

〈一般研究課題〉 災害時に有効な分散型通信方式の研究

助成研究者 愛知工業大学 伊藤 暢浩



災害時に有効な分散型通信方式の研究

伊藤 暢浩
(愛知工業大学)

Effective distributed communication method in disasters

Nobuhiro Ito
(Aichi Institute of Technology)

Abstract :

Voice and radio communication are a means of sharing information in a time of disaster. However, this is limited to voice communication in some situations. It is necessary to establish a communication method for environments in which voice communication is disrupted and delayed. The architecture to overcome this situation is called a delay-tolerant network (DTN). In this paper, we implement moving target oriented opportunistic routing algorithm in vehicular networks (MORN) for the disaster simulations, and compare it with epidemic routing. Through these comparisons, we considered the effectiveness of the MORN for disaster situations.

1. はじめに

わが国の防災戦略は、防災無線に代表される全域型通信の利用を前提としている。しかし、被災者の立場では、そのような緊急通信を利用することはできない。また世界各国の自然災害の対策では、全域通信不能な場合の対策が課題として挙げられており、想定外の事態が生じる自然災害対策として、わが国でも取り組むべき課題のひとつであると考えられる。

このような場面で有効であると考えられるのはパケット通信に代表される分散型通信方式である。この分野においては、遅延耐性ネットワーク技術(Delay Tolerant Networking 以降, DTN)の研究が注目を集めている。DTNはノードの移動と、そのノード間の通信に関する研究であり、現在は理論的な研究として主に取り組まれている。この理論モデルでは、ノードの移動はランダム移

動に固定され、その通信方式のみに着目した研究が多い。しかし、現実問題ではランダム移動では不十分であるため、その応用面が大きな課題となっている。

そこで本研究では、DTNが有効に作用すると考えられる防災分野に注目して、その有効性を理論面、応用面の両方から分析し、地震災害下、特に発災直後の状況において有効な通信方式について検討をおこなう。

2. Delay Tolerant Network技術

Delay Tolerant Network(DTN) は、ノード間の接続関係が不安定なネットワークや配送遅延が発生しうる環境において、宛先までのメッセージ配送を可能にする技術である[1,2]。DTN の始まりは宇宙空間における惑星間インターネットでの通信手段の研究からである。最近の研究では、ネットワークインフラが整備されていない環境でもネットワークを構築できるということから惑星間インターネット以外に、モバイルアドホックネットワーク、車車間通信、水中センサネットワークなどがDTN の通信方法としても研究されている。

DTN はノードが固定されている場合、モバイルノードによりメッセージの転送を行うことが可能である。そのため、DTN はエンドノード間で通信パスの接続が常に確立されていないようなネットワークにおいて特に効率良く通信できる。

DTN では、ストア・アンド・フォワードと呼ばれる方式でメッセージが送信される。ストア・アンド・フォワードは、メッセージを送信するための経路の切断などの理由でメッセージの送信が困難な場合、メッセージを送信できる状態(ノード間の通信経路が確保される) になるまでメッセージを保持し続け、その後メッセージを送信する方式である。

3. Moving Target Oriented Opportunistic Routing(MORN)

3. 1 MORNとは

Moving Target Oriented Opportunistic Routing(MORN)[3,4] はLocation Based Routing [5,6]の1つであり、平均ホップ数の増加による遅延の増加の問題を改善するために提案されたルーティング手法である。平均ホップ数とは、通信相手に到達するまでに経由するノード数の平均である。MORN における各車両ノードは自身の軌跡情報をブロードキャストし、メッセージキャリアは軌跡情報を基に、より目標車両ノードに近づく可能性が高い車両ノードにメッセージを転送する。そのため、少ない平均ホップ数でメッセージ配送を行うことができる。

