

劣通信環境下における災害救助エージェントの組織

高橋 徹^{1,a)} 北村 泰彦¹ 巳波 弘佳¹

受付日 2012年1月13日, 採録日 2012年7月2日

概要: 本稿では広域災害時のアドホック通信を使った救助活動組織戦略の提案を行う。救助活動では救助活動者が被災地域を探索・発見し、その情報を共有して、救出活動に必要な支援者や機材を集める。しかし広域災害時には既存の通信インフラが深刻な被害を受けて使用できないために情報共有することが難しい。そこで、アドホック通信を情報共有の手段として使うことが検討されている。しかし、アドホック通信は端末間が離れると通信ができない劣通信環境である。そのため、広域探索を行うと情報共有が行えず、つねに情報共有を行えるようにすると狭い範囲しか探索できないというトレードオフの問題がある。そこで、アドホック通信を使った救助活動の組織戦略を提案する。本稿ではエージェントベースシミュレーションによって組織戦略の評価を行う。まず組織戦略のない場合としてランダムウォーク戦略の評価を行った。結果として組織戦略がなければ救助活動が効果的に行えないことが示された。次に広域探索を重視するランデブーポイント戦略と情報共有を重視するメッシュ隊列戦略の評価を行った。これらの結果から、1) 多くの救出ポイントを発見するためには全体に広がる方が良い; 2) 救出ポイントが少なくなると情報共有のコストを抑えたほうが良いことが分かった。最後に先の2つの知見に基づく戦略の1つとして小隊戦略を提案した。シミュレーションの結果、先の2つの組織戦略を上回る成果を確認した。

キーワード: エージェントベースシミュレーション, 救助活動, 組織戦略

Organization of Rescue Agent Communication with Ad-hoc Network

TORU TAKAHASHI^{1,a)} YASUHIKO KITAMURA¹ HIROYOSHI MIWA¹

Received: January 13, 2012, Accepted: July 2, 2012

Abstract: When a disaster happens, rescue teams are organized. They firstly search for victims in the disaster area, then share information about the found victims among the members, and finally save them. Disasters often make conventional communication networks unusable, and we employ rescue agents using ad-hoc networks, which enable the agents to directly communicate with other agents in a short distance. A team of rescue agents have to deal with a trade-off issue between wide search activities and information sharing activities among the agents. In this paper, we evaluate the organizational strategies by using agent based simulations. We first simulate a naive and unorganized strategy named the Random Walk Strategy. Its result suggests rescue agents can not rescue all victims with the unorganized strategy. We propose two organizational strategies, named the Rendezvous Point Strategy and the Serried Ranks Strategy for rescue agents using ad-hoc networks. These result suggest: 1) rescue agents can find many victims with wide search; 2) When there are a fewer victims, it is important to reduce communication costs. We propose the organized strategy named the Platoon Strategy based on these results. The performance of it is better than the Rendezvous Strategy and the Serried Ranks Strategy.

Keywords: agent based simulation, rescue activity, organizational strategy

1. はじめに

阪神・淡路大震災では建物が倒壊し、多くの被災者が瓦礫に埋もれて救出が必要な事態となった。同様の状況は東

¹ 関西学院大学
Kwansei Gakuin University, Sanda, Hyogo 669-1337, Japan
^{a)} takahashi.toru.1010@gmail.com

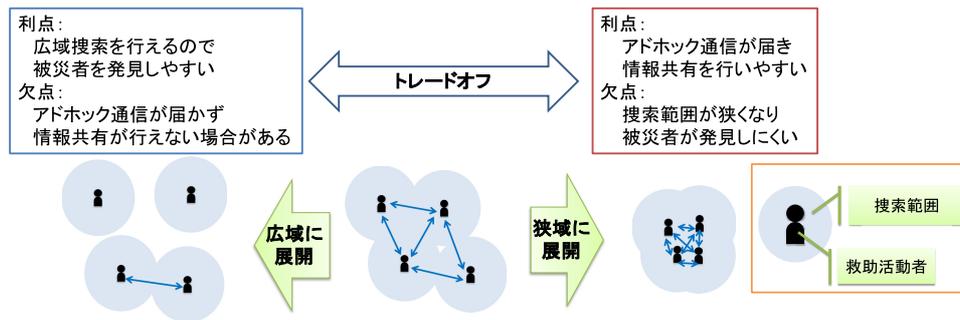


図 1 アドホック通信を使った救助活動の捜査と情報共有のトレードオフ

Fig. 1 Trade-off between wide search and information sharing activities.

京湾北部を震源とする首都直下型地震でも起こりうると危惧されている [1].

