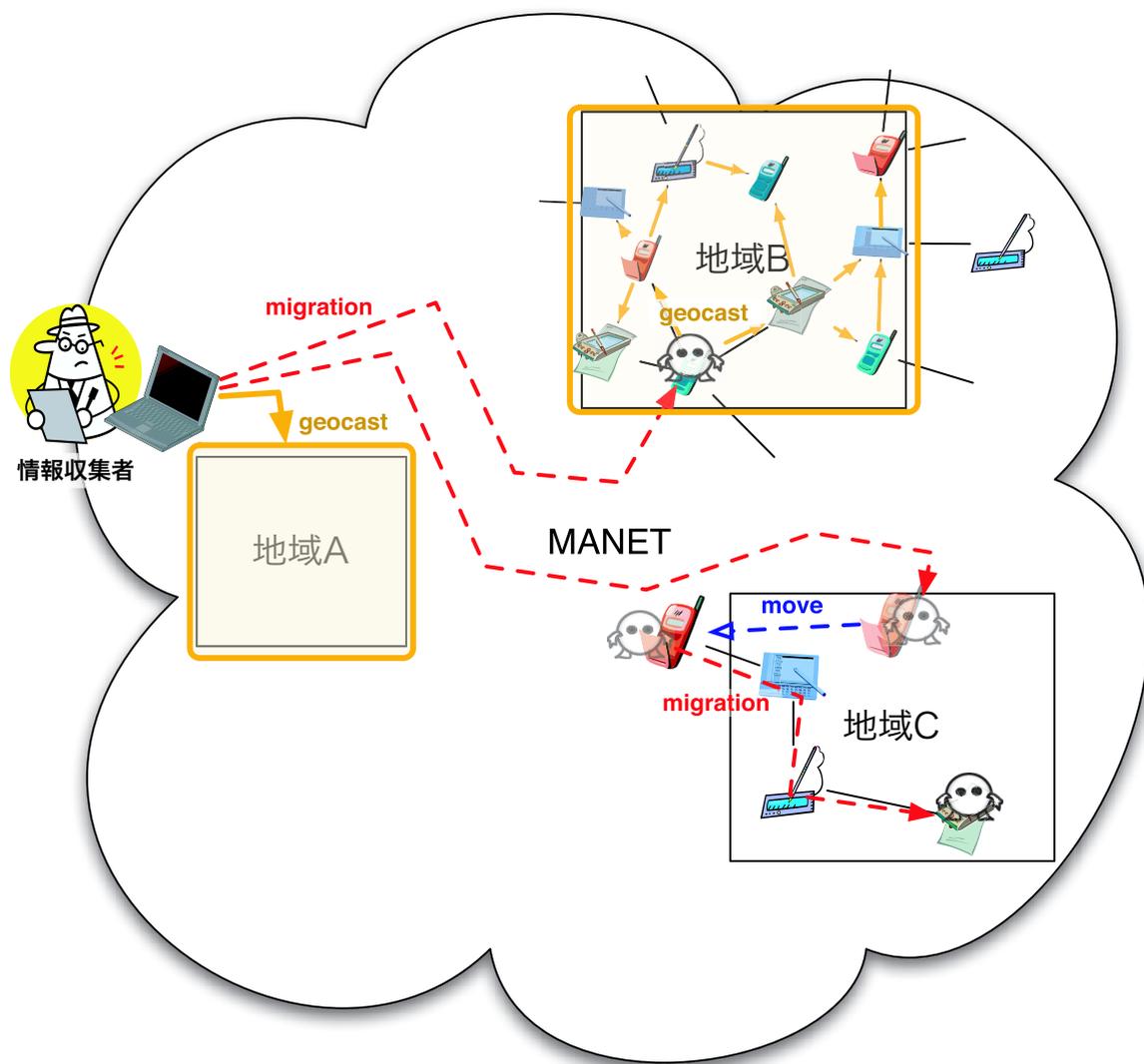


図 6: 概要図

- 各ノードはモバイルエージェント実行環境を持ち、モバイルエージェントの受け入れ、実行が可能である

このような機能を持つ携帯端末を用いて構成された MANET が広域にわたって設置されているものとする。災害救助者は、MANET に接続し、特定の地域に存在する被災者の持つ携帯端末から情報を収集する。災害救助者は特定地域ごとに情報を収集するものとする。近い地域の場合は、通常の LBM を用いて情報収集を行い、遠い地域の場合は、モバイルエージェントで作成された情報収集プログラムをその地域まで派遣し、なるべく近距離で LBM を用いて情報収集をさせる。図 6 では、地域 A、地域 B、地域 C の 3 地域の情報を収集している。地域 A は情報収集者に距離的に近いため、LBM を用いて情報収集を行う。地域 B、地域 C は情報収集者から距離的に遠いため、単純に LBM を用いる通信方法では、消費資源量が大きくなる。モバイルエージェントを各地域に派遣し、近距離で LBM を用いた情報収集を行うことで、省資源な情報収集を行っている。このように、情報収集地域の距離ごとにモバイルエージェントを使い分けることで、各ノードのバッテリーを無駄に消費することなく情報収集が行える。

しかし、携帯端末で構築されている MANET において、このようにモバイルエージェントを利用する場合、別の問題が生じてくる。すなわち、ノードの物理的移動によって、モバイルエージェント派遣後にモバイルエージェントと情報収集地域間の距離が離れていく可能性がある。一旦派遣したあとは処理を終えるまで移動しない、従来のモバイルエージェントでは、ノードの物理的移動に対応できず、時間経過とともに省資源な情報交換ができなくなる。クライアントサーバアプリケーションにおけるモバイルエージェントの利用法とは異なり、モバイルエージェントを派遣したあとでも、ノードの物理的移動などに応じて、なるべく情報提供者と物理距離的に近いノードに移動する必要がある。図 6 において、地域 C に派遣されたモバイルエージェントは、滞在しているノードの物理的移動により、指定地域外に位置するようになった。そのため、地域内のノードに再移動し、常に情報提供者の近くにとどまり、近距離通信で情報収集を行っている。

本論文では、モバイルエージェントをある指定された地域にとどまり続けさせるための手法を提案する。このようなモバイルエージェントを Geographically Bound Mobile Agent(GBMA) と名付ける。GBMA の詳細を次節で述べる。

4.3 Geographically Bound Mobile Agent

Geographically bound mobile agent(GBMA) は、MANET 上で動作する、指定地域にとどまり続けるよう動作するモバイルエージェントである。指定地域内にとどまり続ける目的は次の 2 点である。

省資源な情報収集

情報を収集したい地域を GBMA の滞在地域に指定し、GBMA は情報収集を行う地域内のノードにとどまり続けるよう移動する。そのため、情報収集のために地域内のノードと頻繁に通信しても、近距離で通信しているため、省資源で情報収集が行える。

情報通知先の指定

情報提供者から定期的に情報通知を受ける場合、情報提供者は、情報通知先を知る必要がある。インターネットにおいては、通知先の IP を知ることで、容易に情報通知が行えるが、MANET においては、インターネットにおける IP のような、有効な通知先指定方法はない。geocast における geocast region を通知先として指定することも興味深いが、ノードの移動により、情報購読者が geocast region 外へ移動してしまう問題がある。この問題は、指定地域内にとどまり続ける GBMA を用いることで解決可能である。GBMA を情報購読者とし、GBMA の滞在地域を情報通知先として指定することで、情報通知者は geocast を用いて定期的な情報通知が行うことができる。

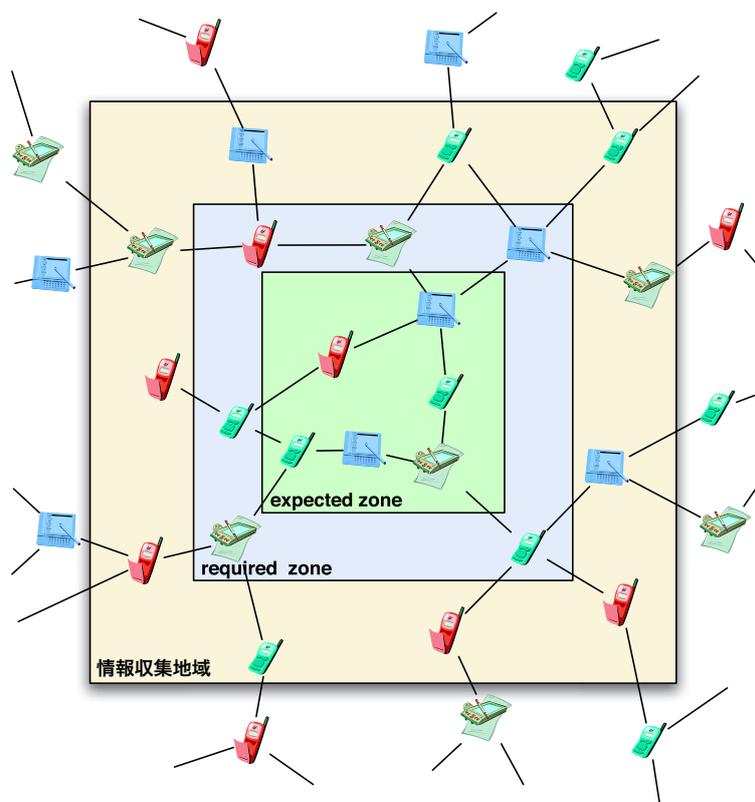


図 7: required zone と expected zone

GBMA では、滞在地域や移動のタイミングを決定するために次の 2 種類の地域が設定される (図 7)。

required zone

情報収集者と提供者の間で合意がとれている GBMA の滞在地域である。2 次元平面上における四角形で表す。GBMA が情報収集を行う地域の中心地域を設定する。

exected zone

required zone の中心地域であり、2 次元平面上における四角形で表される。exected zone は必ず required zone に含まれていなければならない。

GBMA は required zone 内に常にとどまることが求められる。この要求を満たすことで、情報提供者は、required zone を geocast region として geocast することで GBMA に情報通知することができる。

exected zone 内にあるノードは、required zone 内に長時間とどまり続けるノードと見なされる。GBMA が exected zone 内に位置するノードに滞在する間は、移動を行わず情報収集を続ける。GBMA が滞在するノードが exected zone の外に出ると、GBMA は移動先の検索を開始する。GBMA は exected zone 内に geocast し exected zone 内に位置するノード情報を集め、exected zone の中心に最も近いノードを移動先として選択し移動する (図 8)。

