

RoboCup-Rescue

情報科学の緊急災害対応問題への挑戦

神戸大学工学部 田所 諭
The RoboCup Federation 北野宏明 中部大学経営情報学科 高橋友一
東京工業大学大学院総合理工学研究科 松野文俊 電気通信大学電気通信学部 竹内郁雄
The RoboCup Federation RoboCup-Rescue 技術委員会

RoboCup-Rescueは、情報科学、人工知能、ロボット工学などの最先端の技術を用いて、緊急災害救助という普遍的価値を持つ問題に貢献し、それをグランドチャレンジとして新たな技術基盤の創成に結び付けようという国際共同研究プロジェクトである。ここでは、プロジェクトの全貌を述べるとともに、現在プロトタイプの開発が先行しているシミュレーションプロジェクトの概要について解説を行う。

はじめに



1995年1月17日未明に発生した阪神淡路大震災は6,500名を超える人命を奪い、100万人を超える被災者を出した未曾有の大災害であった。また、トルコ大地震では死亡者数17,000人、台湾大地震では死亡者数2,400人を数えている。このような災害は世界的に見て希有のことであるように思われがちであるが、実はそうではない。表-1は20世紀に発生した大地震を死者数の順に並べたものである。これから容易に推測できるように、大規模な地震災害は平均すれば1年間に数回の割合で起きているのである。

RoboCup-Rescue^{1)~5)}は、この大災害における救命救助問題という普遍的かつ重要な社会問題に対して、情

報科学、人工知能、ロボット工学の最先端技術を適用しようとするものである。

RoboCupは「2050年に完全自律型のヒューマノイドロボットがワールドカップのチャンピオンに勝利を収める」というグランドチャレンジの下に研究者が集結し、現在では35カ国、3,000名がこの国際共同研究に参加している。このプロジェクトの目指すところは、サッカーという分かりやすいテーマを設定することによって研究資源の集中を行い、研究の過程を通じて産み出される技術を世界的に重要な社会問題や次世代の産業基盤の展開に役立てるところにある。実は、その普遍的な社会問題の1つとして、災害救助問題が当初から議論されていた、ということはあまり知られていない。

表-1 20世紀に発生した大地震

年	地震名	発生国	規模	死者数
1976	唐山地震	中国	M7.8	242,700
1920	海原地震	中国	M8.6	220,000
1923	関東大震災	日本	M7.9	142,800
1908	メツシナ地震	イタリア	M7.0	110,000
1927	古浪地震	中国	M7.9	80,000
1970	ペルー地震	ペルー	M7.6	66,800
1935	クエツタ地震	パキスタン	M7.6	60,000
1990	センジャン地震	イラン	M7.3	41,000
1939	エルジンジャン	トルコ	M7.8	32,700
1915	アベツァノ地震	イタリア	M6.9	32,600

RoboCup-Rescueプロジェクトの概要



現在，RoboCup-Rescueでは，図-1のように，次の4つのプロジェクトが進められている。

1. シミュレーションプロジェクト
包括的災害救助シミュレータの中で緊急対応活動を行うエージェントの知能行動と，意志決定問題を研究するプロジェクト。
2. ロボティクス&インフラストラクチャプロジェクト
災害空間内で活動する機械の体を持ったロボット，災害に対してロバストな都市のための基盤情報インフラ，そのような環境下で人間の活動を支援するための情報機器，を研究するプロジェクト。
3. インテグレーションプロジェクト
シミュレーションと実世界・ロボット・インフラ機器の統合によって，実災害における防災・救命救助活動を支援することを可能にする研究プロジェクト。
4. オペレーションプロジェクト
開発された技術の実用化と普及・運用を議論するプロジェクト。

これらのプロジェクトの特徴は次の点にある。

1. 明確なグランドチャレンジの提示
ロボットや情報システムが人命災害救助に活躍し，人間を劣悪で危険な環境から解放する，という明確で魅力的な「夢」を提示している。
2. 国際的で，協動的かつ競争的な研究開発
RoboCupと同様の方法論によれば，サッカーを超える規模の研究活動が期待でき，防災・救命救助問題に対して，他の方法論によるよりもはるかに効果的な解を短期間に導き出すことができる。