3. 2 MORNのモデル

MORNのモデルは次のようになる。なお、ここでは移動車両をノードとしている。

- ・各ノードは独自の識別子を持ち、別のノードと区別することができる
- ・各ノードは連続的に移動することができる
- ・各ノードは有限の視覚及び聴覚範囲をもつ
- ・視界情報として、視界内の他ノードの位置情報を得ることができる
- ・各ノードは聴覚範囲の他ノードと無線通信することができる
- ・一度に通信可能な通信量には制限がある

- ・他ノードとの通信は常に正しくおこなうことができる
またMORNの動作する環境は次のようにモデル化できる。
- ・ノードが移動する地図は交差点を頂点とし、その頂点をつなぐ道路を辺として持つ平面グラフとして表現できる。
- ・各頂点は経度、緯度に基づく座標を持ち、各辺には長さが定義されている。
- ・シミュレーションの対象の領域の境界には便宜上、行き止まりとなっており、頂点が配置されている。

3. 3 MORNの動作

MORN ではメッセージを要求する車両ノードを v_{tar} 、要求されたメッセージの情報源を IS 、応答メッセージを持っている車両ノード(メッセージキャリア)を v_i 、メッセージキャリアと成り得る車両を v_j とする。メッセージには v_{tar} の軌跡情報、メッセージの有効時間を表す TTL とメッセージそのものが含まれている。 v_{tar} から送信された要求メッセージを v_i が受信した時、 v_i は通信可能範囲内に v_{tar} が存在するかどうか判定する。 v_{tar} が存在する場合、 v_i は v_{tar} に応答メッセージを送信しプロセスを終了する。 v_{tar} が存在しない場合、 v_{tar} から送信されたメッセージには v_{tar} の軌跡情報が含まれており、 v_i は v_{tar} の軌跡情報を用い、 v_i と v_{tar} が最も近づく距離 $d_{min}(v_i, v_{tar})$ を式(1)(2) から求める。その時の時刻 t を $t_{min}(v_i, v_{tar})$ (式(3)) とし、 v_i の距離的な近さの割合 $d^*(v_i)$ と時間的な近さの割合 $t^*(v_i)$ を式(4)(5)から算出する。

$$\begin{aligned} d_{v_i, v_{tar}}(t) &= dist(v_i(t), v_{tar}(t)) \\ &= \sqrt{\left((x_{v_i})(t) - x_{v_{tar}}(t)\right)^2 + \left(y_{v_i}(t) - y_{v_{tar}}(t)\right)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$d_{min}(v_i(t), v_{tar}(t)) = \min_{0 \leq t \leq TTL} d_{v_i, v_{tar}}(t) \quad (2)$$

$$t_{min}(v_i(t), v_{tar}(t)) = t_{d_{min}(v_i, v_{tar})} \quad (3)$$

$$d^*(v_i) = \frac{d_{min}(v_i(t), v_{tar}(t))}{d_{IS}} \quad (4)$$

$$t^*(v_i) = \frac{t_{min}(v_i(t), v_{tar}(t))}{TTL} \quad (5)$$

その後、 v_i の通信可能範囲内の全ての車両ノードを v_j とし v_{tar} の軌跡情報と v_j の軌跡情報を用い、全ての v_j の $d^*(v_j)$ と $t^*(v_j)$ を求める。さらにそれらを用い、それぞれの v_j と v_i における距離的な近さと時間的な近さを $1-\lambda : \lambda$ の割合に統合した値 $\sigma(v_i, v_j)$ を式(6)によって求める。

$$\sigma(v_i, v_j) = \lambda \times (d^*(v_i) - d^*(v_j)) + (1 - \lambda) \times (t^*(v_i) - t^*(v_j)) \quad (0 \leq \lambda \leq 1) \quad (6)$$

この $\sigma(v_i, v_j)$ の値が閾値 c 以上になる v_j の中から最も v_{tar} に近くなるような v_j を選択する。そして v_i は選択した v_j に対して応答メッセージの送信を行い、送信が成功した後 v_i が保持している応答メッセージを削除し、プロセスを終了する。また、閾値 c 以上になる v_j が存在しない場合、 v_i は応答メッセージを送信せずに保持したままプロセスを終了する。このプロセスを v_{tar} が応答メッセージを受信するまで繰り返す。このプロセスの流れを簡潔にまとめたものを図1に示す。