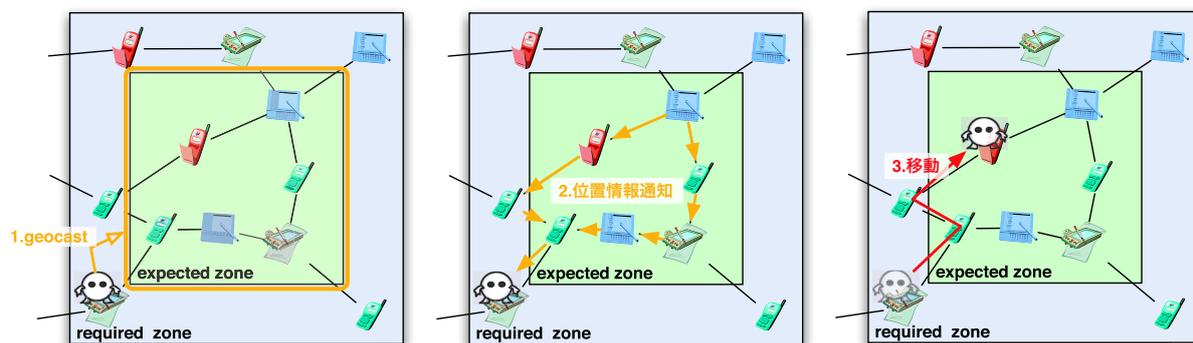


図 8: GBMA の移動

exected zone を定義した目的は次の 2 点である。

- 移動開始決定から移動までにかかるタイムラグの考慮
- 移動を開始するタイミングの明確化

GBMA が移動開始を決定してから、実際に移動を開始するまでにはタイムラグが発生する。タイムラグの主な要因は、移動先ノードの検索、決定が挙げられる。required zone 外に滞在ノードが移動してから、GBMA が移動を決定した場合、geocast による移動先ノード検索にかかる時間だけ、GBMA は required zone 外に存在することとなる。この間に情報提供者から送られてきた通知情報は、全て GBMA に届かない。GBMA は、required zone 内に常に滞在することが求められているため、GBMA が滞在するホストが required zone 外に移動する前に、移動先ノードを検索し、移動する必要がある。expected zone の大きさを適度に設定することで、移動開始決定後にノード検索にかかるタイムラグが発生しても、移動元ノードが required zone 外に移動する前に目的ノードへ移動することができる。また、expected zone 移動開始を決定するタイミングも、滞在ノードが expected zone 外に出たら移動開始を決定する、と明確化することができる。

GBMA の動作詳細

災害救助者は、情報を収集したい地域を決定する。情報収集プログラムは GBMA を用いて作成されている。

災害救助者が情報収集地域内に存在する場合は、GBMA は移動を行わず、災害救助者の端末上から収集地域内へ LBM を用いた geocast を行う。geocast メッセージの geocast region には収集地域が設定される。具体的には、geocast region を表す 2 次元平面の四角形を構成する最小座標 (x_{min}, y_{min}) と最大座標 (x_{max}, y_{max}) が記載される。この場合、送信者が geocast region に含まれているため、この geocast メッセージの forwarding zone の座標は、geocast region と同じ座標が設定される。さらに geocast メッセージには災害救助者が存在する地域が記載されている。この地域は返信用に用いられる。災害救助者の現在地を中心点とする四角形として設定する。geocast メッセージ受信者は、災害救助者に、定期的に安否情報や必要物資情報を通知する。通知は、LAR を用いたユニキャストで行われる。このメッセージの geocast region には、先に受信した geocast メッセージに記載された災害救助者の存在地域が設定される。このような手順で情報収集を行う。

災害救助者と情報収集地域が離れている場合は、GBMA は収集地域内に移動を行ってから情報収集を行う。GBMA の移動は次のような手順で行われる。まず、GBMA が情報収集中に滞在するべき required zone を設定する。required zone は情報収集地域の中心部に設定する。また、required zone を基に expected zone を設定する。required zone と expected zone は、各々、前述の geocast region と同様に 2 座標で表す。移動開始を決定した GBMA は、設定された expected zone を geocast region として LBM geocast を行い、expected zone 内に存在するノード情報を集める。この geocast メッセージを受け取った expected zone 内のノードは、現在位置などの情報を LAR ユニキャストを用いて、災害救助者のノードに返信する。GBMA は一定期間メッセージを待ち、返信があったノード

から、最も expected zone の中心座標に近い場所に位置するノードを、移動先ノードとして選択する。次に GBMA は、LAR ユニキャストを用いて、選択されたノードに移動する。移動のための LAR メッセージには、GBMA のコードとデータが添付されており、目的ノードのモバイルエージェント実行環境によって再活性化される。目的ノードに移動した GBMA は、前述した移動しない場合とほぼ同様な手順で情報収集を開始する。ただ一つ違うのは、各ノードの通知先を、災害救助者の滞在地域ではなく、GBMA の required zone に設定する点である。

情報収集中に GBMA は定期的に滞在するノードの現在地を取得する。滞在ホストが required zone 外に移動した場合、GBMA は移動先ノードの検索を開始する。具体的には、expected zone 内に LBM geocast をして、現在 expected zone 内に位置するノード情報を集める。この geocast メッセージを受信した expected zone 内のノードは、現在地情報を LAR ユニキャストで返信する。このとき、geocast zone には GBMA の required zone を設定する。GBMA は一定時間メッセージを待ったあと、集まったノード情報を基に、最も expected zone の中心座標に近いノードを移動先として選択し、移動する。このような動作を情報収集中に行うことによって、GBMA は常に required zone 内にとどまることが可能となる。

expected zone の設定

expected zone を大きく設定しすぎると、ノード検索にかかるタイムラグの間に滞在ノードが required zone 外に移動してしまう可能性がある。また逆に、expected zone を小さく設定しすぎると、必要以上に移動回数が増え、GBMA の活動停止時間が長くなる。そのため、通知メッセージがエージェントの転送時間中に届く可能性も高くなり、受け取れないメッセージ数が増加することが考えられる。また、移動にかかる総メッセージ量が増加し、expected zone 内の端末資源を大量に消費する可能性がある。

expected zone の大きさに関しては、MANET における単位面積あたりの端末密度や、端末の移動速度などによってなんらかの最適値があるものと思われる。expected zone の最適な大きさに関しては 5 章で評価を行う。

expected zone の導入によって、移動先決定にかかるタイムラグを考慮した、移動開始タイミングを決定することができた。しかし、モバイルエージェントの移動中に通知メッセージが届くことにより、メッセージを受信できない場合がある。通常モバイルエージェントは移動開始から移動終了して活動再開するまでに活動停止時間が存在する。これは GBMA の場合でも同様である。GBMA では、滞在ノードの物理的移動により、移動を行うため、通常のモバイルエージェントより移動の回数が増加する。このため、移動による GBMA の活動停止時間に送られてくる通知メッセージの数も多くなり、情報収集能力が低下することが予想される。1 回の移動にかかる GBMA の活動停止時間をなるべく小さく

くすることでこの問題に対処する必要がある。モバイルエージェントの移動時間を短縮する手法を次節で述べる。

4.4 サービスリレー

本節では、活動停止時間を短縮したモバイルエージェント移動手法であるサービスリレー [12][13] について説明する。サービスリレーを用いることで、通常のモバイルエージェント移動と比較して、短い活動停止時間で移動を行うことができる。

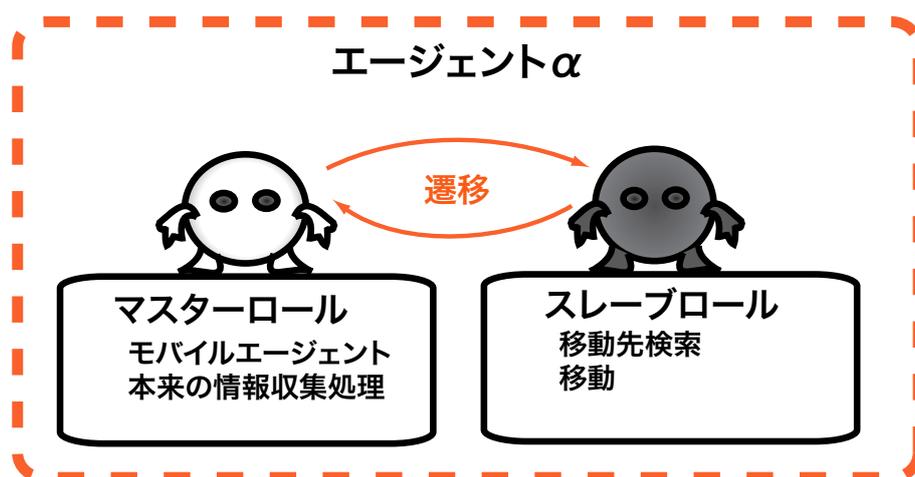


図 9: サービスリレー対応エージェントのロール

マスターロールとスレーブロール

サービスリレー対応モバイルエージェントは、1つのモバイルエージェントを2つの複製を用いて構成する。各複製はマスターロール、スレーブロールという2つのロールを持ち、そのときの役割に応じて排他的にどちらかのロールとなっている(図9)。以降、マスターロールとなっている複製をマスターエージェント、スレーブロールとなっているものをスレーブエージェントと呼ぶ。

マスターエージェントは、GBMA 本来の処理である、特定地域の情報収集処理を行う。しかし、マスターエージェントは直接移動を行わない。一方、スレーブエージェントは、GBMA の移動先を確保する処理を行う。スレーブエージェントは、expected zone 内のノードから LBM を用いてノードの位置情報や移動情報を定期的収集し、より長い時間 expected zone 内に滞在するノードを探し、移動する。ここでは単純に、最も expected zone の中心部に位置するノードに移動するものとする。マスターエージェントは、定期的に滞在するノードの位置情報を取得する、滞在ノードが expected zone 外に移動したこ