このような広域災害時には救助活動組織を編成し、可能な限り早く被災者を救助する必要がある。救助活動者は救助が必要な被災者を捜索・発見し、その情報を共有することで必要な支援者や機材を集めて救出活動を行う。特に阪神・淡路大震災の調査によれば瓦礫からの救出活動には大きな労力が必要であり*1, また必要な機材を揃えることが難しかったという報告がなされている [2]. ゆえに救助活動では支援者と機材を速やかに集めるために情報共有が重要になってくる。

しかし、広域災害時には通信インフラが深刻な被害を受けたり、輻輳が発生したりして機能しない場合がある。阪神・淡路大震災では 28 万 5,000 回線が被災した。東日本大震災では固定通信は 190 万回線が被災し、移動通信は 2 万 9 千局の基地局が停止した [3], [4]. ゆえに、災害発生直後には既存の通信インフラで情報共有を行うことは難しい。自衛隊は代替手段として衛星電話を使って情報共有を行っているが、民間組織で衛星電話をつねに用意しておくことは難しい。

一方で、災害発生直後は自衛隊が即座に現地に入ることは難しいため、現地のボランティアによる救助活動が重要である。阪神・淡路大震災では倒壊した家屋など動けなくなった被災者のうち、自衛隊・消防・警察に救出された 7,900 人の半数以上がすでに死亡していたのに対して、近隣住民によって救出された 2.7 万人の生存率は 80% を超えていたとの推計がある [5]. ゆえにボランティアによる災害発生直後の救助活動は重要であり、民間組織でも即座に利用できる通信手段を検討する必要がある。

災害時の通信手段として検討されているものの 1 つとしてアドホック通信がある [6]. アドホック通信は短距離の端末間でしか通信できないものの、ほかの端末を経由することで遠方の端末とも情報を共有することができる。これはスマートフォンをはじめ比較的低価格のデバイスでも実現

することができるため民間組織でも利用可能である。ただし、スマートフォンや無線 LAN ルータのような 2.4 GHz 帯を使う機器は電池の消費量が高く、機器によっては通信距離が短いものが多い。一方で、400 MHz 帯を使う機器は見通し距離で 2km の通信が可能で消費電力も低いものもある。また、衛星電話は非常にコストが高いため自衛隊組織でも補助手段の 1 つとしてアドホック通信を検討する価値はある。

ただし、アドホック通信は安定的に対象に情報が届くことが保障されていない劣通信環境である。特に救助活動者の間隔が離れてしまうと電波が届かなくなり、情報共有できる範囲が局所的になってしまう。通常の通信環境の場合は、上位の意思決定者に救助活動の情報を集めて、それに基づき救助活動者に作業指示を出せばよい。しかし、劣通信環境では救助活動者が離れてしまうと上位の意思決定者につねに情報を共有することは難しい。

そのために、救助活動者が自律的に動いてしまうと情報共有が行えずに救助活動が効率的に行えないことが危惧される。阪神・淡路大震災では救助活動者が現場に向かう途中で助けを求める被災者に応じてしまって、目的地にたどり着けないう事態が発生している [7]. アドホック通信を使った救助活動で同様に救助情報に応じて動いてしまうと、救助活動者が局所的に集まったり、あるいは分断されたりしてしまうと考えられる。ゆえに、アドホック通信を使った救助活動では組織的な戦略が必要である。しかしながら、従来の上位の意思決定者が作業指示を出す場合は異なり、救助活動者が自律的な意思決定を行うような組織戦略は確立されていない。

組織戦略を考えるうえで、救助活動の捜索と情報共有の間におけるトレードオフの問題が重要になる (図 1). 捜索のために広範囲に救助活動者が分散すると、通信が行えなくなり情報共有が行えなくなってしまう。しかし、通信を維持するために狭い範囲で救助活動者を集中させると捜索範囲が狭くなってしまふ。

本稿ではアドホック通信を使った救助活動の組織戦略の提案と評価を行う。まず、組織戦略がなく、得られた情報に基づいて自律的な行動をした場合どうなるのかを確認す

*1 木造家屋から 1 人を救出するに平均 84 人・分、RC 建物からは 188 人・分を要したという試算がある。東京消防庁が担当した範囲では 21 人・時間を要するケースもあった。

る。次に、広域搜索を重視した戦略と情報共有を重視した戦略としてランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略を検討する。そしてこれらから得られた知見を基に新しい戦略として小隊戦略を提案する。

本稿ではこれらの戦略をエージェントベースシミュレーション (ABS) によって評価する。ABS は対象となる現象をボトムアップに構成する方法である [8], [9]。救助活動者 1 人 1 人の動きを観察するに、救助活動者を救助活動エージェントとしてモデリングする。

本稿の構成は以下のとおりである。2 章では関連研究について述べる。3 章ではシミュレーションモデルを説明する。4 章では組織戦略のない救助活動シミュレーションの実験について述べる。5 章では広域搜索と情報共有をそれぞれ重視した組織戦略を用いた救助活動の実験について述べる。6 章では 5 章の実験結果に基づく組織戦略を用いた救助活動の実験について述べる。最後に 7 章ではまとめと今後の展望について述べる。

2. 関連研究

アドホック通信を使った救助活動を効果的に行うためには多くの要素について検討する必要がある。すなわち、a) 救助活動組織、b) アドホック通信による情報共有、c) 被災者の搜索・救出、d) 地理的な制約、e) アドホック通信で使用する通信機器やプロトコルなどがあげられる。しかしながら、これらの要素のすべてを 1 つのシミュレーションで検討することは非常に困難であるため、複数の段階において検討する必要がある。

これまで、災害活動時のロボットの情報共有の方法としてアドホック通信を想定しているものはあった [10]。しかし、これらは地理的な条件もモデリングされており、それを含めた全体論的な議論になっている。そのため、戦略的な検討というよりも、地理的制約下でいかに通信を行うかという戦術の研究になっている。

