

RoboCupRescue における 最少通話による協調の実現

森本 武資 河野 健二 竹内 郁雄

1 はじめに

マルチエージェントシステムの研究では、対象が非常に限定されたトイ的な問題をテストベッドとする場合が多い。トイ的な問題における研究は、問題の本質をとらえやすいが、成果を実際的な問題に適用していくという欠点を併せ持つ。マルチエージェントシステムに関する実際的な問題を研究するためには、様々な事象を対象とするオープンな問題を扱うことが重要である。筆者らは、大規模災害シミュレーションを扱う RoboCupRescue シミュレーション・プロジェクトに参加し、多種類のエージェントが多数活動するマルチエージェントシステムの開発に取り組んでいる。現在、シミュレーションシステムのプロトタイプが開発され、この上で救助活動を行うエージェントの研究が可能になった。しかし、同エージェントの研究が進むにつれ、一見複雑な同システムが実はトイ的な問題に帰着できることが分かり、オープンな問題が本質的に抱える、問題設定と実装の難しさを改めて示す結果となった。本稿では、同システムの概要を示し、筆者らのエージェントの協調を述べ、筆者らのこれまでの成果を紹介する。

2 RoboCupRescue プロジェクト

RoboCupRescue プロジェクトは、大規模災害に対してロバストな社会を創ることを最終目標とするプ

ロジェクトである [1]。現在、シミュレータ上の仮想的な災害空間で活動するエージェントを研究するシミュレーション・プロジェクトと、災害現場で実際に活動するロボットなどを研究するロボティクス & インフラストラクチャ・プロジェクトが進められている。

シミュレーション・プロジェクトが開発している大規模災害シミュレーションシステムは、マルチエージェントシステムのテストベッドとして利用可能な段階に入った。2001 年 4 月に福岡で開催された RoboCupRescue JapanOpen を皮切りに、2001 年 7 月の RoboFesta 関西、8 月の RoboCupRescue2001 in USA において、同システム上で活動するエージェントの救助能力を評価するための競技会が開催された。シミュレーション・プロジェクトは、同システムを発展させることにより、防災情報インフラと結合させ、実際の災害情報とシミュレーションを融合したシステムにし、より有効な意思決定支援に役立てることを目標としている。

3 エージェントの活動目的と災害空間

大規模災害シミュレーションシステムで活動するエージェントには、市民、救急隊、消防隊、道路の寸断を修復する道路啓開隊、通信を行う救急、消防、啓開各隊の司令部の 7 種類がある。エージェントの活動目的は死者数を最小にすることであり、同異種のエージェントが協調することで負傷者を救助する。

同システムは災害発生直後の市街地をシミュレートする。この市街地を災害空間と呼ぶ。死傷の主な原因には埋没と火災が挙げられる。震災直後には家屋

Takeshi Morimoto, 電気通信大学 情報工学科

Kenji Kono, 電気通信大学 情報工学科

Ikuro Takeuchi, 電気通信大学 情報工学科

が倒壊し多数の市民が閉じ込められ負傷する。更に、家屋から逃げられず火に巻き込まれれば、致命的なダメージを被る。救急隊は一刻も早く負傷者を見つけ出し救助しなければならないが、道路は瓦礫などで寸断されており、負傷者の所まで移動できない。負傷者の救出には、まず道路啓開隊が啓開活動により救急隊と消防隊の移動経路を確保し、消防隊が消火活動により負傷者が火に巻き込まれるのを防ぐ必要がある。

エージェントは同異種間で協調する必要があるが、個々のエージェントの視覚能力と通信能力は非常に制限されており、エージェントは限られた情報だけで協調を実現しなければならない。加えて、災害空間はダイナミックに変化する。負傷者は徐々に消耗し、火災は急激に広がり、他のエージェントは動きまわる。つまり、行動の対象自体が時々刻々と変化する。エージェントは、行動対象の変化に応じて、活動と協調のプランを柔軟に変更できなければならない。

4 大規模災害シミュレーションシステム

4.1 構成と処理

シミュレーション・プロジェクトが開発している大規模災害シミュレーションシステムは、複数のモジュールから構成される(図 1)。モジュールには、個々の災害をシミュレートする Sub-simulator、災害空間の地理情報を与える GIS (Geographical Information System)、災害空間の状況を視覚化する Viewer、これらを統合する Kernel がある。個々のエージェントも、システムを構成するモジュールの一つとして位置づけられる。