とを確認すると、expected zone を geocast region として LBM を用いてスレーブエージェントを発見し、サービスリレーを開始する。

サービスリレー

サービスリレーとは、GBMA の移動を表す処理であり、マスターエージェントとスレーブエージェント間で以下のような処理を行うことで実現される。(図 10)。

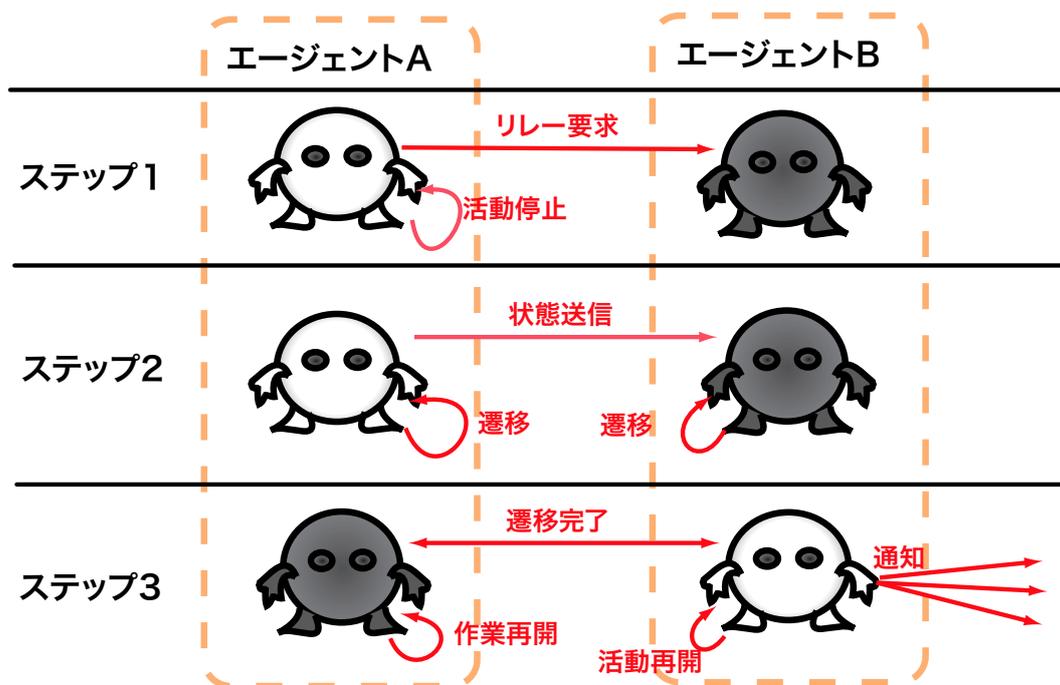


図 10: サービスリレー

1. マスターエージェントはスレーブエージェントにリレー開始メッセージを行い、マスターエージェントは GBMA としての活動を中断する
2. マスターエージェントは GBMA の処理状態をスレーブエージェントに送信し、両エージェントは、マスターロールならスレーブロールに、スレーブロールならマスターロールに遷移する
3. 新しいマスターエージェントは受信した処理状態を基に GBMA としての処理を再開する

サービスリレーを行うことで GBMA は expected zone 内のノードに移動される。

サービスリレーによる移動遅延の低減

一般に、移動先が決定したあと、モバイルエージェントの移動は次のような手順で行われる。

- モバイルエージェントの不活性化
- 移動先ノードへエージェントのコードとデータを転送
- 受信したコードとデータを用いてモバイルエージェントを再活性化

これらの処理の間、モバイルエージェントは完全に停止している。モバイルエージェント移動方式の場合、これらの行動がサービス遅延の原因となる (図 11)。

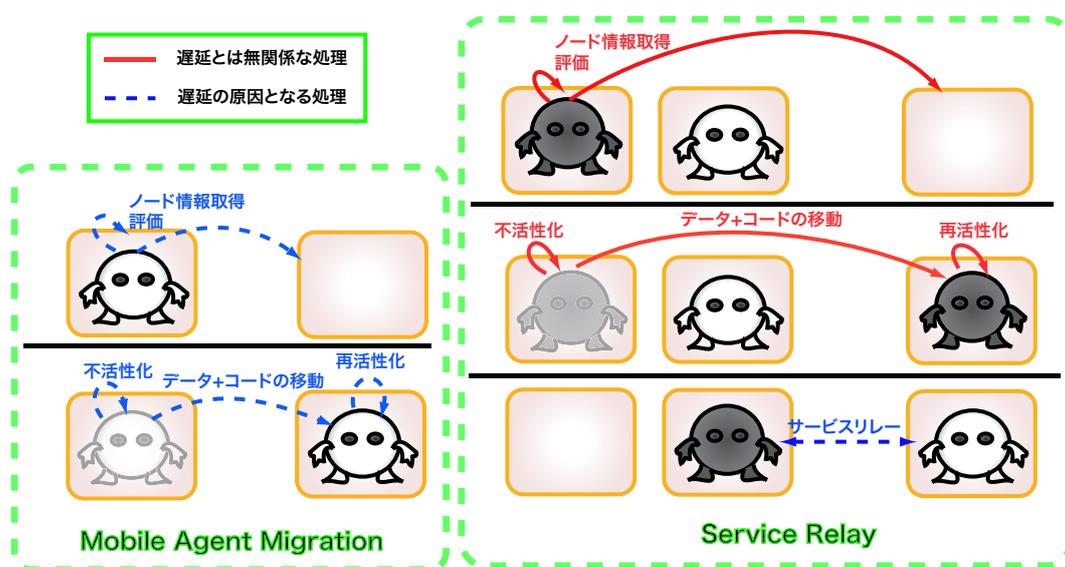


図 11: 遅延の原因

サービスリレー処理時間の大部分は、GBMA の処理に関連する状態の同期によって占められる。よって、単体モバイルエージェントの移動におけるデータとコードの移動より、生じる遅延は小さい (図 11)[12][13]。さらに、単体モバイルエージェントの移動の場合は、定期的なノード情報の取得、評価、移動時の不活性化、再活性化など多数の遅延を引き起こす原因をもつ。

サービスリレーのその他の利点

サービスリレーの利点は、移動遅延の低減以外にも次のような利点がある。

- モバイルエージェントが滞在するノードの負荷軽減

- 移動先決定時間の隠蔽
- モバイルエージェントのタスク処理と移動先検索処理の明確な実装の分離

サービスリレー方式では、モバイルエージェントのタスク実行と移動先検索は、マスターエージェントとスレーブエージェントという別々のエージェントに割り当てられている。マスターエージェントとスレーブエージェントは別々のノードでそれぞれの処理を行っているため、移動先検索処理にかかる CPU 帯域、ネットワーク帯域負荷を、タスク実行を行うノードにかけずにすむ。よって、タスク実行が行われるノードの資源消費量のみを重点的に消費することなく、資源消費量を分散することができる。

また、従来のモバイルエージェント移動方式では、移動先ノードを決定にかかる時間が長くなることにより、移動開始の決定から実際に移動するまでにかかる時間が長くなる。このため、expected zone を小さく設定しなければならない。しかし、expected zone を小さく設定すると、移動の回数が多くなってしまい、タスク実行に悪影響を及ぼす。移動先決定にかかる時間はなるべく短くすることが求められる。そのため、従来のモバイルエージェント方式では、移動先決定のために取得するデータ量は少なく、簡単な予測を持って移動する方式をとった方がよい。実際に本論文でも、移動先決定のために取得するデータは各ノードの位置情報のみであり、expected zone の中心座標に最も近いノードを移動先として選択している。しかし、実際にはノードの移動速度や、予想移動ルートなどの詳細な情報を基に、最も長い時間 expected zone にとどまるノードを選択した方が、GBMA の移動回数を少なくすることができることが予想される。サービスリレー方式では、マスターエージェントがタスク処理を行っている間に、別のノードでスレーブエージェントが GBMA の移動先を予め検索している。このため、マスターエージェントが移動先を決定した時点で、最適な移動先は詳細な情報を用いて既に決定されており、最適なノードに移動することができる。従って、詳細な情報を用いたときの問題点となる、移動先決定時間を隠蔽することができる。

また、タスク実行処理と移動先検索処理はモバイルエージェントのマスターロールとスレーブロールという別々のロールとして実装される。従来の移動方式を用いたモバイルエージェントでは、タスク処理と移動先検索処理が入り交じった実装になりがちである。サービスリレー方式を用いたモバイルエージェントでは、2つの処理を明確に切り分けた実装を行うことが可能となる。

5 評価と考察

本章では、本手法の有効性を評価し考察を行う。

5.1 シミュレータの実装

本論文では、MANET用のシミュレータ上に本手法を適用した情報収集アプリケーションを作成し、評価を行った。シミュレータには JiST/SWANS[14] を用いた。

JiST/SWANS

Java in Simulation Time(JiST)[14] は Java 仮想マシン上で動作する高性能な離散系イベントシミュレータである。Scalable Wireless Ad-hoc Network Simulator(SWANS) は JiST 上に実装された MANET 用シミュレータである。ns-2[15] や GloMoSim[16] といった他のシミュレータと比較し、スケーラブルであり、大規模な MANET がシミュレートできる。また、SWANS はバイトコードレベルの編集機能を持ち、Java で作成されたネットワークアプリケーションを、ソースコードを変更することなく、SWANS 上で実行可能なプログラムに変更することができる。モバイルエージェントシステムは主に Java で構成されているため、モバイルエージェントアプリケーションを扱う本手法を評価するシミュレータとしては Java で作成されたプログラムを実行可能なシミュレータが好ましい。以上のような理由から、本論文では評価用のシミュレータとして JiST/SWANS を採用した。

SWANS では AODV や ZRP といった基本的なルーティングプロトコルは実装されているが、geocast 用のルーティングプロトコルはサポートされていない。そこで、著者は SWANS 上で LAR と LBM を実装した。さらに、SWANS 上でモバイルエージェントシステムを作成し、GBMA を作成し評価を行った。

5.2 通信メッセージ量の評価

本節では、モバイルエージェントを用いることで、単純に geocast をした場合より、メッセージ量が低減できるかどうかを評価する。その際に、端末がどれくらい密集しているかを表す面積あたりの端末密度や、災害救助者と情報収集地域間の距離がメッセージ量に対してどのような影響を及ぼすのかを調べる。

実験環境

座標 (0,0) から (1000,1000) で表される面積 1000^2m^2 の四角い空間に n 個の携帯端末が一様に分布している。各々の端末は IEEE802.11b 準拠の無線通信機能を持ち、半径約 $80m$

に存在する携帯端末と直接通信を行うことができる。これらの端末の直接通信を用いて MANET が構成されている。この実験において端末は移動しない。情報収集地域は座標 (600,600) から (800,800) で表される四角形で定義する。災害救助者の携帯端末は (x,x) に位置しているものとする。実験は x が 600、500、400、300、200、100 の場合で行った。 x の値が大きいほど、災害救助者と情報収集地域間の距離が短いことを表し、 x の値が小さいほど、長くなる。端末数 n が 12^2 、 14^2 の場合で実験を行った。

GBMA が、災害救助者の端末上から移動せずに情報収集した場合と、情報収集地域内に移動してから情報収集をした場合とで、総送信メッセージ数、総受信メッセージ数、総送信データ量、総受信データ量をそれぞれ測定した。GBMA が送信する geocast メッセージは、geocast region を情報収集地域 (600,600)、(800,800) に設定されている。メッセージを受信したノードは、GBMA の現在地を中心に一辺の長さが 40m の四角形を geocast region として LAR ユニキャストで返信する。具体的には、geocast region は $(x-20,x-20)$ 、 $(x+20,x+20)$ の 2 座標で作られる四角形で表される。GBMA は 10 秒間隔で 10 回情報収集のための geocast メッセージを送信するものとする。同じ設定で 20 回シミュレーションを実行しその平均を取った。実験結果を表 12、表 13、表 14、表 15 に示す。

結果と考察

災害救助者の端末上から通常の geocast で検索を行った場合の結果は破線で、GBMA を情報収集地域に派遣してから検索を行った場合の結果は実線で表されている。