また、アドホック通信を使った活動では、どのようなルーティングプロトコルを利用するかも重要である。これには、ダイナミックに変化するネットワークで情報をいかにして確実に情報を転送するかという視点と、バッテリーが尽きないように消費電力を抑えるという視点がある。これらは実現できないと情報共有に致命的な影響をもたらす。災害時にこれらを実現するためのプロトコルはいくつか提案されている [11], [12]。ただし、これらは使用者の動きをランダムに設定しているものが多い。文献 [13] によれば仮定する動きが変わればその性質は大きく変わることが指摘されている。そのため、どのような組織戦略を用いるかによって性質が大きく変わってしまうと考えられる。そのため、まずは戦略・戦術を決めて救助活動者がどのように動くかを定める必要がある。

ゆえに、まずは情報共有と広域探索のトレードオフに対

処するための戦略を検討する必要がある。この段階では a) 救助活動組織、b) アドホック通信による情報共有、c) 被災者の搜索・救出の要素を含めた検討を行う。そして、次に d) 地理的な制約を加えて、戦略を達成するための戦術面を検討する。さらに次の段階では戦術を達成するために e) アドホック通信で使用する通信機器やプロトコルを決める。

そこで、本稿は最初の段階として a) 救助活動組織、b) アドホック通信による情報共有、c) 被災者の搜索・救出の要素からなるシミュレーションで情報共有と広域探索のトレードオフに対処するための組織戦略の検討を行う。

3. 劣通信環境下での救助活動のシミュレーション

このシミュレーションは、救助活動者が被災者を搜索・発見を行い、その情報をアドホック通信によって共有し、救出に必要な人数を集めて救出活動を行う一連の行動を扱う。このシミュレーションの要素は、被災エリアと、瓦礫で動けない被災者を表す救出ポイント、救助活動者を表す救助活動エージェントから構成される。救出ポイントで救出活動を行うためには、瓦礫を除去するために一定数以上の救助活動エージェントが必要であるとする。救助活動エージェントは救出ポイントの位置や救助活動に必要な人数の情報をアドホック通信によって共有できる。アドホック通信は近くの救助活動エージェントとしか行えないが、エージェント間の転送によって情報が届く範囲までは情報共有が可能であるとする。

アドホック通信を使った搜索と情報共有の関係を検討するためにランダムウォーク戦略、ランデブーポイント戦略、メッシュ隊列戦略を導入する。ランダムウォーク戦略は非組織的な戦略であり、救助活動エージェント間で間隔をとりながら搜索し、救出ポイントの情報を受け取り次第、それぞれの救助活動エージェントが救出ポイントに向かう戦略である。ランデブーポイント戦略は広域の搜索を重視した戦略であり、アドホック通信の通信範囲を越えて救助活動エージェントが被災エリア全体に広がって搜索した後、ランデブーポイントに戻ってきて情報共有を行う。メッシュ隊列戦略は情報共有を重視した戦略であり、アドホック通信がつねに途切れないように狭い範囲でメッシュ状に隊列を展開しながら搜索を行う。

3.1 被災エリア

被災エリアはトーラス状の 2 次元セルモデルで表す。セル間の距離はマンハッタン距離で定義される。救助活動エージェントと救出ポイントはこのセル上に配置される。

3.2 救助活動エージェント

救助活動エージェント A_i ($i = 1, \dots, n$) は、各ステップで戦略 $Strategy_i$ に従って上下左右の隣接するセルに移

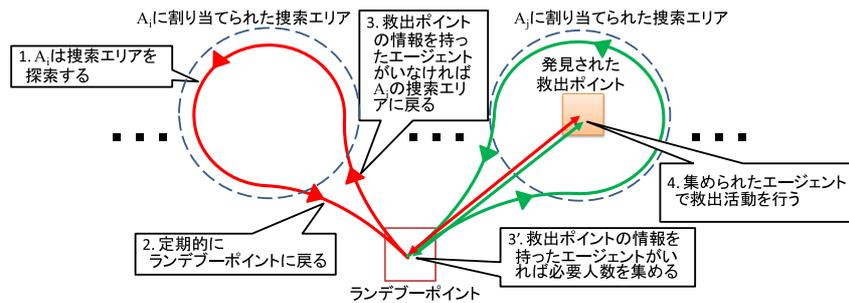


図 2 ランデブーポイント戦略
Fig. 2 Rendezvous point strategy.

動するか、そのセルにとどまる。救助活動エージェントはアドホック通信により通信距離 r_i 以内にいるエージェントと通信が可能である。また、直接通信が可能でない救助活動エージェントであっても、通信可能な救助活動エージェントを経由することで情報共有することができる。共有される情報には、救助活動エージェントの位置と、救出ポイントの位置と救出に必要な人数である。

シミュレーションの開始時点では救助活動エージェントは同一のセルにいる。救助活動エージェントは通信可能な救助活動エージェントと毎ステップ、情報共有を行う。

3.3 救出ポイント

救出ポイント R_j ($j = 1, \dots, m$) は被災エリアにランダムに存在している。救助活動エージェントはこの救出ポイントを発見して、救出活動を行う必要がある。救助活動エージェントは同一セルに救出ポイントがあるときに確率 p で発見する。救出活動は救出ポイントを発見している状態で、必要人数 t_j 以上の救助活動エージェントがいるときに行われる。救出活動を終えるためにはコスト c_j で定められたステップ数だけそこにとどまる必要がある。