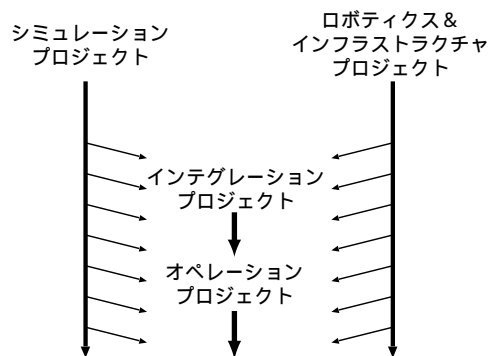


図-1 RoboCup-Rescueプロジェクト

3. 国際的デファクトスタンダードの形成
ここで開発されるソフトウェアなどは基本的に世界中に無償公開され，それによってLinux型のコミュニティを形成する。
4. 広範な社会問題・産業分野への展開と波及
ここで生み出される技術は，災害救助問題のみならず，あらゆる産業に応用され，また，他の普遍的な社会問題の解決に貢献する。
5. 日本発の国際プロジェクト
ロボット工学のように日本が諸外国に対して優位性を保っている領域から，日本発の提唱によって人道的研究開発を推進し，全世界に対して社会基盤として重要な技術を提供していくことは，先進国としてふさわしい国際貢献である。

シミュレーションプロジェクトの概要



4つのプロジェクトの中で，シミュレーションプロジェクトは他に先駆けて議論が進められ，現在では，国内においては神戸大，中部大，電通大，東京大，東工大，名工大，国際情報科学芸術アカデミー，港湾技研，消防研，電総研，NTTデータ，応用技術，ソニーCSL，三菱総研など，国外においてはCMU，USC（米国），DFKI，GMD（ドイツ）をはじめとする多くの研究者が集結して共同研究を行っている。1年間の検討・開発期間を経て，6月にはプロトタイプシステムが一般公開される予定である。

シミュレーションプロジェクトの全体を図-2に示す。このプロジェクトは次の部分から構成されている。

1. 分散計算機上に作られた包括的災害救助分散シミュレータ
建築物倒壊，火災延焼，ライフライン切断など互いに高い連関を有する災害事象に対して，個別シミュレータを通信で統合する分散シミュレーション方式によって包括的なシミュレーションを行う。
2. 防災・救命救助活動を行うソフトウェアの自律知能エージェント
シミュレータによって作られた仮想的な災害空間において，ソフトウェアのエージェント（消防，警察，住民など）が行動し，緊急災害対応活動（消火，救助，避難など）を行う。
3. ロボットや計測・制御システムとの通信を行うリアルワールドインタフェース
計測システム（高所カメラ，地震計など）との通信に