各表より、通常の geocast 検索の場合は、情報収集地域までの距離が離れるに従って、指数関数的に通信量が増大していることが分かる。通常の geocast 方式の場合、情報収集地域から離れるに従って、情報収集のための geocast メッセージに設定される forwarding zone の大きさが、距離に対して 2 乗のオーダで増加しているためである。そのため、メッセージを転送するノード数も 2 乗のオーダで増加する。

GBMA を用いた場合では、距離に対して線形的に通信量が増加していることが分かる。GBMA 方式の場合、GBMA を情報収集地域に派遣してから情報収集を行うため、情報収集地域までの距離に影響を受けるのは、はじめの GBMA を派遣するとき 1 回のみである。情報収集のために行われる多数のメッセージ交換は、情報地域内で行われるため、生じるメッセージ量は、情報収集地域までの距離に依存しない。そのため、従来の geocast 方式と比べて、距離に対してのメッセージ増加量が抑えられる。

また、両方式とも、端末密度が高くなることで通信量が増大している。これは、災害救助者の端末と情報収集地域間で行われる geocast メッセージの forwarding zone に含まれている端末数が増加するためである。このため、メッセージのフォワード回数が増え、結果として総通信量が増加する。特に、災害救助者の端末と情報収集地域間で多くのメッセージ交換を行う geocast 方式では、大きくメッセージ量が増加している。

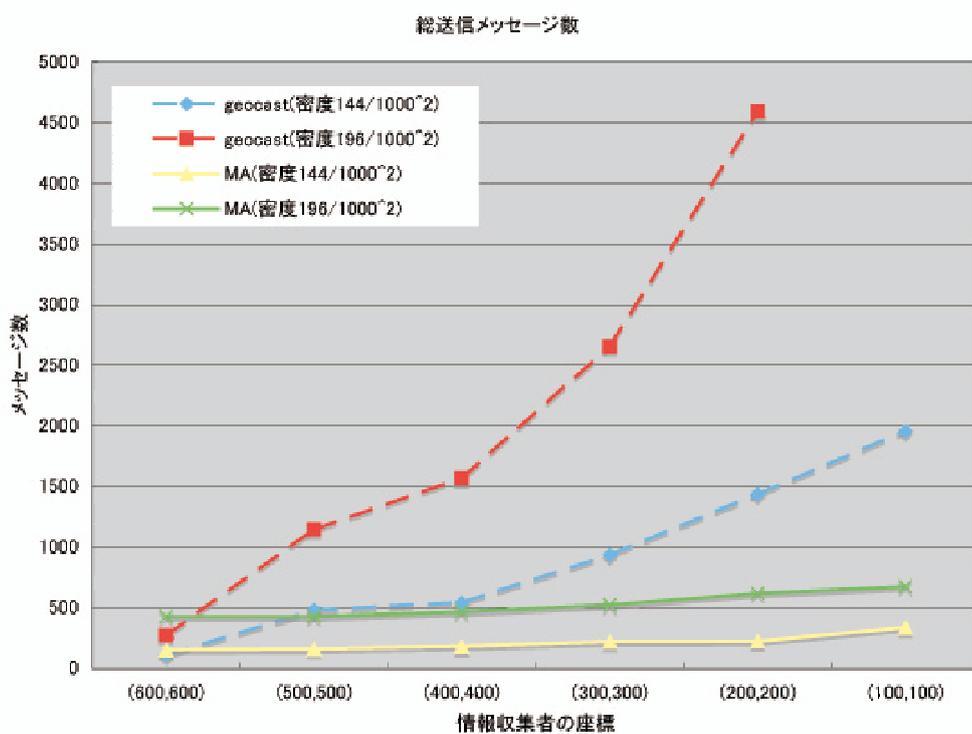


図 12: 総送信メッセージ数

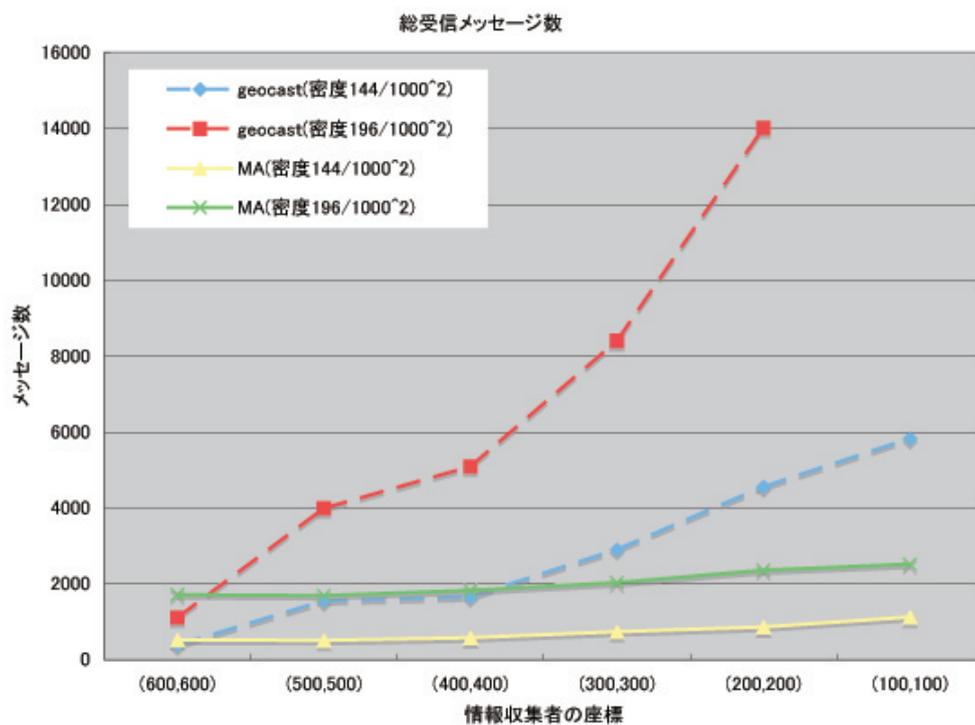


図 13: 総受信メッセージ数

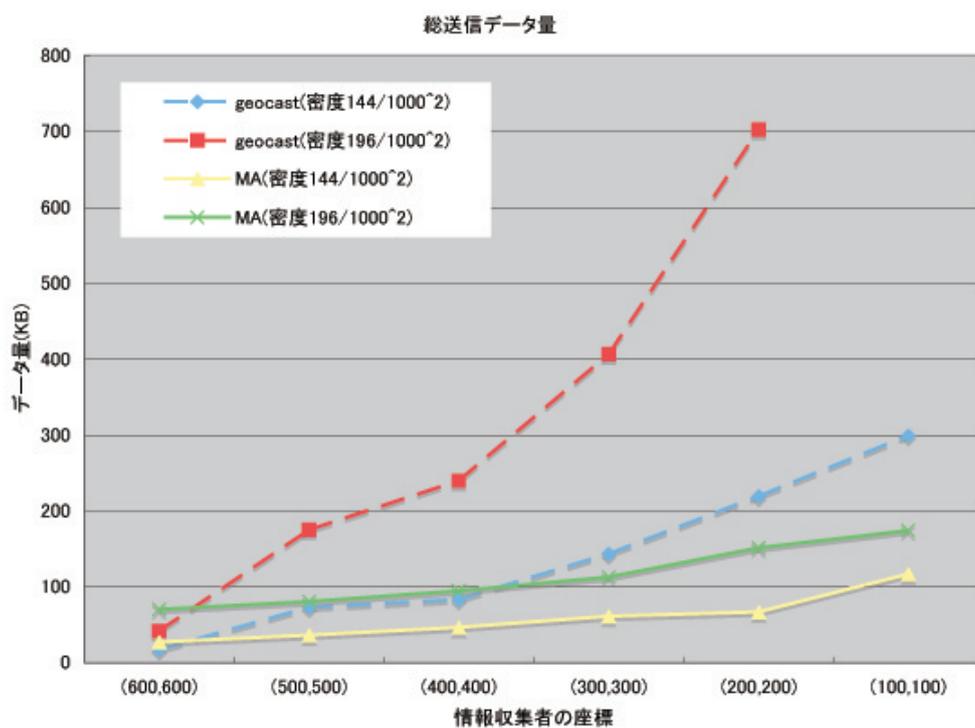


図 14: 総送信データ量

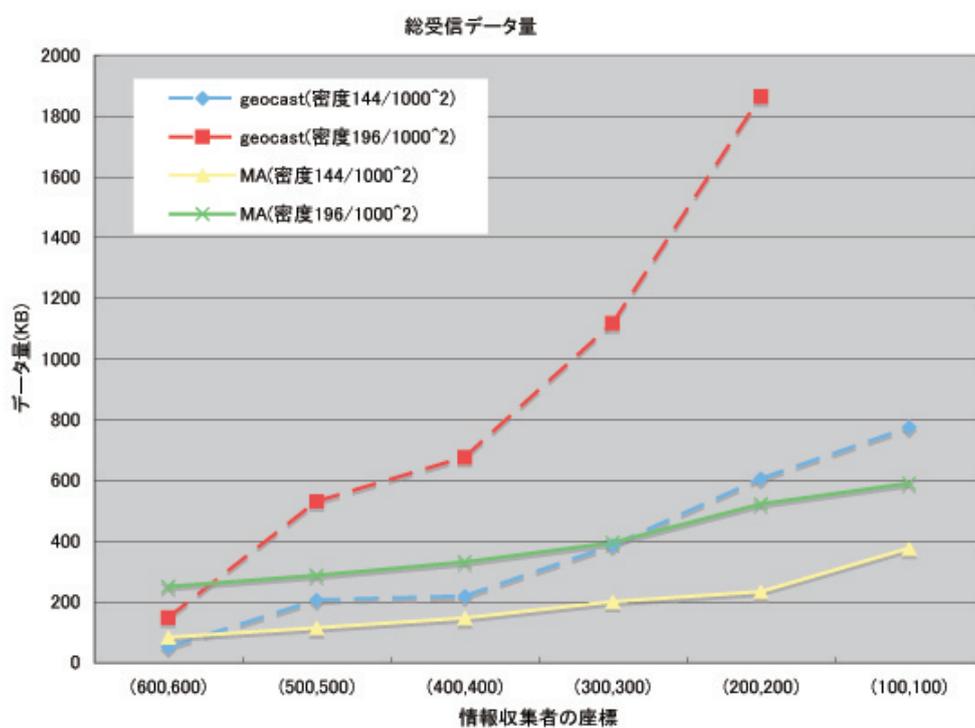


図 15: 総受信データ量

災害救助者の端末が (600,600)、つまり情報収集地域内に位置している場合、GBMA を情報収集地域の中心ノードに派遣する処理にかかるメッセージ量だけ、GBMA 方式の方がメッセージ量が増えている。しかし、距離が離れるに従って、GBMA を用いた方がメッセージ量が低減できている。例えば、災害救助者の端末が (200,200) に位置し、端末数が 196 のとき、GBMA 方式で生じた送信メッセージ数は、geocast 方式で生じた送信メッセージ数の約 9 分の 1 まで低減できている。