3.4 ステップ進行

各ステップで以下の手順で処理される。

1. 救助活動エージェントの位置に基づき救出ポイントの状態を更新する。未発見の救出ポイントと同一セル上に救助活動エージェントがいる場合は確率 p で発見される。発見済みの救出ポイントと同一セルに、必要人数以上に救助活動エージェントがいる場合はコストを 1 減らす、コストが 0 になったら救出完了にする。
2. 通信距離 r_i に基づいて情報共有可能な救助活動エージェント間で情報を共有させる。
3. 救助活動エージェントを戦略 $Strategy_i$ に基づき移動させる。

3.5 戦略

3.5.1 ランダムウォーク戦略

ランダムウォーク戦略は非組織戦略であり、救助活動

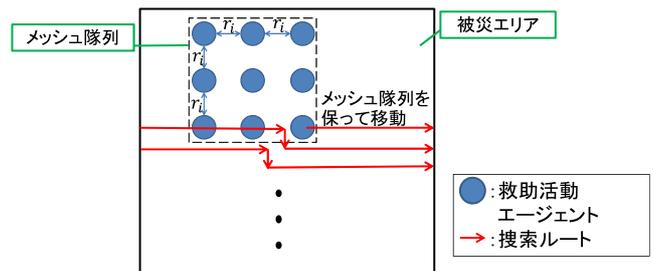


図 3 メッシュ隊列戦略
Fig. 3 Serried ranks strategy.

エージェントはランダムに動いて救出ポイントを探索する。救助活動エージェントは、他の救助活動エージェントが $interval_i$ より近くにいる場合は、移動かその場にとどまるかのうち、最も間隔が大きくなる選択を行う。つまり、 $interval_i$ を大きくすると、分散して探索することになる。

救助活動エージェントは救出ポイントの情報を受け取ると、最も近い救出ポイントに向かう。救出ポイントに到着した後は、必要人数がそろってなくても、救出活動が完了するまでその場にとどまり続ける。

3.5.2 ランデブーポイント戦略

ランデブーポイント戦略は広域搜索を重視した組織戦略である (図 2)。この戦略では各救助活動エージェントに搜索エリアを割り当てる。また、情報共有を行うためのランデブーポイントのセルを決める。救助活動エージェントは搜索エリアの搜索し、情報共有のために周期的にランデブーポイントに戻る。救出ポイントを発見している場合は、ランデブーポイントにとどまり、必要人数を集めて、救出ポイントに向かう

3.5.3 メッシュ隊列戦略

メッシュ隊列戦略は情報共有を重視した組織戦略であり、長方形に救助活動エージェントを配して搜索を行う情報共有を重視した戦略である (図 3)。救助活動エージェントは通信距離 r_i 分だけ他の救助活動エージェントと間隔をとり、長方形に隊列を組む。そして、その隊列を保ちながら移動して搜索を行う。移動ルートは水平方向に 1 周搜索したのちに、垂直方向に 1 歩移動して、再び水平方向の搜索を行う。また、移動と待機を繰り返す、隊列は半分の

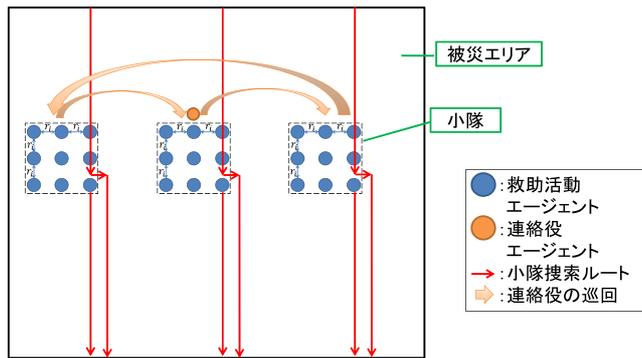


図 4 小隊戦略
Fig. 4 Platoon strategy.

速度で進む。

救出ポイントを発見した場合は必要人数分だけ救助活動エージェントが隊列を離れて救出活動を行う。救出活動を完了した後に、隊列に復帰する。隊列の捜査はスケジューリングされているので、通信範囲外でも隊列の位置は分かるものとする。また、隊列は半分の速度で進んでいるので追いつくことができる。

3.5.4 小隊戦略

小隊戦略はランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略の特徴を組み合わせた組織戦略である。この戦略は救助活動エージェントを複数の小隊と連絡役に分ける。それぞれの小隊はメッシュ隊列を組み、小隊間は等間隔に距離を空けて捜査を行う(図 4)。メッシュ隊列戦略と同様に移動はスケジューリングされており、また半分の速度で進むので、救出活動のために離れたとしても隊列に復帰することができる。移動ルートは垂直方向に1周した後に水平方向に1歩ずれて、再び垂直方向に進むものとする。救出ポイントを発見した場合、その必要人数が小隊の人数で足りる場合は、人数が集まり次第、救出活動を開始する。救出ポイントの必要人数が小隊の人数を上回る場合は、他の小隊に応援を求める。

連絡役のエージェントは小隊を順に回って、応援を求めている小隊がないかを確認する。小隊の位置はスケジューリングされているので、分かるものとする。小隊の救助活動エージェントと情報共有ができた時点で、次の小隊に向かう。ただし、小隊が救助活動中のために、スケジューリングされた位置に連絡役が行っても小隊の救助活動エージェントがない場合がある。その場合は、その小隊がスケジューリングされているように移動して、小隊の救助活動エージェントが捜査に復帰するのを待つ。

応援を求めている小隊は連絡役のエージェントと情報共有した後、対象の救出ポイントに向かい、応援が来るのを待つ。連絡役は次の小隊に向かい、応援に向かうように指示を出す。応援に向かう小隊は小隊内で情報共有が済んだ時点で応援に向かう。