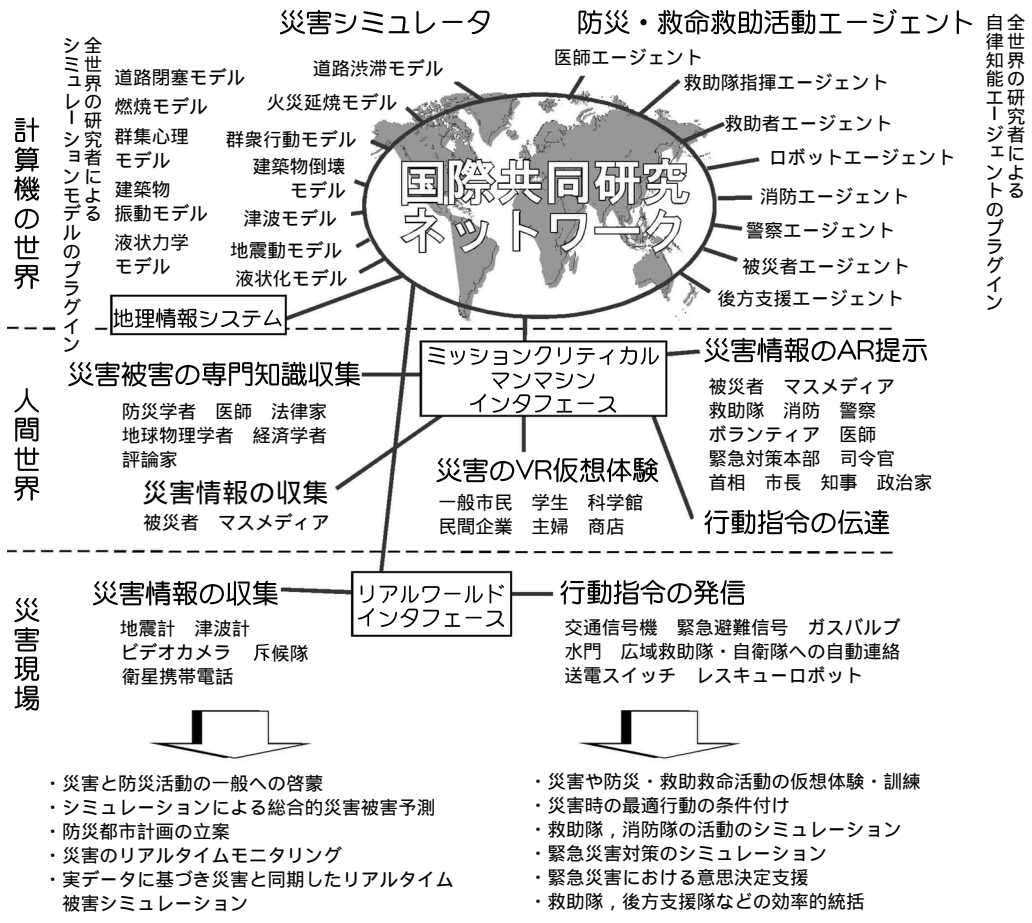


図-2 シミュレーションプロジェクト

よって実際の災害データが収集される。それに基づいてシミュレータ内の仮想現象が修正され、実世界と仮想世界の実時間での同期が実現する。また、制御システム（交通信号、ガスバルブ、水門など）との通信によって、被害拡大が制御される。

4. 人間への情報提示，人間からの情報獲得を行うマンマシンインタフェース
ウェアラブル計算機などによって人間の防災部隊（消防，警察，自衛隊など）との双方向情報通信（計測データ・シミュレーション結果配信，情報検索，解析依頼など）によって，活動支援が行われる。また，災害対策本部における意志決定結果やガイダンス情報が伝達される。

1. シミュレーション精度の向上
災害間の連関，および防災活動の効果を勘案したシミュレーションが実現する。
2. 包括性
総合的な災害のシミュレーションが実現する。
3. 実時間性
並列計算によって，実際の災害と同期した速度でのシミュレーションが可能になる。
4. 相互運用性
通信プロトコルの標準化によって，各自治体・政府等のシステムによらず接続が可能になる。
5. 可搬性，ユビキタス性
分散アーキテクチャによって，災害対策本部の場所を固定する必要がなくなると同時に，機能分散を容易にはかることができる。
6. 拡張性
災害事象のシミュレータをプラグイン追加したり，最新のアルゴリズムを導入すること，またシミュレーションの都市を変更することが容易にできる。
7. 最適構成性

防 災・救命救助問題への貢献

この方式は，シミュレータとして次の特徴を有している。

目的に応じて、異なる粒度のシミュレータを採用したり、場のサイズを選択することができる。

これらは、従来の防災システムを飛躍的に高度化するものである。また、都市計画や防災計画の策定にも大きな力を発揮する。

情報科学におけるチャレンジ



RoboCup-Rescueは情報科学、中でもシステムソフトウェア、人工知能、ロボット工学、ヒューマンインタフェースの観点から見て、挑戦的で興味深い課題を数多く含んでいる。

膨大な数のエージェントを通信でつなぐ実時間処理

RoboCup-Rescueで想定されているエージェントの個数は数千～数万である。これだけ多数の要素がそれぞれ自律的な動作をするエージェントというのはおそらく前例がない。RoboCup-Rescueにおけるカーネルの役割は、それらの情報の集約・共有を効率良く実現することによって、分散処理と集中処理のバランスを取ることである。そこでの最大の課題は、論理的にも物理的にも膨大になる分散エージェント間の情報の流通の制御である。