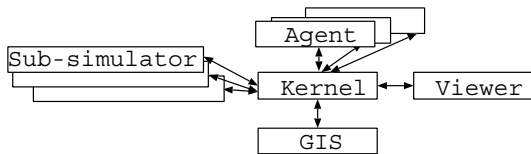


図 1 シミュレーションシステムの構成

災害空間のシミュレーションは 1 分刻みで進行する。災害空間上の 1 分を 1 ターンと呼ぶ。エージェントは 1 ターン毎に、周囲の状況を知覚し、行動を決

定し、それをシステムに伝える。行動は次のターンに反映される。具体的には、以下の繰り返しによって、シミュレーションが進行する。

1. Kernel が個々のエージェントに視覚情報を送る
2. エージェントが Kernel に行動内容を伝える
3. Kernel が行動内容を Sub-simulator に送る
4. Sub-simulator が更新結果を Kernel に伝える
5. Kernel が統合結果を Sub-simulator に送る
6. 災害空間の時間を 1 分進める

エージェントは視覚情報を受けてから 1 ~ 2 秒以内に行動を決定しなければならない。

4.2 災害空間のモデルと問題点

災害空間は建物や道路、人間等のオブジェクトの集合として表現され、個々のオブジェクトは複数のプロパティを持つ。災害空間は 500 m 四方の市街地であり、約 2500 個のオブジェクトによって構成される。

オブジェクトには、一般家屋、避難所、各隊の司令部といった建物オブジェクト、道路とその端点を表すオブジェクト、川とその端点を表すオブジェクト、市民、救急隊、消防隊、道路啓開隊、車といった移動物体オブジェクト、災害空間の場所や風向き等を表す世界オブジェクトがある。しかし、全 15 種類のうち、世界、川、川の端点、車の 4 種類は実質的には使用されない。災害空間上に存在するのは、建物と道路、人間だけである。

建物には 13 個のプロパティがあり、道路には 15 個、人間には 8 個あるが、システムにより実装され、かつエージェントの問題解決に必要なプロパティはわずかである(表 1)。

表 1 問題解決に必要なプロパティ

オブジェクト	プロパティ
建物	位置, 燃焼度, 面積
道路	位置, 幅, 閉塞幅, 車線数
人間	現在地, 生命力, 負傷度, 埋没度

災害空間の仕様は複雑だが、その複雑さには問題設定を豊かにするという点において有意味とはいえない部分がある。加えて、複雑な仕様が開発が追いつ

表 2 エージェントの能力

種類	能力
市民	Sense, Hear, Move(Route), Say(String)
救急隊	Sense, Hear, Move(Route), Say(String), Tell(String), Rescue(Human), Load(Human), Unload
消防隊	Sense, Hear, Move(Route), Say(String), Tell(String), Extinguish(Building)
道路啓開隊	Sense, Hear, Move(Route), Say(String), Tell(String), Clear(Road)
救急隊司令部	Hear, Say(String), Tell(String)
消防隊司令部	Hear, Say(String), Tell(String)
道路啓開隊司令部	Hear, Say(String), Tell(String)

かず、現在開発中のプロトタイプ・シミュレーションシステムの実装は不安定である。不安定な実装の上では、協調以前に、単体で活動できるエージェントの実現すら難しく、実際、筆者らがエージェント開発に要した労力の大半は、単体行動の実現のために費された。

このような問題設定の難しさや、それに付随するシステムの安定性の問題は、オープンな事象を扱うマルチエージェントシステムが本質的に抱える問題である。RoboCup サッカー [2] でも、我々はこれと同じ問題に直面したが、その際もやはり、協調の前に、まず単体の行動能力の向上が必要であるという認識に立ち、世界トップクラスのサッカー・エージェントを開発した [3]。複雑な問題設定の中では、マルチエージェントの協調について、トイ的な問題をテストベッドとするのとはまったく別の苦労がある。

4.3 エージェントのモデル

個々のエージェントは、数人の人間の集まりを表している。市民は家族を、救急、消防、道路啓開隊は小隊を、司令部はそこで働く人達の集まりである。災害空間上では、72 家族の市民と、5 隊の救急隊、10 隊の消防隊、10 隊の道路啓開隊、そして司令部が各 1 棟活動する。