この実験によって、情報収集者が、情報収集地域内に位置している場合は単純に geocast を用いて情報収集し、情報収集地域が離れている場合は GBMA を用いて情報収集をする、本手法の有効性が確認できた。メッセージ量を低減できたことで、消費資源量も低減できることが期待される。

5.3 expected zone の最適値

本節では、expected zone の最適値に関する調査を行う。GBMA は expected zone を基に移動開始のタイミングや移動先を決定している。そのため、expected zone の大きさによって、GBMA の移動頻度が変化する。よって、expected zone の大きさによって、GBMA へのメッセージ到達率や通信メッセージ量に変化するものと思われる。今回は、通知メッセージの到達率と通信メッセージ量を基準とし、expected zone の最適値を評価する。

実験環境

1000^2m^2 の空間に 15² の端末が一様に分布している。情報収集地域は 200^2m^2 の大きさとして定義されている。GBMA は初期状態として情報収集地域の中心に位置するノード上に存在している。GBMA は情報収集地域内に LBM geocast して情報収集を開始する。geocast メッセージを受け取った情報収集地域内のノードは、約 1 分ごとに計 20 回、必要物資情報を GBMA に LAR ユニキャストで通知する。LAR ユニキャストの geocast region は GBMA の required zone が設定される。GBMA の required zone は、情報収集地域と同じ地域が設定される。つまり、required zone も 200^2m^2 の大きさとして定義される。expected zone はそれぞれ 200^2m^2 、 180^2m^2 、 160^2m^2 、 140^2m^2 、 120^2m^2 、 100^2m^2 、 80^2m^2 のサイズで実験を行った。また、各端末は移動をする。移動モデルには Random Walk[17] を用いる。各端末が 10 秒に 10m 移動する場合と 10 秒に 20m 移動する場合とで実験を行った。このとき、一旦移動したら情報収集のみを行う従来型 MA 方式と、移動後も端末の位置に応じて再移動を行いながら情報収集を行う GBMA とで、メッセージ到達率と総送信データ量を比較した。メッセージ到達率とは、送信された情報通知メッセージのうち何割が GBMA に受信されたかを表す値である。実験結果を表 16、表 17、表 18、表 19 に示す。

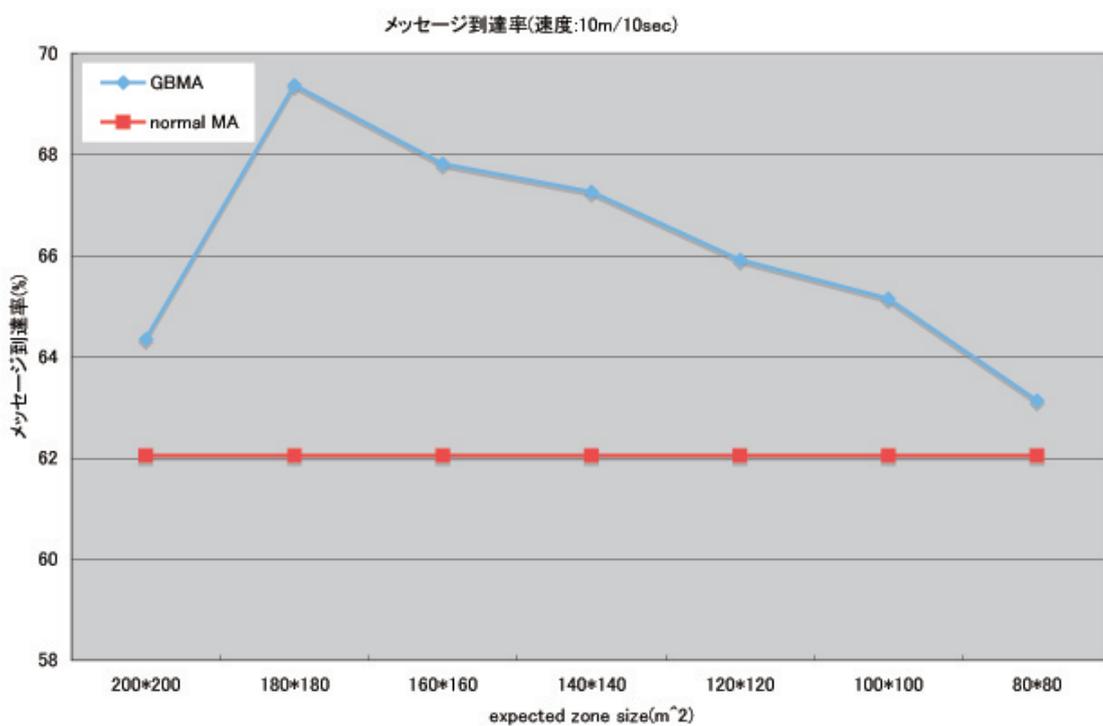


図 16: メッセージ到達率 (速度:10m/10sec)

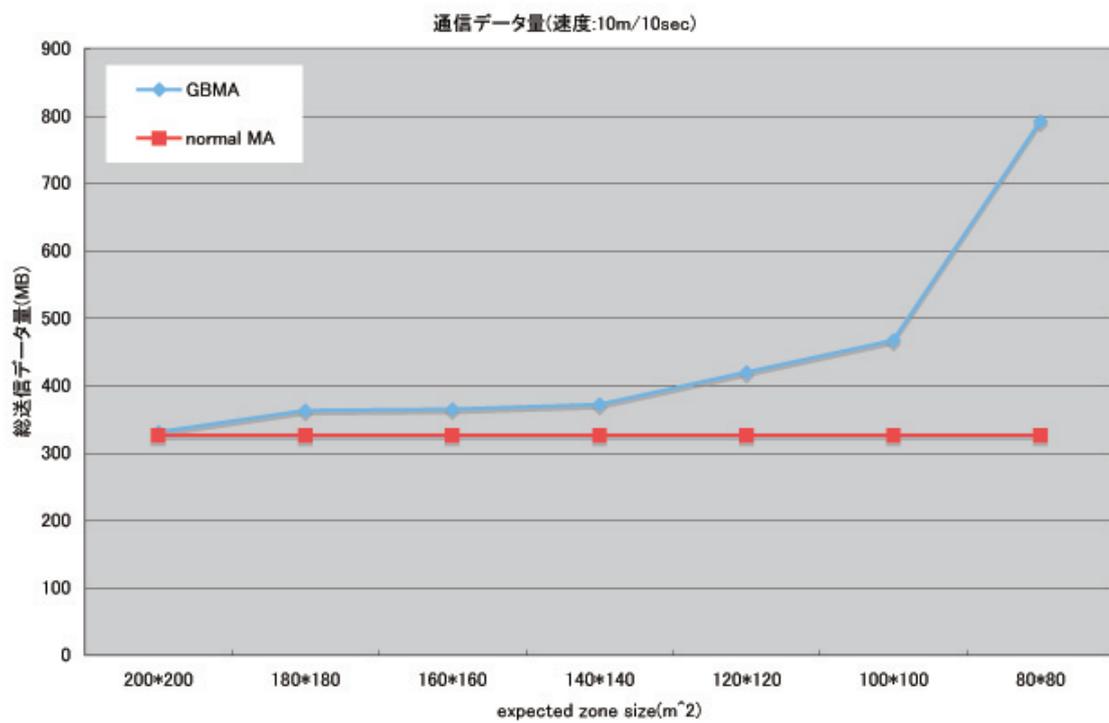


図 17: 総送信データ量 (速度:10m/10sec)

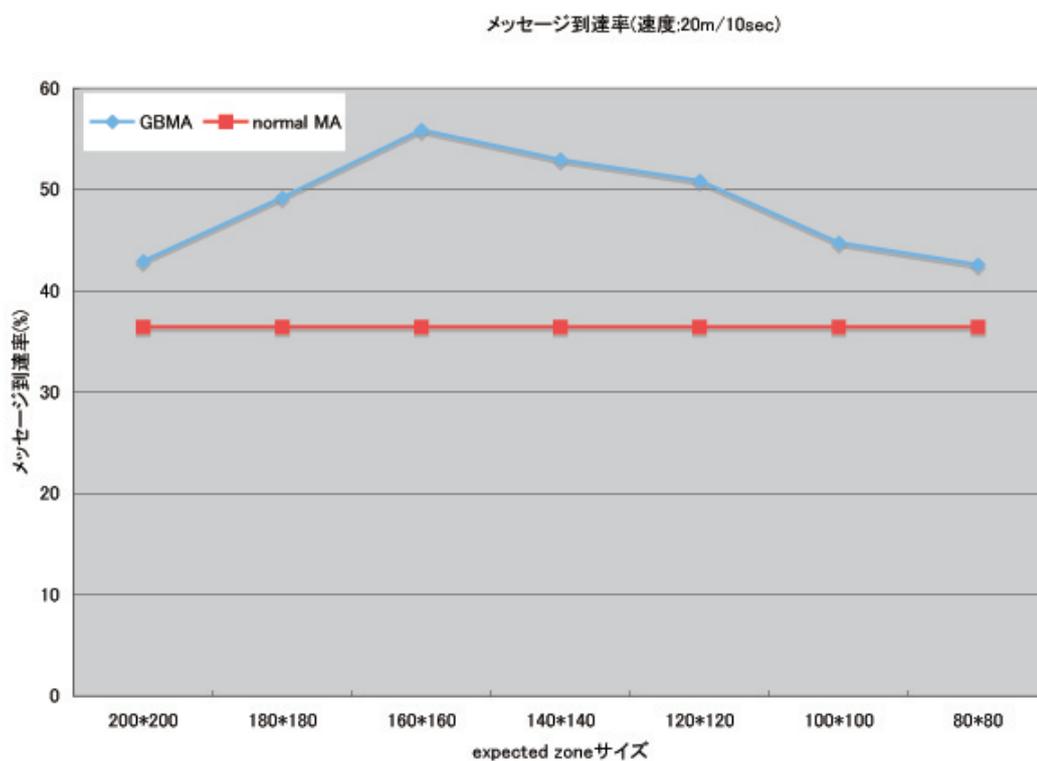


図 18: メッセージ到達率 (速度:20m/10sec)