3. 4 メッセージ有効性の監視

メッセージキャリアである v_i は常にメッセージが有効であるかを監視し、無効になった場合メッセージを破棄しなければならない。そのために距離的な有効性である $M_d(v_i)$ と時間的な有効性である $M_t(v_i)$ を用いる。 $M_d(v_i)$ と $M_t(v_i)$ は式(7)(8)から求めることができる。 $M_d(v_i)$ と $M_t(v_i)$ の2値を用い、式(9)から有効性 $M^*(v_i)$ を計算し、 $M^*(v_i)$ の値が0以下になる場合メッセージを破棄する。

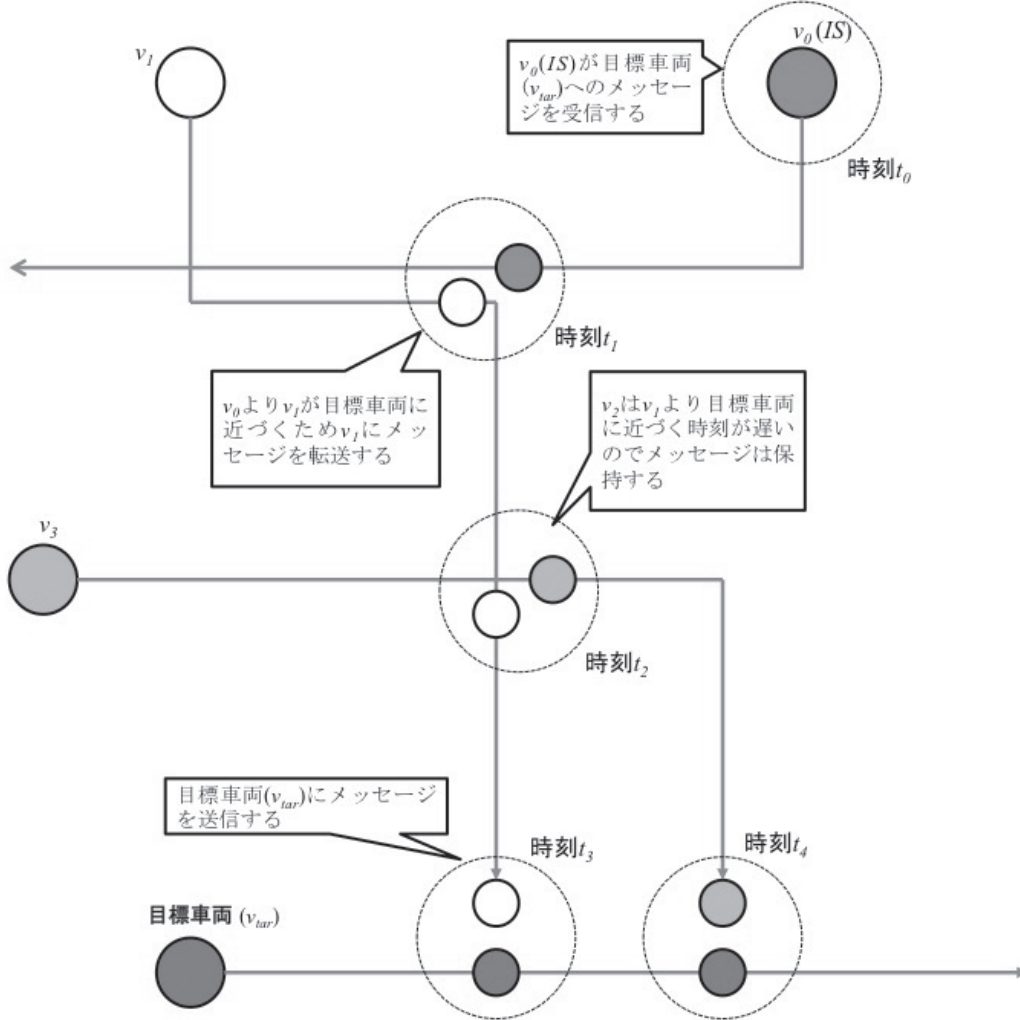


図1: MORNの動作の流れ(例)