4. 組織戦略のない場合でのアドホック通信を使った救助活動の実験

ここでは、組織戦略を持たずにアドホック通信を使った救助活動を行った場合にどのような結果をもたらすかを明らかにする。組織戦略を持たない救助活動エージェントを表すためにランダムウォーク戦略を使用する。ここでは以下の3つの視点で比較する。

- (1) 通信距離に制限があるアドホック通信と通信距離に制限のない従来の通信方法
- (2) 広域捜査を重視する場合と情報共有を重視する場合
- (3) 救出ポイントの必要人数

(1) は従来の通信方法と比較してアドホック通信を利用した場合、救助活動にどのような影響をもたらすのかを確認する。(2) は捜査と情報共有のトレードオフの影響を確認することを目的としている。ランダムウォーク戦略は $interval_i$ を大きくすることで分散しやすくなり、捜査を重視した救助活動になる。(3) の救出ポイントの必要人数は、多い場合はそれだけ多くの救助活動エージェントとの情報共有が求められるようになる。

4.1 実験設定

パラメタの設定は以下のとおりである：被災エリアのサイズは 50×50 ；救助活動エージェントの数 (n) = 20；救出ポイントの数 (m) = 20；救出ポイントの発見確率 (p) = 0.10；救出ポイントのコスト (c_j) = 100；通信距離 r_i はアドホック通信を想定した場合は5、通信距離に制限のない想定の場合は ∞ ；ランダムウォーク戦略の $interval_i$ は0から5；救出ポイントの必要人数は2または5とする。これらのパラメタはシミュレーションの性質を観測しやすい値に設定した。ただし、これ以外の値であってもおおむね性質は同じである。

ランダムウォーク戦略は救出ポイントの情報を得た場合、救出ポイントに向かい、必要人数がそろうまで待ち続ける。そのため、すべての救助活動エージェントが待ち状態になって、救助活動が進まない状態になる場合がある。この場合、救助活動は失敗したとする。

4.2 実験結果

図 5 と表 1 に実験結果を示す。図 5 は必要人数を2と5の条件下で、 $interval_i$ を0から5まで変化させた場合の、救出ポイントをすべて完了させるまでにかかったステップ数である。それぞれ、1,000回シミュレーションを行い、失敗を除いた結果を平均している。表 1 は通信距離が5の場合の必要人数が5における失敗したシミュレーションの割合である。それ以外の場合には、失敗は1回もない。

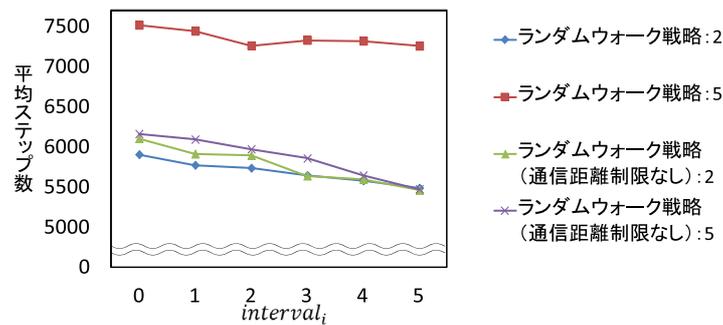


図 5 ランダムウォーク戦略の $interval_i$ ごとの平均完了ステップ数 (凡例の数字は必要人数)

Fig. 5 Steps required to save all the victims with the random walk strategy.

表 1 通信距離 5, 必要人数 5 のときの $interval_i$ ごとの失敗の割合

Table 1 Failure rate when the necessary number of rescue agents is 5.

	0	1	2	3	4	5
失敗割合(%)	9.2	9.3	9.4	9.1	10.9	13.3

4.3 考察

通信距離 5 の場合と通信距離の制限がない場合を比べると、必要人数による影響が通信距離 5 の場合のほうが大きい。これは、通信距離に制限のあるランダムウォーク戦略では、多くの人数との情報共有がうまく行えず、必要人数を集めるのが難しいことを示している。

$interval_i$ は救出活動エージェントの分散度合いを決めており、この値が大きくなると分散して、アドホック通信を使った救助活動では搜索を重視していることになる。通信距離に制限がない場合は、情報共有ができないということがないため、 $interval_i$ が大きくなるほど完了ステップ数は短くなっている。通信距離 5 の場合も必要人数が 2 の場合は $interval_i$ が大きくなるほど完了ステップ数は短くなっている。一方で、必要人数が 5 の場合はほぼ横ばいである。また、表 1 の失敗割合を見ると $interval_i$ が大きくなると失敗の割合が増えている。あわせて考えると分散したほうが悪い結果になっている。つまり、多くの人数との情報共有が必要な場合は分散しないほうが良いことが分かる。

以上より、アドホック通信を使った救助活動では救助活動エージェントが自律的に行動してしまうと、通信距離に制限がない場合と比べて、救助活動が失敗しやすい。そのため、アドホック通信を使った救助活動には組織戦略が必要である。

5. 広域搜索を重視した組織戦略と情報共有を重視した組織戦略の実験

ここでは 2 つの組織戦略、ランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略の評価を行う。ランデブーポイント戦略は広域の搜索を重視する戦略であり、メッシュ隊列戦略は情報共有を重視する戦略である。これらの 2 つの戦略の評価からアドホック通信を使った効果的な救助活動戦略について検討する。