エージェントは、行為とその対象をシステムに伝えることにより行動を起こす。ある経路 *route* に沿って移動するには、*Move(route)* をシステムに伝える。経路は道路や建物のリストで表現する。同様に、人間 *human* の救助は *Rescue(human)*、救急車への乗せ降ろしは *Load(human)*、*Unload*、火災 *building* への放水は *Extinguish(building)*、道路 *road* の啓開は *Clear(road)* をシステムに伝える (表 2)。

エージェントが情報を獲得する手段には、視覚と通信がある。個々のエージェントは、火災と半径 10m 以内の建物や道路、他のエージェントなどを視覚でき、肉声と電気通信による通信ができる。肉声は話者から半径 30m 以内にいるエージェントに聞こえ、小隊による電気通信は同種の小隊と司令部に伝わる。司令部による電気通信では、他種の司令部にもメッセージが伝達される (図 2)。個々のエージェントの発話

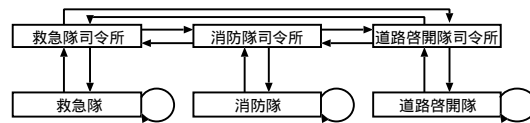


図 2 電気通信の流れ

と聞き取りはそれぞれ 1 ターンに 4 メッセージに限られている。聞き手は、届いたメッセージの中から 4 つを話者によって選別し、内容を聞き取ることができる。1 つのメッセージの情報量は、1 センテンス程度に制限されている。小隊と司令部の通信回数の制限が同じであるのは一見すると不自然だが、実際に東京消防庁に置かれている通報用の電話の台数が 10~20 台程度であることを考えれば、妥当な問題設定である。

しかしながら、エージェントの通信能力の制約は非常に厳しい。メッセージの伝達には 1 ターンの遅延がある上に、肉声は伝えられる対象が限られており、電気通信はメッセージの到達率が低いからである。

遅延は同種の小隊間ならば許容範囲だが、異種小隊間の電気通信の伝達経路は、話者 同種司令部 異種司令部 異種小隊と長く、3 ターンもの遅延が生じる。

肉声ならば、異種小隊間でも遅延を 1 ターンに抑

えられるが、半径 10m の視野では他のエージェントの位置の把握が難しい上に、30m の肉声伝達範囲では声が届く前に移動してしまっている場合が大半である。肉声による通信は、埋没した市民、や司令所のような動かない聞き手に対してのみ有効であるといえる。

電気通信には、話すメッセージが多い程、聞き手がメッセージを聞く確率が低くなるという、通信量と到達率のジレンマがある。例えば、消防隊 10 隊と消防隊司令所 1 棟がそれぞれ 4 回電気通信した場合、次のターンには、各消防隊に 40 ものメッセージが届く。消防隊が内容を聞き取れるのは 4 メッセージだけであるから、届いたメッセージの 10% しか聞き取れないことになる。したがって、重要なメッセージを聞き逃さないためには、各エージェントが、最小限しか話さないようにする必要がある。

5 実現したエージェント

5.1 単体の行動能力の向上

複数のエージェントが協調的活動を行うためには、個々のエージェントが基礎的な行動を確実に遂行できる能力を備える必要がある。RoboCupRescue における基礎能力とは、迅速な移動能力である。筆者らは、通過可能性に基づいた経路探索により到達確率の高い経路を構成することで、迅速な移動を実現した。これには災害空間の以下の性質を利用した。

- 一度通過した経路は渋滞を除き確実に通過できる
- 閉塞は道路毎に判定されるため、未確認道路数が少い程、閉塞遭遇率が低くなる
- 車両は高速に移動できるため、移動距離を考慮しなくてよい

経路構成の方針は、まず通過可能を確認した道路のみで構成を試み、次に未確認道路数最少の経路の構成を目指す。それでも目的地までの経路が見つからなければ、閉塞も含む経路を構成する。このアルゴリズムは、最良優先探索に、以下のコスト関数(式 1)を与えることで実現できる。ここで、 M は最大経路長より大きな値とする。

$$\text{costFunc}(\text{Road}) = \begin{cases} 1 & \text{通過可能} \\ M & \text{未確認} \\ M^2 & \text{閉塞} \end{cases} \quad (1)$$