$$M_d(v_i) = \frac{d_{\min}(v_i, v_{tar})}{d_{IS, v_{tar}}(t_{now})} \quad (7)$$

$$M_t(v_i) = \begin{cases} \frac{t_{now}}{TTL} & (0 \leq t_{now} \leq TTL \text{ の場合}) \\ 1 & (TTL \leq t_{now} \text{ の場合}) \end{cases} \quad (8)$$

$$M^*(v_i) = (1 - M_d(v_i)) \times (1 - M_t(v_i)) \quad (9)$$

4. 災害シミュレーションへの適用

4. 1 災害シミュレーションについて

本研究では災害シミュレーションとしてRoboCup Rescueプロジェクト[7]の災害シミュレータを採用する。このシミュレータはマルチエージェントアプローチを採用しており、設計した戦略に

従って自律的に行動可能なエージェントと呼ばれるプログラム(災害救助エージェント)が、さまざまな都市に対して災害シミュレーション可能である。災害救助エージェントとしては消防隊、救急隊、土木隊が用意されており、各エージェントの戦略を別々に用意することができる。また、エージェント間の通信方式として全域通信である無線通信と、局所通信である直接通信が用意されている。したがって、災害救助エージェントを車両とみなし、局所通信を車車間通信とみなせば、MORNを適用可能であると考えられる。

以上より、本研究のテストベットとして適していると考えられる。

4. 2 災害シミュレータへの適用

MORN の環境とRoboCup Rescueプロジェクトによる災害シミュレータ(以降、RCRS)の環境の違いを以下にまとめる。

1. 軌跡情報の取得について

MORNにおいて想定される環境下では車車間通信を想定している。したがってGPS 情報を付加させたメッセージを送信し、受信したノードはそのGPS 情報をもとに軌跡情報を取得している。しかし、RCRSではGPS 情報の取得は不可能であるため、別の方法で軌跡情報を送る必要がある。

2. 連続空間と離散空間の違い

MORN は現実世界での車車間通信を想定しているため、連続空間での稼働を前提としている。しかし、RCRSは離散空間でシミュレーションを行う。そのため、離散空間での災害救助隊の情報共有形式に実装できる形式に変更する必要がある。

4. 3 軌跡情報の取得について

MORNではナビゲーションシステムが想定されており、車両の目的地までの移動軌跡を利用する必要がある。またRCRSでは災害救助活動をおこなう災害救助エージェントは、最短経路探索アルゴリズムを用いて、移動経路を決定する。

そこで本研究では、エージェント間のメッセージに自分の目的地および現在地を付加させることで、MORNに近い条件を実現することにする。メッセージを受信したエージェントはメッセージに付加された現在地及び目的地の情報と、情報を送信したエージェントの持つ最短経路探索アルゴリズムを用いることで、必要な軌跡情報を得ることができる。

4. 4 連続空間と離散空間の違い

MORN は、ノードから受け取った軌跡情報に対し評価を行い、送信ノードはどのノードに応答メッセージを送信するかを選択する。そして、メッセージを配送することが可能なノードに限定して送信することで、通信帯域を効率良く使用することができる。

しかし、RCRSで同じようなプロセスで通信を行うと、軌跡情報の受信及び軌跡情報に基づいたメッセージの送信が必要となり、2ステップを要する。MORNでは、この2ステップで車両が移