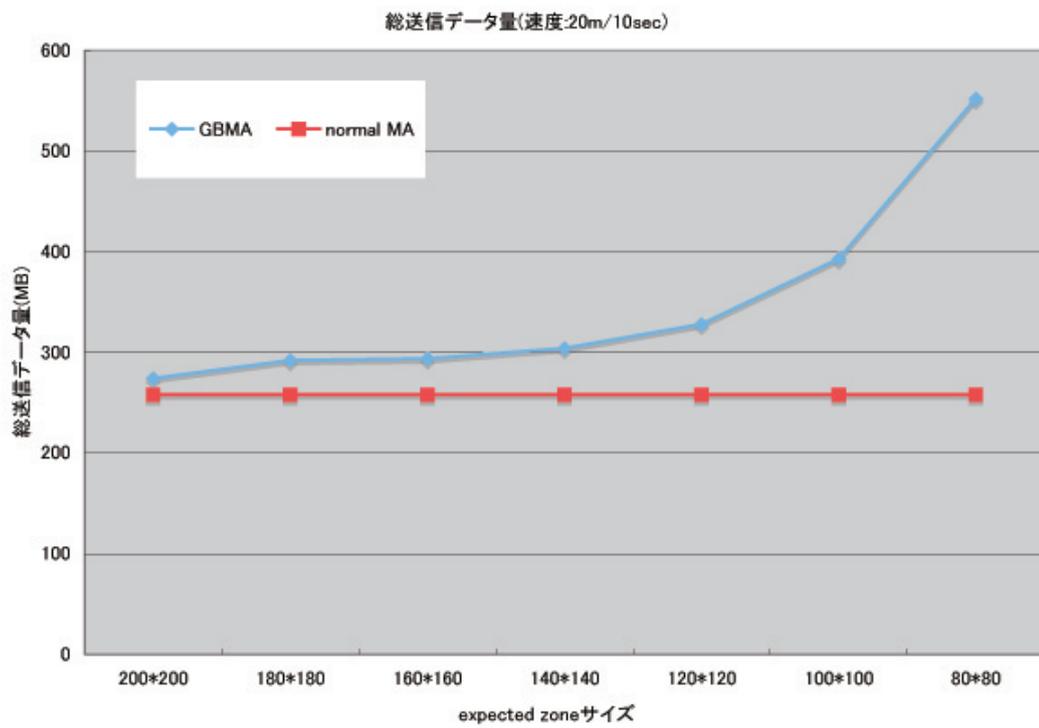


図 19: 総送信データ量 (速度:20m/10sec)

結果と考察

各実験結果において、青い線が GBMA を用いて適宜移動しながら情報収集した場合の結果を示し、赤い線が通常のモバイルエージェント方式を用いて情報収集地域について移動を行わず情報収集した場合の結果を示している。通常のモバイルエージェント方式の場合、expected zone は設定されないため、expected zone の大きさに結果は依存しない。

表 16、表 18 は、メッセージ到達率を表したグラフである。GBMA 方式の方がメッセージ到達率が常に高いことが分かる。これは、情報収集中にモバイルエージェントが滞在する携帯端末が required zone 外に移動したにもかかわらず、端末間移動を行わなかったため、情報通知が受け取れなくなったことが原因であると考えられる。この結果によって、各端末が自由に移動する MANET において、情報提供者からのプッシュ型情報通知を受けられる場合、情報通知先を geocast region で示し、モバイルエージェントがその geocast region 内にとどまり続けるよう移動する本手法が有効なことが示された。

表 16 より、速度が 10m/10sec の場合 expected zone のサイズが 180^2m^2 のときに最もメッセージ到達率が高くなっているのが分かる。expected zone が大きく設定されすぎると、移動開始決定から移動開始までに required zone 外に移動してしまい、情報提供者からの情報通知が受け取れなくなるものと思われる。そのため expected zone サイズが、required zone と同じ 200^2m^2 の場合、 180^2m^2 の場合と比較し、メッセージ到達率が低くなっていることが分かる。逆に、expected zone が小さく設定されすぎると、移動回数が多くなり、移動による活動停止時間が増加し、情報通知が受信できない時間が長くなるものと思われる。実際に表 16 の結果においても expected zone サイズが 180^2m^2 より小さい場合、小さくなるに従ってメッセージ到達率も小さくなる傾向が見て取れる。

expected zone サイズの最適値は、次の 3 点に依存するものと思われる。

- required zone のサイズ
- 端末の移動速度
- 移動先検索にかかる時間

required zone の地域から expected zone の地域を除いた地域が、移動を行う地域であるため、required zone の大きさによっても expected zone の最適な大きさは変わる。また、端末の移動速度が速ければ、移動開始の決断を早めに行わなければならない。そのため、expected zone を小さめに設定した方がよいものと思われる。同様に、移動先検索にかかる時間が長い場合、移動開始の決断を早めに行わなければならない。移動先検索にかかる時間によっても expected zone の最適な大きさは変わるものと思われる。

本論文においては、required zone のサイズと移動先検索にかかる時間を固定し、端末の移動速度によって expected zone の最適値が変化することを実験によって確かめた。表

18 は、速度が 20m/10sec の場合のメッセージ到達率を表したグラフである。表 16 において最適な expected zone サイズが 180^2m^2 であったのに対し、表 18 においては、最適な expected zone サイズは 160^2m^2 である。これは各端末の移動速度が速くなったことにより、移動開始の決断を早めに行うことで、移動開始を行うまでに GBMA が required zone 外に移動することなく、移動開始までメッセージを受信できたためであると思われる。よって、端末速度によって expected zone の最適な大きさが変化することが分かった。

また、メッセージ到達率が 100% に達していないのは 2 つの原因があるものと思われる。一つは、移動による GBMA の活動停止中にメッセージが届くことにより、メッセージを受信できず達成率が低下しているものと思われる。また、端末が移動することにより、情報を通知する端末と GBMA が滞在する端末間の経路が失われてしまいメッセージが到達しないことが原因と思われる。

次に、表 17、表 19 を考える。これらは、総送信データ量を表したグラフである。表 17、表 19 より、GBMA 方式は、移動の回数が多くなる分、通常のモバイルエージェント方式より通信データ量が大きくなることが分かる。特に expected zone サイズが小さくなると、GBMA の移動回数が多くなる分、通信データ量の増加幅も大きくなっている。しかし、各速度における最適な expected zone サイズの場合、その増加幅はそれほど大きくなる。速度が 10m/10sec の場合、最適な expected zone サイズは 180^2m^2 であり、そのときの通信データ量は従来モバイルエージェント方式の約 11% 増加となっている。速度が 20m/10sec の場合、最適な expected zone サイズ 160^2m^2 のとき、約 14% の増加となっている。

この実験により、expected zone を適切な大きさに設定することにより、GBMA の情報収集処理が効率的に行えるようになることが確認できた。端末の移動速度が既知の場合は、予め最適な expected zone サイズを設定することが可能である。端末の移動速度が動的に変化するような環境においては、GBMA が滞在するノードの移動速度変化に合わせて、GBMA の expected zone サイズを動的に調整する必要があるものと思われる。expected zone サイズの動的調整は今後の課題としたい。

5.4 サービスリレー適用の効果

本節では、GBMA にサービスリレーを適用した成果を調査する。サービスリレーを用いることで、移動による活動停止時間が低減でき、GBMA へのメッセージ到達率が向上することが期待できる。

実験環境

前節の実験における、速度 20m/10sec と同様の環境において、通常のモバイルエージェント

ント移動方式を用いた GBMA とサービスリレー方式を用いた GBMA とでメッセージ到達率と総送信データ量を調査した。結果を表 20、表 21 に示す。

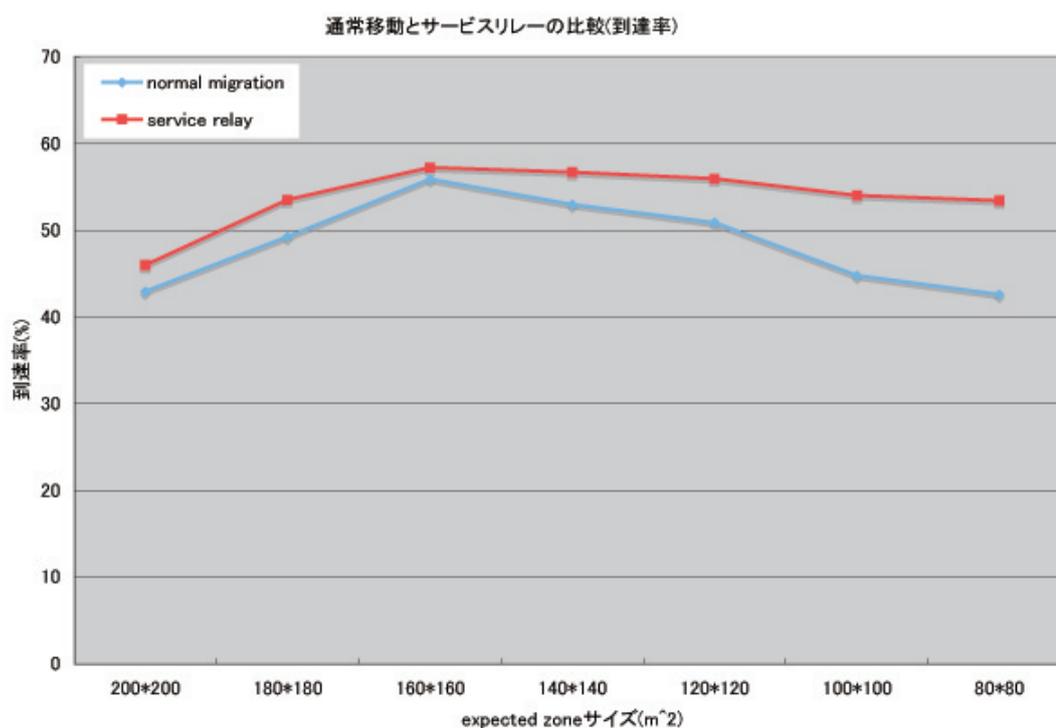


図 20: メッセージ到達率 (速度:20m/10sec)

結果と考察

表 20、表 21 において、青色の線が通常の移動方式を用いた場合の結果を表し、赤色の線がサービスリレー方式を用いた場合の結果を表している。

表 20 より、サービスリレー方式を用いた方が常にメッセージ到達率が良いことが分かる。expected zone サイズが最適値の 160^2m^2 の場合、メッセージ到達率の向上幅が最も小さくなる。expected zone を最適に設定すると、GBMA の移動回数が最少になるためだと