こうして得られた経路上の移動を繰り返すことで、エージェントは閉塞状況をリアルタイムに学習しながら、その時点で知り得る最良の経路を移動する。

5.2 救急隊

死傷者に直接関わる救急隊の活動は非常に重要である。多数の市民が倒壊家屋に埋もれているのに対し、救急隊は 5 隊しかいない。救急隊は、救助活動の効果を最大限に引き出すために、負傷の程度によって負傷者を選別し、生命の危機に瀕している負傷者を最優先に救助する“トリアージ”[4]に基づいて活動する。具体的には、負傷者を以下の 4 段階に分けて救助する。

1. 即救助 ... 救助しないと助からない
2. 救助 ... 自力で避難はできないが当面生き残れる
3. 救助不要 ... 自力で避難できる
4. 救助断念 ... 救助しても助からない

救急隊は「即救助」「救助」の負傷者を発見した時のみ救助を始め、「救助不要」「救助断念」の負傷者を発見しても探索を続ける。同じ場所に複数の負傷者がいる場合には、まず「即救助」の救助を優先する。優先度が同じ場合には、确实のため、埋没度の少い負傷者の救助を優先する。

負傷者は時々刻々と消耗し傷も深くなるため、迅速な救出活動が必要である。救出にかかる時間を短縮するためには、救助能力を集中させなければならない。救急隊は、「即救助」「救助」の優先度をもつ負傷者を発見した時に、電気通信によって他の救急隊に報告し、報告を受けた救急隊はその場所に駆けつける。複数の報告が同時に届いた場合には、迅速に到達できる場所にいる負傷者の方に駆けつけ、別の負傷者の救助中に報告を受けた場合は、移動せず救助を続ける。この協調により、負傷者を救出できる確率が向上する。

5.3 消防隊

火災は状態が急激に変化するため、特に素早い対応が必要な災害である。ごく初期の火災は 1 隊の消防

隊でも消火可能だが、それ以降は多数の消防隊による集中放水が必要となる。消防隊には、目的の火災に即座に移動できる能力が強く求められる。また、災害空間には同時に複数の火災が発生するため、火災の状態を見極め、放水を適切に振り分けなければならない。

通信は遅延を伴うため、急変する火災への放水の分散を、通信で実現することは難しい。各自の判断で迷わず消火に取り組む方が効果的だと考えられる。火災は視界に関係なく見られるため、全ての消防隊は、火災自体の状態とその周囲の火災状況の認識を共有している。個々の消防隊は、これらを基に打ち立てた消火戦略を軸に、通信を使わない暗黙の協調を実現する。

個々の消防隊は、火災の状態、火災周囲の状況、火災と自分との距離から、火災の放水優先度を見積り、優先度が高い火災に放水/移動する。図 3 の数字は優先度を表す。1 が最優先であり、これは放水範囲内であって、消火価値が高く、ごく初期段階の火災を表す。もしこの条件を満たす火災があれば、消防隊はそれに放水する。

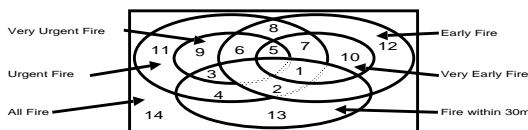


図 3 火災の放水優先度

火災の消火価値は、その周囲 18m の火災状況から決める。周囲に未着火の家屋が沢山ある場合、消火価値は高い。逆に火災が沢山ある場合や鎮火済みの家屋しかない場合、その火災は焼け野原の中にあり消火価値は低い。ただし、未着火と鎮火済みの両方がある場合には、鎮火家屋は延焼防止線の役割を果たすため、その火災を消火すれば延焼防止線を結ぶため、消火価値が高い。消火価値は以下のプログラムから求める。

```
消火価値 (Fire) = 未着火数-火災数 × 減少率
if 未着火数 > 0
then 未着火数 += 鎮火数
```