動してメッセージの配送が失敗する可能性が小さいが、RCRSでは1分を1ステップとしてシミュレーションしているため、頻繁にメッセージ配送が失敗すると考えられる。

そこで、本研究では、災害救助隊の情報共有方式のメッセージの配送手順として、送信者による応答メッセージの定期的なブロードキャストを導入する。そして、受信者が応答メッセージに含まれる送信者の現在位置及び目的地情報をもとに評価を行い、応答メッセージの保持及び破棄の計算を行う。したがって導入手法では、応答メッセージを受信した時点でメッセージ送信のプロセスが終了することになる。この変更によりMORNの条件に近いメッセージ配送が可能となる。

4. 5 RCRSにおけるMORNの動作例

RCRSにおけるMORNの動作例について図2を用いて説明する。

(1) 要求メッセージのブロードキャスト

エージェント v_{tar} は要求メッセージをブロードキャストする。

(2) 要求メッセージの送信

要求メッセージを受信した中継エージェントは、通信範囲内にいるエージェントに要求メッセージを送信する。

(3) 要求メッセージの到達

要求メッセージをISが受信する。

(4) 応答メッセージのブロードキャスト

ISは、応答メッセージを作成しブロードキャストする。

(5) 応答メッセージの評価

中継エージェントは応答メッセージを受信したとき、そのメッセージが自分宛てでなければ、メッセージを評価し、保持するか破棄するかを決定する。評価には応答メッセージに含まれる移動経路情報を用いる。