5.1 実験設定

パラメタ設定は 4 章の実験と通信範囲以外は同じである。ランデブーポイント戦略はランデブーポイントで情報共有するため通信範囲は 0 とする。メッシュ隊列戦略では通信範囲を 0 から 9 までそれぞれについてシミュレーションを行う。

5.2 実験結果

図 6, 図 7 に実験結果を示す。それぞれ 1,000 回のシミュレーションを平均している。図 6 は通信距離による、すべての救出ポイントの救出活動を完了するためにかかるステップ数の変化を表している。メッシュ隊列戦略は通信距離分だけ救出活動エージェント間隔をあけるので、図 6 の横軸はメッシュ隊列戦略については救助活動エージェントの間隔ともいえる。一方でランデブーポイント戦略は、ランデブーポイントで情報共有することになっているので、通信距離にかかわらず一定とする。図 7 は各ステップでの救出活動を完了した救出ポイントの累積数である。これは救出ポイントの必要人数が 5 のときの結果であるが、必要人数が 2 のときも傾向は変わらない。

5.3 考察

図 6 よりそれぞれの戦略の必要人数が 2 の場合と 5 の場合を比べると、その差はランダムウォーク戦略の場合と比べて少ないことが分かる。つまり、これらの組織戦略により多くの救助活動エージェント間で情報共有が可能になっている。

また、図 6 よりメッシュ隊列戦略は通信距離が大きくなるほど性能が良くなっていることが分かる。これは通信距離が大きくなれば、救助活動エージェントがそれだけ広がり、搜索範囲が広がるからである。

図 6 のランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略を比

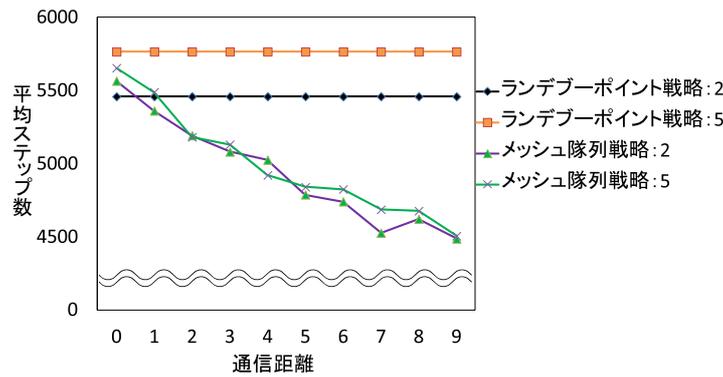


図 6 ランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略の通信距離ごとの、すべての救出ポイントの救出活動を完了するまでの平均ステップ数 (凡例の数字は必要人数)

Fig. 6 Steps to save all the victims with the rendezvous point and the serried ranks strategy.

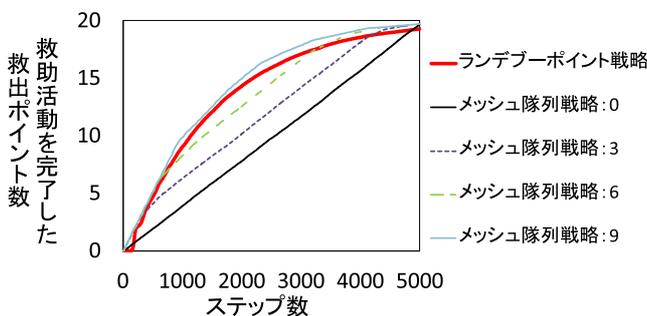


図 7 ランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略の各ステップにおける救出活動が完了した救出ポイントの累積数の平均 (凡例のメッシュ隊列の数字は通信距離)

Fig. 7 Cumulative number of saved victims at each step with the rendezvous point and the serried ranks strategy.

べるとほとんどの場合においてメッシュ隊列戦略が上回っている。しかし、図 7 を見るとランデブーポイント戦略と大きな差があるメッシュ隊列戦略でも、ランデブーポイント戦略が上回っている部分がある。これは、ランデブーポイント戦略では救助活動エージェントが被災エリア全体に広がるため、救出ポイントを多く発見できるからである。

一方で、残りの救出ポイントが少なくなってくると、ランデブーポイントに戻る時間がボトルネックとなってしまっている。メッシュ隊列戦略は救出ポイントを発見すると、すぐに対応できているので情報共有のボトルネックの影響がない。

ゆえにランデブーポイント戦略は早期に多くの救出ポイントで救助活動を完了するのに有利で、メッシュ隊列戦略はすべての救出ポイントで救助活動を完了するのに有利である。つまり、以上のことから 2 点の知見が得られる。

1. 多くの救出ポイントを発見するためには全体に広がる方が良い。
 2. 救出ポイントが少なくなると情報共有のコストを抑えたほうが良い。
- 多くの救出ポイントを見つけるためには全体に広がる必

要がある。しかし、そのために情報共有のコストがかかってしまうと、救出ポイントが少なくなる後半ではコストに見合わなくなってしまう。つまり、全体に広がりながら、情報共有のコストを抑えることができる組織戦略を提案する必要がある。

6. ランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略の特徴を組み合わせた組織戦略の実験

ここでは先のランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略の実験で得られた知見に合致する組織戦略である小隊戦略の実験を行う。この戦略は救助活動エージェントをいくつかの小隊と連絡役に分ける。小隊に属する救助活動エージェントは通信が可能にするが、小隊間は通信ができないほど間隔を空ける。連絡役は小隊間を巡回して小隊間の情報共有を行う。

各小隊は全体に広がり探索を行う。こうすることにより、探索範囲が広がるため多くの救出ポイントを発見することができる。

一方でそれぞれの小隊はメッシュ隊列を組んで探索することにより、救出ポイントの必要人数が小隊の人数より小さい場合はすぐに対応することが可能である。つまり、情報共有は即座に行える小隊内の救助活動エージェントだけで済むので、コストがかからない。ただし、救出ポイントの必要人数が小隊の人数より大きい場合は他の小隊とその情報共有を行い、応援を呼ぶ必要がある。その場合は小隊間を巡回している連絡役を経由して情報共有を行う。つまり、連絡役が動くランデブーポイントとなることで、情報共有のコストを抑えることができる。

6.1 実験設定

小隊戦略を評価するためにこれまでの実験よりも、シミュレーションの規模を大きくしている。また、救出ポイントの必要人数は小隊戦略の性能に大きく関わってくるので、必要人数は小隊の人数で処理できるものと複数の小

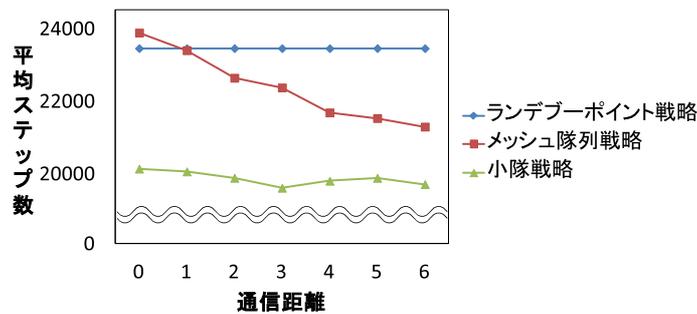


図 8 3つの戦略の通信距離ごとの、すべての救出ポイントの救出活動を完了するまでの平均ステップ数 (凡例の数字は必要人数)

Fig. 8 Steps to save all the victims with three strategies.

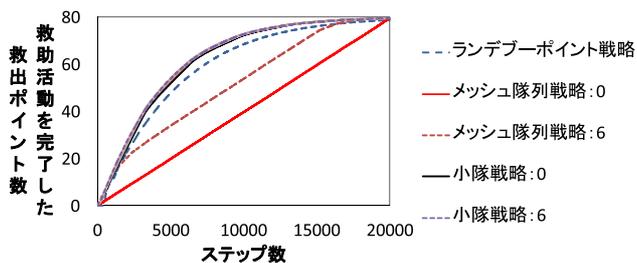


図 9 3つの戦略の各ステップにおける救出活動が完了した救出ポイントの累積数の平均 (凡例の数字は通信距離)

Fig. 9 Cumulative number of saved victims at each step with three strategies.

隊が必要なものを織り交ぜる。また、比較のためにランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略を同じ設定でシミュレーションを行う。パラメタ設定は以下のとおりである：被災エリアのサイズは 100×100 ；救助活動エージェントの数 (n) = 25；救出ポイントの数 (m) = 80；救出ポイントの発見確率 (p) = 0.10；救出ポイントのコスト (c_j) = 100；通信距離 r_i は 0 から 6 まで、それぞれについてシミュレーションを行う；それぞれの救出ポイントの必要人数は 2 から 8 までランダムに決める。

小隊戦略は 4 人の救助活動エージェントで構成される小隊 6 つと、連絡 1 人でシミュレーションを行う

6.2 実験結果

図 8, 図 9 に実験結果を示す。それぞれ 1,000 回のシミュレーションを平均している。図 8 は通信距離ごとに、すべての救出ポイントの救出活動を完了するまでにかかったステップ数を平均したものである。図 9 は各ステップにおける救助活動を完了した救出ポイントの累積数の平均である。

6.3 考察

図 8 から小隊戦略はランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略を超える性能があることが分かる。これは小隊が被災エリア全体に広がり、早期の救出ポイントの発見を行っていることを示している。

一方で図 9 を見てみると小隊戦略は通信距離にかかわらずメッシュ隊列を超えていることが分かる。つまり、未発見の救出ポイントが少なくなった後半においても、ランデブーポイント戦略のように情報共有のボトルネックが発生せず、順調にすべての救出ポイントでの救助活動を完了できていることを示している。

つまり、小隊戦略は先の実験で得られた 2 つの知見を活かしている戦略になっているといえる。

7. おわりに

本稿はアドホック通信を使った救助活動の戦略について検討した。これには搜索と情報共有の間にトレードオフの関係がある。搜索を重視して広域に救助活動者が展開してしまうと、通信が届かなくなり情報共有が行えなくなる。一方で、情報共有を重視して局所的に救助活動者が展開すると、広域の搜索が行えなくなってしまう。ゆえにアドホック通信を使った救助活動のための組織戦略が必要になる。

まず、我々は救助活動者が組織戦略を持たず自律的に行動するとどういった事態になるかをシミュレーションした。実験の結果から、通信インフラが使える場合に比べると、アドホック通信を使った救助活動では自律的な行動により遅れをもたらす、致命的な状況をもたらす可能性が明らかになった。