協調機構はトリビアルである。消防隊は移動を極力避け、放水に専念したい。上述の戦略に基づいた行動選択過程において、遠くの火災に移動する際に、移動率(式 2)の確率で移動するかしないかを判断することにより、他の消防隊が該当火災に放水している可能性が高いならば、移動せずにすぐに放水できる火災を優先する。

$$\text{移動する確率} = \frac{\text{目的の火災数}}{\text{消防隊数}} \quad (2)$$

5.4 道路啓開隊

救急隊と消防隊にとって、移動は救助・放水のための手段であり、移動に時間をとられたくない。道路啓開隊は彼らの移動回数を減らすことを目的とする。啓開隊は閉塞に遭遇しても自力で道を切り開けるため、未確認道路の再探索に時間を費すよりも、最少道路数の経路を突き進む方が効率が良い場合が多い。また、最少道路数経路の確保は、他のエージェントの経路構成方針(式 1)とも合致しており、暗黙の協調 (RoboCup サッカーにおける locker-room agreement [5]) を実現しているといえる。最良優先探索に与えるコスト関数は以下ようになる。

$$\text{costFunc}(\text{Road}) = \begin{cases} 1 & \text{通過可能} \\ M & \text{未確認 or 閉塞} \end{cases} \quad (3)$$

さらに、道路啓開隊は、他のエージェントからの啓開要請に対応する。救急隊と消防隊は、通りたのに通れない道路と、通りたかったのに通れなかった道路を道路啓開隊に報告し、道路啓開隊は報告された閉塞を優先的に切り開く。道路啓開隊は、道路を啓開するたびにそれを救急隊と消防隊に報告することで、他のエージェントの道路状況に関するワールドモデルの精度を高める。

6 実験

上述の 3 つの協調行動、救助能力の集中、閉塞と啓開の報告、放水能力の分散について、その有効性を調べるために実験を行った。実験を行った災害空間では、震災直後に 4 棟が出火し 33%の道路が閉塞する。

表 3 協調の有無と活動結果

集中救助	閉塞報告	放水分散	死者数	火災数	鎮火時間	救出人数
しない	しない	しない	25	141	203	32
する	する	しない	25	53	167	34
する	しない	する	26	32	178	32
しない	する	する	24	21	81	29
する	する	する	23	10	41	37

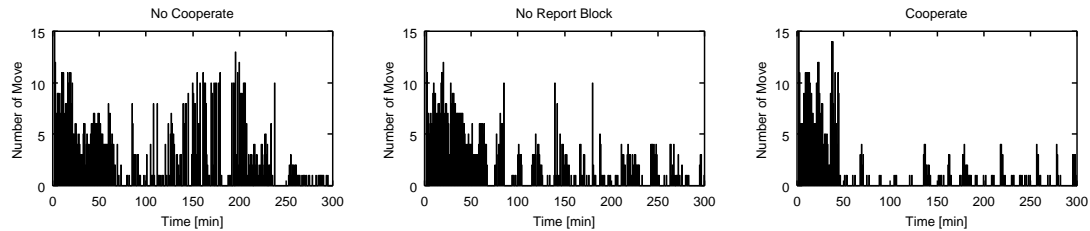


図 4 協調の有無と移動回数

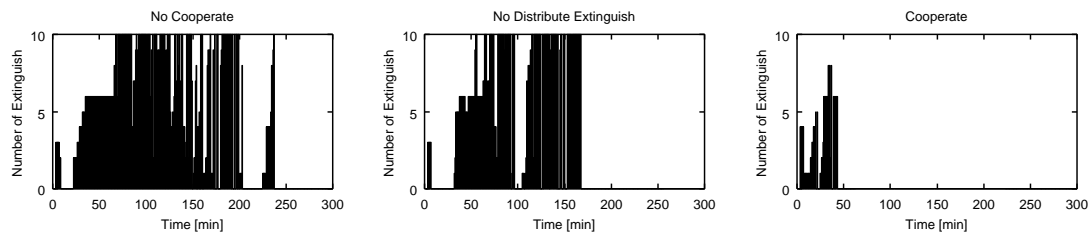


図 5 協調の有無と放水回数

実験結果を図 3 に示す。

救助能力を集中した方が、しない場合よりも多くの負傷者を救出できている。閉塞と啓開を報告した場合と、放水能力を分散した場合も、しない場合より速く鎮火が完了している。また、3つの協調行動を全て行うことで、効果的な救助活動、消火活動を実現している。