(6) 応答メッセージの送信

メッセージを保持したエージェントは、応答メッセージを送信する。

(7) 応答メッセージの評価

(5)と同様に応答メッセージに含まれる移動経路情報を用いて評価する。

(8) 応答メッセージの到達

v_{tar} が応答メッセージを受信する。ここで通信プロセスを終了する。

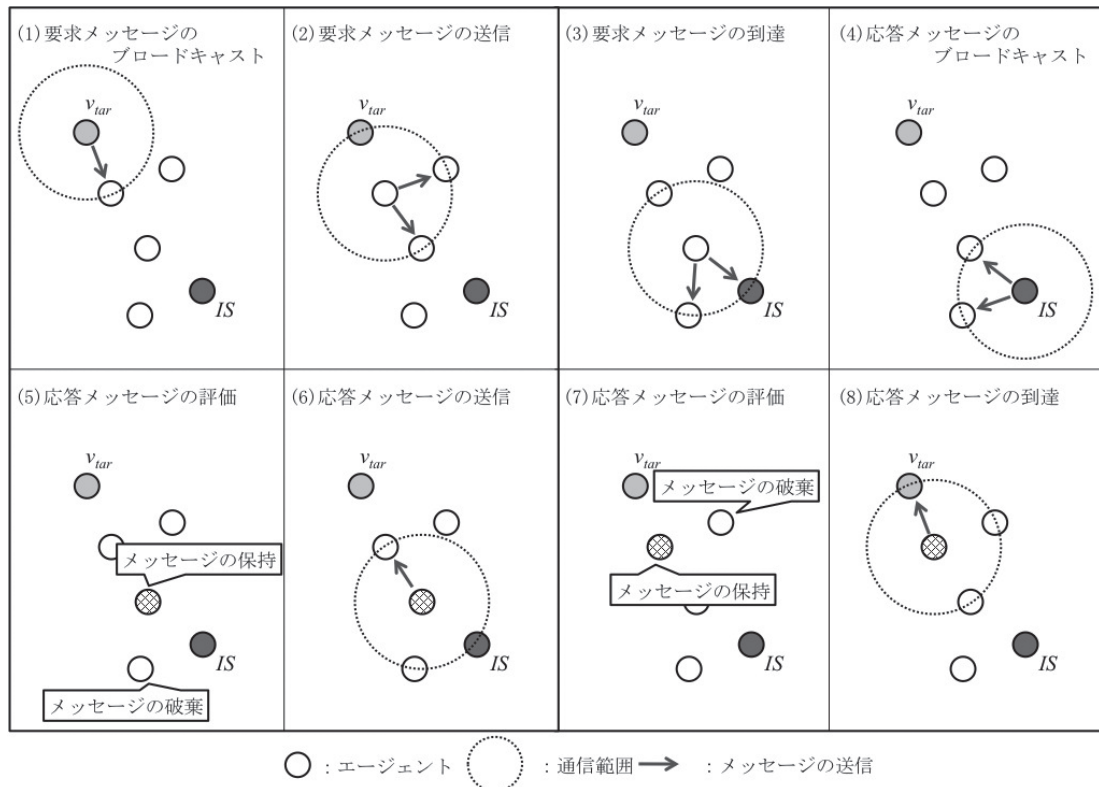


図2: RCRSに適用したMORNの動作例

5. 災害救助シミュレーションにおけるMORNを適用したエージェントの実験と考察

5. 1 実験目的

DTN環境で平均ホップ数を減少することで遅延を改善するMORN がRCRSにおいても同様に遅延を改善させ、RCRSによる災害救助の問題においてMORN は有効であるかを検証する。

本研究では、DTN環境における代表的なルーティング手法であるEpidemic Routing[8]との比較を行う。DTNルーティングはブロードキャストによる膨大な量のメッセージ配送が大きな欠点であるが、最も高い配送率を達成可能なメッセージ配送可能な手法である。

MORNは無駄なメッセージ配送を防ぐことにより、メッセージのホップ数を減らすことを目的として手法である。したがって、できる限りEpidemic Routingに近い配送率を目指しつつ、ホップ数を削減し配送時間を短縮できるかどうかの有効性の指標となる。

5. 2 実験方法

後述の実験環境、シミュレーション設定に従い、通信手法にMORN を適用したエージェントと通信手法にEpidemic Routing 適用したエージェントで、シミュレーションを行う。また、試行回数を決定するために事前実験を行った結果から、20 回以上の試行を行えば十分な結果が得られる事を統計的に確認できたため、本実験では試行回数を30 回とした。

5. 3 実験環境

実験環境として、次に示す構成のコンピュータ4台を1クラスタとして、2クラスタ、合計8台による実験を行った。

O S: Ubuntu 12.04 LTS (64bit)

C P U: Intel Core i7-2600

メモリ: 8GByte

J a v a: JDK 1.7

シミュレーションパッケージ: rescue2013 (RoboCup2013 公式パッケージ)

5. 4 シミュレーション設定

実験を行うにあたりシミュレーションパッケージを次のように設定した。

1. 利用する地図

本研究では、実験で利用する地図としてrescue2013のパッケージに含まれるKobe(図 3)及びBerlin(図 4)を用いた。Kobeは兵庫県神戸市長田区の1区画(500m×500m)を再現している。また、Berlinはドイツの首都、ベルリンの1区画(2km×2km)を再現している。この2つの地図の特徴は次のように説明できる。Berlin は現在、rescue2013に含まれる地図の中で最大面積であり、かつ複雑な構造を持つ地図となっている。また Kobe はBerlinに比べ、面積が小さく道路形状も単純である。本研究は、地図の面積及び道路構造の形状が結果に影響が出ると考えられるため、以上のように特徴の違う2つのマップを使用する。