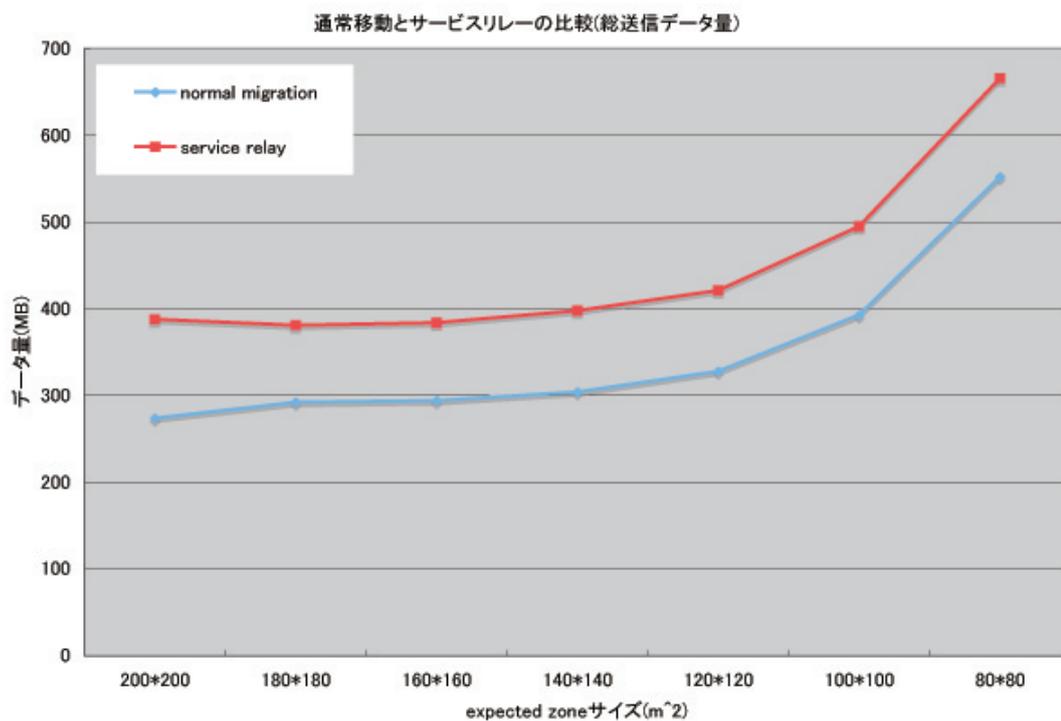


図 21: 総送信データ量 (速度:20m/10sec)

思われる。expected zone サイズが最適値より大きい場合、GBMA は移動開始の決断が遅れ、移動開始までに required zone 外に移動してしまう。この場合、サービスリレー方式の方が移動にかかる時間が短くなるため、required zone 外に位置する時間が短くなり、結果として通常の移動方式よりメッセージ到達率が向上しているものと思われる。expected zone サイズが最適値より小さい場合、GBMA は移動頻度が必要以上に高くなり、活動停止時間が長くなってしまふ。この場合、サービスリレー方式の方が1回の移動で生じる活動停止時間が短縮できるため、総活動停止時間が短縮され、結果として通常の移動方式よりメッセージ到達率が向上しているものと思われる。特に expected zone サイズが小さくなればなるほどその効果は顕著になる。

次に、表 21 の結果を考察する。表 21 より、サービスリレー方式の方が常に送信データ量が大きくなっている。サービスリレー方式では、サービスリレー時に送信されるデータ量は通常の移動方式より小さい。しかし、通常の移動方式では移動時にのみノード検索を行うのに対し、サービスリレー方式のスレーブエージェントは定期的にノードの検索を行っている。スレーブエージェントの検索頻度は GBMA の移動開始の決定頻度より高いため、サービスリレー方式の総送信データ量は大きくなってしまったものと思われる。

表 20、表 21 より、サービスリレー方式は expected zone サイズの最適値が未知の場合に有効であることが分かった。expected zone サイズの最適値が既知である場合、サービスリレーを用いることで向上するメッセージ到達率はわずかである。この場合、メリットがわずかであるのに対し、通常の移動方式より送信データサイズが大きくなってしまふため、サービスリレーの適用は不適切である。ノードの移動速度が均一でなかったり、動的に変化したりすることで、expected zone の最適値を一意に決定できない場合、サービスリレーは有効である。expected zone の最適値を設定できないことで、GBMA の移動回数や、required zone 外滞在時間は長くなる。このような環境においてサービスリレー方式を用いることでメッセージ到達率を向上することが可能となる。

本節の実験により、サービスリレーの適用が効果的な状況が特定できた。サービスリレー方式では、expected zone サイズが最適値からずれていても、メッセージ到達率の減少はわずかで抑えられる。expected zone の最適値が未知の場合などにおいて、サービスリレー方式の適用は効果的である。

5.5 本手法の適用分野に関する考察

本節では、シミュレータから得られて結果に基づき、本手法の適用可能分野の一般性や、本手法の限界に関して考察を行う。

5.5.1 適用分野の一般性

本論文では、被災地に設置された MANET において位置に特化した情報を収集するアプリケーションを想定し、GBMA を提案し、有効性を確認した。GBMA の適用が有効な状況は、MANET において次の 2 つの条件を満たす場合である。

- 情報収集者が情報収集地域外に位置する場合
- 情報収集者と情報収集地域間で多くのメッセージ交換を行う場合

この条件を満たす状況は、今回提案した被災地の例以外にも数多く存在する。GBMA の適用が有効な例を次に示す。

位置に特化した広告配信サービス

MANET は設置が容易で無料で使用できるネットワークとしての期待も高まっている。MANET では、人が密集している場所に向けての広告配信が容易に行える。例えば、駅前の待ち合わせ場所など人が密集する地域に対して、飲食店などがメニュー情報や空席情報、またはクーポンなどの広告を配信することで、有効な広告活動が行える。しかし、駅前の待ち合わせ場所は人の入れ替わりも激しく、効果的な広告活動を行うためには定期的に情報を配信する必要がある。しかも、店舗と駅が遠い場合、両者間の経路が失われることで広告配信が行えなくなってしまうかもしれない。このような状況に対して、広告を持った GBMA を駅前に移動させ定期的に情報配信させることで、効果的な広告配信が行うことができる。

車車間 MANET における渋滞情報収集

現在の VICS による渋滞情報収集は、渋滞情報をセンターサーバで収集し解析を行うため、情報の鮮度が古かったり、情報が粗粒度になってしまう。また、道路側で ITS 設備が整っている必要があり、行楽地などでは情報の収集自体が行えない。車車間で MANET を形成することで、細粒度で鮮度が高い渋滞情報を、ITS 設備が整っていない地域でも、交換することが可能となる。しかし、MANET では通信帯域が限られているため、情報収集に必要なメッセージ量は小さくしなければならない。また、各運転手が必要とする渋滞情報は、現在地周辺ではなく、予定走行経路上に位置する地域の情報である場合がある。GBMA を予定走行経路上の地域に派遣することで、メッセージ量を抑えた渋滞情報収集が行える。

MANET グリッド

MANET では各ノードの計算能力は、インターネット上のノードと比較した場合、高くない。MANET 上で、渋滞解析など、計算資源を必要とするサービスを実行し

ようとした場合、単体のノードでは処理実行は難しい。グリッド技術はこの問題に対する有効なソリューションとなるかもしれない。単体のノードではなく、複数のノードで分散して処理を行うことで、MANETにおいても高度に計算力を必要とするサービスを提供することが可能となる。トポロジが動的に変化する MANET 上でのグリッドでは、割り振られたタスクの実行結果をどのようにしてタスク分配者に返信するかが問題となる。タスク分配者を GBMA で構築し、タスクの返信を geocast で行うことでこの問題を解決可能である。

このように、資源が限定されており、トポロジが動的に変化する MANET において、GBMA の適用が有効な状況は数多く存在する。

5.5.2 本手法の限界

GBMA は次のような状況には適さない。

- 情報収集者が情報収集地域内に位置する場合
- 情報収集者も情報収集地域間でわずかなメッセージ交換しか行わない場合
- 非常に重要な情報を扱う場合

情報収集地域が物理的に近い場合、GBMA を移動するのに必要となるメッセージ量の方が、軽減できるメッセージ量より多くなる。また、情報収集地域とのメッセージ交換をごくわずかな回数しか行わない場合、軽減できるメッセージ量自体が小さくなる。GBMA は収集した情報を保持しながら移動する。経路がなくなってしまうなどを理由に、GBMA が情報収集者のノードに戻れなかった場合、情報収集者は全く情報を得られない。また、GBMA が滞在するノードが、バッテリー切れなどを原因に MANET から突発的に切断された場合も同様である。扱われる情報が非常に重要な場合、通信メッセージ量が増大しても、情報収集者が geocast を行った方が確実に得られる情報量が増える。よってこれらの場合には GBMA を用いない方がよい。

6 関連研究

固定インフラが使用できない被災地において情報収集を行う場合、衛星回線などを用いてインターネットに接続できる無線ルータを配置することによって情報収集を可能にするアプローチもある。Network Mobility(NEMO) 技術 [18] を用い、無線ルータを Mobile Router とすることで、無線ルータに接続した携帯端末はインターネットに接続することが可能である。しかし、単体の無線ルータでは広域な地域をカバーすることは不可能である。複数の無線ルータを設置することで広域な地域をカバーすることもできるが、無線ルータにつながっている全ての携帯端末が衛星回線を共用することとなり、現実的ではない。また、無線ルータも密に配置されることは考えにくく、必然的に各携帯端末も無線出力を強めることになる。このため、携帯端末のバッテリー消費量も大きくなるものと思われる。本論文では、被災地に MANET を構築し、情報収集者も MANET に接続することで、インターネットに接続することなくその場のネットワークで情報収集することを考えている。MANET では近隣の端末と接続できる程度の無線出力で十分であり、バッテリー消費量は抑えられる。MANET では情報収集者と情報提供地域が距離的に離れている場合、経路間のノードに負荷をかけるが、情報収集を行うモバイルエージェントを情報地域に派遣することで、この問題を解決している。

携帯端末のバッテリー問題に着目し、モバイルエージェントを用いたソリューションを提示している研究もある [19]。[19] では、単体の携帯端末に着目している。携帯端末上のアプリケーションはモバイルエージェントで構成されており、バッテリーが残り少なくなると、危機管理センターの指示に従い、重要なアプリケーションから他の端末上に移動することで、処理経過を失うことなく処理を続行できる。本論文では、MANET に存在する端末全体のバッテリー量を抑えるために、通信メッセージ量を低減することを目標とした。また、サービスリレー方式を用いることで、モバイルエージェントの移動先決定に関わる処理を、モバイルエージェントがタスク実行しているノードとは別のノードで行うことができる。そのため、モバイルエージェントが滞在しているホストの負荷を軽減し、結果としてバッテリー消費量を抑えることができる。

通信量の軽減は、モバイルエージェントを用いる利点として指摘されてきた [20][21][22]。これらの研究では主にクライアントサーバ型アプリケーションにおいて通信量を軽減している。モバイルエージェントをクライアントのノードからサーバに移動させ、ローカルにサービスを利用することで、クライアントとサーバ間のデータ通信量を軽減している。特に通信回線の帯域が狭い、携帯端末上からインターネット上のサービスを利用する場合に用いられてきた。本論文では、MANET 上において、経路間に存在するノードの負荷を軽減する目的でモバイルエージェントを用いている。情報収集者の端末から、情報を収集したい地域内のノードにモバイルエージェントを移動させることで、低コストな近距離