次に 2 つの組織戦略の評価を行った。これは広域の搜索を重視するランデブーポイント戦略と情報共有を重視するメッシュ隊列戦略である。実験の結果、前半に多くの救出ポイントを発見するには広域に広がるランデブーポイント戦略が良く、後半に救出ポイントが少なくなってくると情報共有のボトルネックがないメッシュ隊列戦略の方が良い。すなわちアドホック通信を使った救助活動の組織戦略では以下が重要である：

1. 多くの救出ポイントを発見するためには全体に広がるほうが良い。
2. 救出ポイントが少なくなると情報共有のコストを抑えたほうが良い。

この2つの性質を満たす戦略として小隊戦略を提案した。これは救助活動エージェントを複数の小隊に分けて、小隊が全体に広がることで早期に多くの救出ポイントを見つけることができる。一方で、救助活動を行うための必要人数が小隊の人数で足りる場合は、情報共有を小隊の中だけで行い、それ以上に人数が必要な場合が連絡役のエージェントが情報共有を行うことで、情報共有のコストを最小限に抑えている。結果からランデブーポイント戦略とメッシュ隊列戦略を上回る成果を確認した。

次の段階として、地理的な制約下でいかにして組織戦略を実現するかについて検討する。これには災害地の道路とその損壊に加えて、通信距離や電波上の制約も含まれる。本稿から小隊戦略を実現することが望ましいが、制約上困難であればほかの2つの戦略についても検討する。また、通信距離や電波上の制約は様々な条件について検討することで、通信機器や通信プロトコル決定の参考にできるようにする。

謝辞 本研究は文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成21年～平成25年）により実施している。

参考文献

- [1] 内閣府：首都直下地震対策，入手先
(http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_syuto/syuto.top.html).
- [2] 内閣府：阪神・淡路大震災教訓情報資料集，入手先
(http://www.bousai.go.jp/1info/kyoukun/hanshin_awaji/).
- [3] 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，ライフライン施設の被害と復旧（1997）.
- [4] 総務省：第1部東日本大震災における情報通信の状況，平成23年版情報通信白書（2011）.
- [5] 河田恵昭：大規模地震災害による人的被害の予測（阪神・淡路大震災〈特集〉），自然災害科学，Vol.16, No.1, pp.3–13（1997）.
- [6] 関東総合通信局：「首都圏直下地震発生時の帰宅困難者等の避難誘導に資するアドホック無線ネットワークの構築に関する調査検討会」報告書，入手先 (<http://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/286922/www.soumu.go.jp/soutsu/kanto/stats/data/chosa/chosa18-2/index.html>).
- [7] 兵庫県警察本部：阪神・淡路大震災警察活動の記録：都市直下型地震との闘い（1996）.
- [8] 寺野隆雄：エージェント・ベース・モデリング：その楽しさと難しさ，計測自動制御学会，計測と制御，Vol.43, No.12, pp.927–931（2004）.
- [9] 寺野隆雄：エージェント・ベース・モデリングの技術と応用，計測自動制御学会システム工学部会，経営情報学会合同シンポジウム「社会シミュレーションの技術敵動向と実務的課題」資料，pp.1–8（2006）.
- [10] Sugiyama, H., Tsujioka, T. and Murata, M.: Coordination of Rescue Robots for Real-Time Exploration over Disaster Areas, *Proc. 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, pp.170–177（2008）.
- [11] Johansson, P., Larsson, T., Hedman, N., Mielczarek, B. and Degermark, M.: Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks, *Proc. 5th annual ACM/IEEE International Conference on*

- Mobile Computing and Networking*, pp.195–206（1999）.
- [12] Zussman, G. and Segall, A.: Energy Efficient Routing in Ad Hoc Disaster Recovery Networks, *Ad Hoc Networks*, Vol.1, No.4, pp.405–421（2003）.
- [13] Aschenbruck, N., Gerhards-Padilla, E. and Martini, P.: Modelling Mobility in Disaster Area Scenarios, *Performance Evaluation*, Vol.66, No.12, pp.773–790（2009）.



高橋 徹（正会員）

平成18年東京理科大学理学部数理情報学科卒業。平成23年東京工業大学総合理工学研究科知能システム科学専攻博士後期課程修了。同年より関西学院大学博士研究員。博士（工学）。主として社会シミュレーション，ヒューマンインタフェースに関する研究に従事。人工知能学会，ヒューマンインタフェース学会，科学教育学会各会員。



北村 泰彦（正会員）

昭和35年8月25日生。昭和58年3月大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和63年3月同大学大学院基礎工学研究科物理系専攻（情報工学分野）博士課程修了。工学博士。同年4月大阪市立大学工学部電気工学科助手。同大学情報工学科講師，助教授を経て，平成15年より関西学院大学理工学部情報科学科教授。マルチエージェントシステム，インタフェースエージェント，Webインテリジェンスに関する研究に従事。電子情報通信学会フェロー，IEEE，ACM，AAAI，人工知能学会，システム制御情報学会各会員。



已波 弘佳（正会員）

平成4年東京大学理学部数学科卒業。同年NTT入社。以来，通信ネットワーク設計・制御・性能評価，およびグラフ理論・最適化理論とその応用に関する研究開発に従事。平成14年関西学院大学理工学部情報科学科専任講師，現在，同大学教授。平成12年京都大学博士（情報学）。平成9年回路とシステム軽井沢ワークショップ奨励賞，平成24年電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞各受賞。