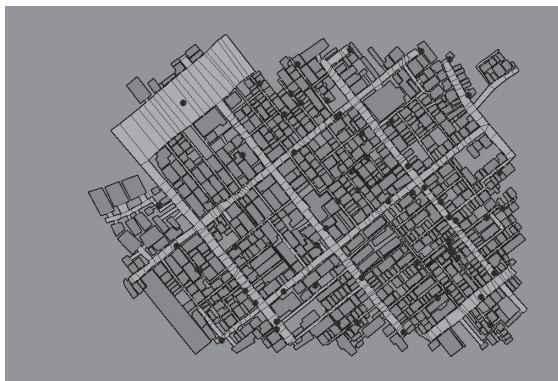


図 3: Kobe(神戸市長田区)の地図

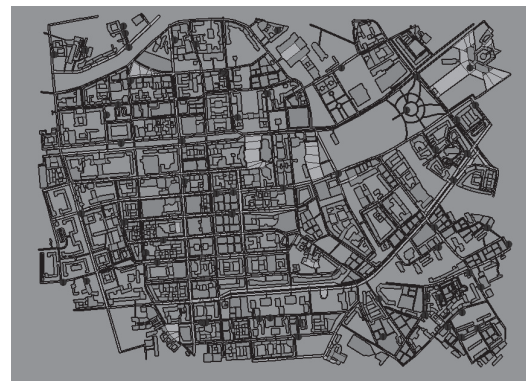


図 4: Berlin(ベルリン)の地図

2. シミュレーションシナリオ

本研究ではKobe, Berlin で用いるシミュレーションシナリオとして、初期出火及び道路閉塞の発生がなく、60, 80, 100 体のエージェントを道路上にそれぞれランダムに配置した30 個のシナリオを用意した。

初期出火の発生をなくした理由は、火災によるエージェントの故障が発生し、情報共有に影響を与える可能性があるためである。

道路閉塞の発生をなくした理由は、道路閉塞によりエージェントの移動に障害が生じ、情報共有に影響をあたえる可能性があるためである。

3 パターンのエージェント数を用意した理由としては、本研究の手法はエージェント数により結果に影響があると考えたためである。

3. エージェントの行動

エージェントの行動は、移動と直接通信のみとする。

エージェントの行動を制限する理由は、メッセージ配送率や平均配送時間の調査において災害救助活動は情報共有に影響を与えるためである。エージェントの移動速度は30km/h とする。また、エージェントは移動の目的地をランダムに決定し、目的地まで最短経路で移動するものとする。

直接通信における通信範囲は半径30mとする。また、各エージェントは1つ以上のメッセージ要求をしないものとする。

4. MORNに必要なパラメータの設定

メッセージの有効時間であるTTLを10とした。TTLを10とした理由は、より新しい情報を共有するためである。

5. 5 実験結果の評価と考察

実験結果の評価と考察を行う。評価は、MORNを適用したエージェントとEpidemic Routingを適用したエージェントにおけるメッセージ配送率、平均配送時間、平均ホップ数を比較することにより行う。

実験の結果を表1, 2に示す。

表1: Kobeの実験結果

エージェント数	ルーティング手法	平均配送率	平均配送時間	平均ホップ数
60	MORN	97.0%	61.5 step	4.4
	Epidemic Routing	97.0%	60.1 step	4.9
80	MORN	97.5%	62.8 step	4.5
	Epidemic Routing	98.0%	65.6 step	4.7
100	MORN	98.0%	65.3 step	4.5
	Epidemic Routing	98.0%	66.7 step	4.8

表 2: Berlinの実験結果

エージェント数	ルーティング手法	平均配送率	平均配送時間	平均ホップ数
60	MORN	6.9%	145.9 step	2.7
	Epidemic Routing	6.4%	138.9 step	3.2
80	MORN	8.1%	140.3 step	2.9
	Epidemic Routing	7.9%	143.9 step	3.4
100	MORN	12.1%	131.9 step	3.0
	Epidemic Routing	11.6%	139.0 step	3.5

表1 及び 2 に基づき、平均配送率、平均配送時間、平均ホップ数、地図による違いについて考察する。

1. 平均配送率

平均配送率の差は全てのシミュレーションにおいて最大でも0.5%以内となった。このことから

配送率については、MORN とEpidemic Routing で大きな差がないことが分かる。

2. 平均配送時間

Kobe とBerlin のどちらもエージェント数が80 体及び100体のときは提案手法のほうが平均配送時間は短くなっている。これはMORN によって効率的なメッセージ配送が行われたためであると考えられる。しかし、エージェント数が60 体のときはKobe とBerlin のどちらも提案手法のほうが平均配送時間は長くなっている。これは、マップに対してエージェント数が十分でなかったため、効率的なメッセージ配送が行われなかったためであると考えられる。