通信で情報収集を行うことができる。各ノードが移動する MANET においては、従来のクライアントサーバ型アプリケーションにおけるモバイルエージェント利用法と異なり、モバイルエージェントが目的地域に移動後も端末の移動に応じて再移動する必要がある。本論文ではこの点に着目し、移動開始決定のタイミングや、移動先を expected zone を導入することで解決した。

モバイルエージェントの現在地を特定する研究は [23][24] などがある。[23] では、global hash table に似た手法を用いてセキュア且つスケーラブルなモバイルエージェントの追跡サービスを実現している。また、[24] では、モバイルエージェントの位置情報更新や位置検索を行う効率的なアルゴリズムを提案している。これらの研究はインターネットを対象としており、IP のような一意に位置を特定する仕組みがなく、また、通信コストが高く通信経路の変更が頻繁に起こる MANET においては有効な手法とはならない。本論文では、モバイルエージェントの移動範囲を、位置情報を用いて限定させることでこの問題に対応している。モバイルエージェントと通信を行う場合、予め合意がとれているモバイルエージェントの存在地域に対して directed flooding を行うことで、低コストでモバイルエージェントを発見し、通信することができる。

物理位置情報を用いて、モバイルエージェントが移動先を決定する手法も提案されてきている [25]。[25] では、ユビキタスコンピューティングを対象とし、ユーザの物理的移動に合わせて、ユーザの近くの端末にユーザをサポートするモバイルエージェントが移動する。このとき、モバイルエージェントは、ユーザの RF-ID タグが、端末のリーダーに読まれた時に発生するイベントを引き金として、イベントを発したノードに移動する。そのため、モバイルエージェント自身は物理的な現在地を意識している訳ではない。本論文では、座標系を基にした物理位置をモバイルエージェント自身が知ることにより、能動的に適切なノードに移動している。モバイルエージェントが能動的な情報収集タスクを担うアプリケーションにおいては、モバイルエージェント自身が物理位置を把握する必要がある。

モバイルエージェントの移動ではエージェントのコードとデータを目的地ノードに転送する。コードを転送するタイミングとしては次の 3 方式がある [11]。

毎回配布 エージェントが移動時にコードを配布する。

事前配布 エージェントが移動開始する前にコードを配布する。

オンデマンド配布 移動先のノードがエージェントのコードを持っていないときのみ、移動時に送信する。

MANET において、情報収集者の作成したエージェントのコードを、各ノードが事前に所有しているという仮定は非現実的である。また、MANET では、モバイルエージェントの

移動先を把握する管理サーバを構築することが非常に困難であるため、事前配布方式は難しい。従って、毎回配布方式が現実的な手法となる。しかし、毎回配布方式は常にデータとコードを転送するため、移動にかかる遅延時間は大きい。

本論文では、サービスリレーを用いることによりこの問題に対応している。サービスリレーでは、モバイルエージェントのタスク処理用コードを持つスレーブエージェントが移動先ノードを確保しているため、移動時にはデータのみを送ればよい。このため、移動にかかる遅延時間が低減できる。

7 おわりに

携帯端末や無線通信機器の性能向上、普及により、MANET への期待が高まっている。本論文では、MANET 上において、省資源で位置に特化した情報の収集を行う手法を提案した。情報収集地域内に存在範囲が限定されたモバイルエージェントである GBMA を用いることで、低コストな近距離通信で情報を収集することが可能となる。また、GBMA の存在範囲を限定することで、GBMA への情報通知サービスが実現可能となった。さらに、GBMA の移動を原因とする活動停止時間を短縮するために、サービスリレー方式を提案した。サービスリレー方式を用いることで、GBMA の移動先を検索する処理を複製にまかせ別のノードで実行させることにより、移動にかかる時間の短縮、移動先検索にかかる処理時間の隠蔽、移動先検索にかかる処理の負荷分散などの利点がある。

本論文ではシミュレータ上で本手法の有効性を確認した。具体的には、モバイルエージェント用いることによる通信量低減、GBMA を用いることによるメッセージ到達率の向上、サービスリレーを用いることによるメッセージ到達率の向上の 3 点を確認した。しかし、シミュレータ上の実験であるため、実際にバッテリー消費が抑えられているかを確認するには至らなかった。

シミュレータ上の実験により、各ノードの移動速度によって expected zone の大きさを変更することが有効であることが分かった。様々な携帯端末で構築されている MANET において、各ノードの移動速度は様々であり、また、個々のノードの移動速度も動的に変化するものと予測される。本論文では、全てのノードの移動速度が均一であるという仮定の下に expected zone の大きさを静的に決定したが、これは現実的な仮定ではない。GBMA が滞在するノードの移動速度によって expected zone の大きさを動的に調整する手法が必要である。また、本論文では、expected zone の中心座標に最も近いノードを expected zone に長時間滞在するノードと見なし、GBMA は優先的にそのノードに移動した。ノードの現在地だけでなく、個々のノードの移動情報を用いることで、expected zone に長時間滞在するノードの選別をより正確に行うことができるものと思われる。さらに、本論文では、メッセージ量の低減によって MANET 全体のバッテリー消費量が抑えられるという観点から評価を行った。しかし実際は GBMA が滞在するノードでは、計算資源、通信資源を特に消費することでバッテリー消費量が增大しているものと思われる。滞在ノードのバッテリー容量を考慮した移動が必要となるかもしれない。今後は、実機上で実装を行い、通信と計算処理の両面からバッテリー消費が抑えられているかどうか、また個々のノードのバッテリーがどのように消費されているかを確認する必要がある。また、本論文では災害地における MANET を想定したアプリケーションを提案した。本論文で提案した手法を車車間 MANET やアドホックグリッドなどに適用することを検討中である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、様々な助言をして下さった早稲田大学理工学部の深澤良彰教授、学部一年に加え、修士二年間を通して、懇切丁寧な指導をして下さった国立情報学研究所の本位田真一教授、吉岡信和助教授、田原康之助教授に深く感謝致します。

また、様々な協力をいただいた早稲田大学理工学部情報学科深澤研究室の皆様、東京大学本位田研究室の皆様、電気通信大学大須賀研究室の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] T. Clausen and P. Jacquet, Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), Mobile Ad-hoc Network (MANET) Working Group, IETF (1998).
- [2] D. Johnson, D.A. Maltz and J. Broch, The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks, Mobile Ad-hoc Network (MANET) Working Group, IETF, 1998.
- [3] C.E. Perkins and E.M. Royer, Ad hoc on-Demand Distance Vector(AODV) Routing, Mobile Ad-hoc Network (MANET) Working Group, IETF (1998).
- [4] Z.J. Haas and M.R. Pearlman, The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad hoc Networks, Mobile Ad-hoc Network (MANET) Working Group, IETF, 1998.
- [5] J.C. Navas and T. Imielinski, Geocast-geographic addressing and routing, Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom), ACM/IEEE, 1997.
- [6] Y.B. Ko and N.H. Vaidya, Location-Aided Routing(LAR) in Mobile Ad hoc Networks, ACM/Baltzer Wireless Networks(WINET) journal, Vol.6-4, pp.307-321, 2000.
- [7] W.H. Liao, Y.C. Tseng and J.P. Sheu, GRID: A Fully Location-Aware Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, International Journal of Telecommunication Systems, Vol.18, pp.37-60, 2001.
- [8] Y.B. Ko and N.H. Vaidya, Flooding-based Geocasting Protocols for Mobile Ad Hoc Networks, ACM/Baltzer Wireless Networks(WINET) journal, Vol.7-6, pp.471-480, 2002.
- [9] W.H. Liao, Y.C. Tseng, K.L. Lo and J.P. Sheu, GeoGRID: A Geocasting Protocol for Mobile Ad Hoc Networks Based on GRID, Journal of Internet Technology, Vol.1-2, pp.23-32, 2000.
- [10] Y.B. Ko and N.H. Vaidya, Anycasting-based Protocol for Geocast Service in Mobile Ad Hoc Networks, International Journal of Telecommunication Systems, Vol.41-6, pp.743-760, 2003.
- [11] 本位田真一, 飯島正, 大須賀昭彦, 「エージェント技術」, 共立出版, 1999.

- [12] 鄭顕志, 吉岡信和, 深澤良彰, 本位田真一, P2P グリッドにおけるサービスの効率的信頼性向上, エージェント合同シンポジウム (JAWS), 2004.
- [13] 鄭顕志, 吉岡信和, 深澤良彰, 本位田真一, P2P グリッドにおけるモバイルエージェントを用いた生存性の高いサービスの構築, ソフトウェア工学の基礎ワークショップ (FOSE), 2004.
- [14] R. Barr, Z.J. Haas and R. Renesse. JiST:Embedding Simulation Time into a Virtual Machine, Proceedings of EuroSim Congress on Modelling and Simulation(EuroSim), 2004.
- [15] S. McCanne and S. Floyd, ns(Network Simulator) at <http://www-nrg.ee.lbl.gov/ns/>, 1995.
- [16] L. Bajaj, M. Takai, R. Ahuja, K. Tang, R. Bagrodia and M. Gerla, GloMoSim: A Scalable Network Simulation Environment, UCLA Computer Science Department Technical Report 990027, 1999.
- [17] T. Camp, J. Boleng and V. Davies, A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC): Special Issue on Mobile Ad Hoc Networking Research, Trends and Applications, Vol.2, No.5, pp.483-502, 2002.
- [18] T. Ernst, Network Mobility Support Goals and Requirements(Internet Drafts), Network Mobility Working Group, IETF, 2005.
- [19] H. Kaneko, Y. Fukazawa, F. Kumeno, N. Yoshioka and S. Honiden, Mobile Agent Based Evacuation System When The Battery Runs Out: Easter, Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications(PerCom), 2003.
- [20] Jim White, Mobile Agents White Paper, General Magic, 1996.
- [21] D. Kotz, Agent Tcl: Targeting the Needs of Mobile Computers, Internet Computing, Vol.1, No.4, pp. 58-67, IEEE, 1997.
- [22] R.S. Gray, D. Kotz, R.A. Peterson, J. Barton, D. Chacon, P. Gerken, M. Hofmann, J. Bradshaw, M. Breedy, R. Jeffers and N. Suri, Mobile-Agent versus Client/Server Performance: Scalability in an Information-Retrieval Task, Proceedings of International Conference of Mobile Agents(MA), 2001.

- [23] V. Roth and J. Peters, A Scalable and Secure Global Tracking Service for Mobile Agents, Proceedings of International Conference of Mobile Agents(MA), 2001.
- [24] T.Y. Li and K.Y. Lam, An Optimal Location Update and Searching Algorithm for Tracking Mobile Agent, Proceedings of International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS), 2002.
- [25] Ichiro Satoh, A Mobile Agent-based Framework for Location-Based Services, Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), IEEE Communication Society, 2004.