閉塞報告と放水分散の動きを詳しく見るために、協調の有無による時間毎の移動回数(図4)と放水回数(図5)を示す。

図4は、左から順に、協調しない場合、啓開報告をしない(他は行う)場合、3つの協調を行う場合の、救急隊と消防隊の、時間毎の移動回数を示している。協調しない場合は鎮火が完了するまで、多数のエージェントがほぼ絶え間なく移動し続けている。移動の多さは、目的地に到達するまでに時間がかかっている

ことを示している。啓開報告をしない場合(中央の図)は、放水分散によって無駄な移動を抑えているため、移動するエージェントが少ない。全ての協調を行う場合、消防隊は初期段階で鎮火を完了する。それ以後の移動は、救急隊が次の負傷者の場所に向かうための周期的なものがほとんどである。

図5は、協調しない場合、放水分散しない場合、全ての協調を行う場合の時間毎の放水回数を示している。協調しない場合は、初期段階に放水できず、火災が燃え広がった頃になってようやく放水できるようになっている。放水分散しない場合も初期消火に失敗しているが、閉塞報告によって火災に近けるため100ターンあたりから全ての消防隊が放水できている。全ての協調を行う場合は、消防隊は初期消火に成功し、わずかな放水で鎮火を完了している。これは放水分散によって無駄な移動を抑えられているためである。

火災に移動する際も、他に移動するエージェントが少いため、啓開隊によるサポートを受けやすくなる。

以上により、実装した協調の有効性が確かめられた。

7 競技会での評価

RoboCupRescue プロジェクトは、大規模災害シミュレーションシステム上で活動するエージェントの救助能力を評価するために、競技会を開催している。筆者らが開発したエージェント YabAI は、これまでに開催された全ての大会、RoboCup JapanOpen (2001 年 4 月)、RoboFesta (2001 年 7 月)、RoboCup2001 in USA (2001 年 8 月) で優勝した。米国で開かれた第一回世界大会 (4ヶ国 7 チームが参加) ではイランのチーム (Arian) と接戦を繰り広げたが、それを除けば他を圧倒していたといえる。

YabAI の最大の勝因は、個々のエージェントの高い基礎行動能力にあり、本題となるべき個々のエージェントの自律や複数エージェント間の協調というテーマにあまり触れていない。この結果は、現在の大規模災害シミュレーションシステムが、エージェントの分散協調の研究以前の段階にあることを示している。

8 まとめ

様々な事象を対象とするオープンな問題を扱うために、RoboCupRescue シミュレーションプロジェクトが開発中の大規模災害シミュレーションシステム上で活動する防災救助エージェントについて研究を行った。しかし、一見複雑な同システムが実はトイ的な問題に帰着できることが分かり、オープンな問題が本質

的に抱える、問題設定と実装の難しさを改めて示す結果となった。協調について若干の知見が得られたが、今後は、問題自体、Sub-simulator 群のさらなる改善が必要である。しかしその分、問題自身がオープンであるといえる。このような問題はマルチエージェントの協調について、トイ的な問題をテストベッドとするのとはまったく別の苦勞があることを報告した。RoboCup サッカーでもこのようなオープン性はあったが RoboCupRescue ではオープン性が桁違いに大きい。しかし、より現実に即した問題であり、このようなある種、黎明期の混乱の中、このような複雑な (怪奇と付け加えてもよいくらいの) 問題設定の中でも、エージェントの協調について、我々の RoboCup サッカーの研究と同様、問題が複雑であれば協調の前にまず個々のエージェントのスキルの向上が必要であるという一般的な知見が得られたということは結論できるであろう。

参考文献

- [1] 田所, 北野編: ロボカップレスキュー: 大規模災害救助への挑戦, 共立出版 (2000)
- [2] P. Stone, T. Balch, G Kraetzschmar (Eds.): RoboCup 2000: Robot Soccer World Cup IV, lecture notes in Computer Science. Springer Verlag, Berlin, 2000.
- [3] 鈴木隆志, 栗田英明, 竹内郁雄: RoboCup シミュレーションエージェントの能力とワールドモデル, 情報処理学会研究報告, Vol. 2000 No. 27((GI-2)) pp. 25-32, (2000)
- [4] 高橋友一他: 大規模災害におけるマルチエージェントシステム, MACC2000 (2000)
- [5] Peter Stone and Mnuela Veloso: Task Decomposition, Dynamic Role Assignment, and Low-Bandwidth Communication for Real-Time Strategic Teamwork, Artificial Intelligence (AIJ), 1999.