3. 平均ホップ数

平均ホップ数はどのシミュレーションにおいても減少した。これはMORN を適用したエージェントがEpidemic Routing を適用したエージェントに比べ、メッセージ配送の効率的なルーティングをおこなえたためだと考えられる。このことからMORNは、RCRSによる災害救助の問題でも有効であると考えられる。

4. 地図による違い

KobeとBerlinでの平均配送率及び平均配送時間の結果は大きな差が生じた。Kobeの平均配送率では、どのエージェント数に対してもほぼ100%に近い結果となったのに対し、Berlinでは、平均配送率が一番高いエージェント数が100 のときでも12.1%という低い結果となった。平均配送時間においては、Kobeの60 step 前後という結果に対し、Berlinは、140 step 前後という結果となり、シミュレーション時間300 stepであったのに対し、約半分の低い結果となった。これは、Berlin のマップの広さと通信可能範囲の影響があると考えられる。Berlin のような広いマップではマップに対して、エージェントが1 stepで移動できる範囲が限られてしまう。そのため、エージェントが他のエージェントと接触する確率が低くなり、通信を行う回数が減少する。その結果、配送率が低くなってしまったと考えられる。このことから、MORNはBerlin のような広いマップでは、十分な情報共有が行えないことが分かる。

以上のことから、総合して考察すると、全てのシミュレーションのパターンにおいてMORN は、平均配送率を損なうことなく平均ホップ数を減少させることができた。また、エージェント数がマップに対し十分な数が存在する場合は、平均配送時間も縮めることができた。このことから、MORN はRCRSにおいてマップに対し十分なエージェントが存在する場合、有効的であるといえる。しかし、Berlin のような広いマップでは、平均配送率及び平均配送時間は十分ではなかったため、RCRSにMORNをそのまま適用するだけでは不十分であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、DTNが有効に作用すると考えられる防災分野に注目して、その有効性を理論面、応用面の両方から分析し、地震災害下、特に発災直後の状況において有効な通信方式について検討をおこなった。

DTN環境において、エージェントの移動に注目してメッセージのホップ数を削減し、高速な通信を可能とするMORNに着目し、RCRSによる災害救助シミュレーションへの適用及び、有効性の検証を行った。検証の結果、MORNはDTNの代表的な手法であるEpidemic Routing に比べてホップ数を減少させ、効率的にメッセージ配送を行えることがわかった。

またKobe では十分に情報共有をおこなうことができたが、Belrin のような広いマップでは十分に情報共有が行うことができなかった。そのため、マップが広い場合に対応することが今後の課題である。

参考文献

- [1] Kevin Fall, “A delay-tolerant network architecture for challenged internets”, in Proceedings of the 2003 conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, ACM, 2003.
- [2] Evan P. C. Jones, Lily Li and Paul A. S. Ward, “Practical Routing in Delay-Tolerant Networks”, SIG-COMM ‘05 Workshops, 2005.
- [3] Yu Ding, Wendong Wang, Yong Cui, Xiangyang Gong, and Bai Wang, “Moving Target Oriented Opportunistic Routing Algorithm in Vehicular Networks”, International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2013, Article ID 692146, 10 pages, 2013.
- [4] Ari Keranen, Jorg Ott, Teemu Karkkainen, “The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation,” in Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools ‘09), Italy, 2009.
- [5] Li, Fan, and Yu Wang, “Routing in vehicular ad hoc networks: A survey”, Vehicular Technology Magazine, IEEE 2.2, pp.12-22, 2007.
- [6] 村井翔悟, 石原進, “VANET における移動する宛先に向けたマルチパスルーティング(アドホック)”, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク108.458, pp.303-307, 2009.
- [7] RoboCup rescue simulation. <http://sourceforge.net/>
- [8] Vahdat. A, and Becker. D., “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad-Hoc Networks”, Technical report, Duke University, 2000.