RoboCup-Rescueにおいては、単なる同報ではなく、個々のエージェントの情報近傍にある情報だけを選択して個別に送るという、エージェントの個数に対応したカーネル内部の情報処理と論理的通信チャンネルを必要とする。したがって、何らかの形でカーネル自身を分散させなければならない。しかし、こうすると、カーネル内部に上と相似の分散・集中の問題が発生する。これをどのように解決するかが、カーネル構成に関する最も挑戦的な課題である。この課題は、情報の内容に依存しない普遍的な分散・集中混合システムの性能向上技術の課題と、RoboCup-Rescueで使われる情報の内容に依存した情報のフィルタリングと合成の課題に整理できる。

カーネル分散のベースとなる区分けは、シミュレーション世界における地理的区分けや、群をなすエージェントの集団といった区分けや、実世界での通信チャンネルの区分けなど、実世界における情報距離空間の近傍概念に対応したものとなる。さらにこれらの区分けが部分的に重複して複雑な多層構造をなすことで、分散カーネル（サテライトカーネル）同士の間で、管理

している情報の整合性・冗長性に関する複雑な問題が発生する可能性がある。たとえば、移動する群衆に対してサテライトカーネルを割り当てるというカーネル分散戦略をとった場合、移動によって、群衆の位置が変わったり、合体・離散が起こったときにどうするかという興味深い問題が生ずる。

プロトコル設計

どのような情報機器と情報表現言語を用いると防災・救命救助活動がスムーズになるかという視点でのプロトコル設計が必要である。たとえば、発信装置を備えたウェアラブルの情報機器をほとんど人々が身につけるようになると、現実の防災・救命救助活動の様相は激変するであろう。人間の言葉よりはるかに正確にかつ高速の情報転送が可能な装置があれば、被災者の位置情報や災害地域の局所状況はほとんど一瞬にして大域の情報として集積・統合することが可能である。

また、大規模災害においては平時の情報インフラが破壊され、通信手段が限定・寸断され、ときには情報途絶の状態に陥る。これに対してロバストなプロトコルの設計は重要である。

発展機構を備えたソフトウェアとしてのカーネルとエージェント

プラグインされるシミュレータはカーネルとは独立にいくらかでも詳細な世界モデルを使うことができるが、RoboCup-Rescue全体が扱う世界モデルの詳細度は上に述べたプロトコルとカーネルによって決定される。カーネルの中の世界モデルは研究の進展によって、詳細化を高めていくはずである。しかし、カーネルの変更はRoboCup-Rescueシミュレーションそのもののソフトウェア構造を変えてしまう。

目的は同じなのに、詳細度が変わるたびに、作り直しに近い大変更は行いたくない。これと類似の問題はこれまで多くのソフトウェアで経験されてきた。RoboCup-Rescueシミュレータは最初から、詳細化のレベルに進展に応じて「発展する機構」を備えたソフトウェアとして設計すべきである。これは言うは易しいが、非常に難しい挑戦的な問題である。

もっとも、シミュレータをプラグインできるようにすることによって、現状でもシステムの中にある程度の発展機構が用意されているとはいえるが、たとえば、カーネルの持つ世界モデルを進展させるために、世界モデル自体をプラグインするといった方策だけでうまくいくかどうかは今後の研究に待たなければならない。おそらく、もっと別の効率の良い方法が考案されるべ

きである。

さらに、エージェントの作り方にも「発展する機構」が持てるようなガイドラインが与えられなければならないであろう。これはプロトタイプが詳細度の進展に応じて重層的に発展していかなければならないことを意味している。つまり、詳細度の低いレベルにしか対応していないエージェントに対して（ある程度は）上位互換でなければならない。これはプロトタイプ設計のメタ方針にかかわる興味深い課題である。

このことから明らかなように、RoboCup-Rescueはこれまで精力的に進められてきた「発展機構を備えたソフトウェア」の、新しいしかも具体的で、実時間性を備えた大規模な研究プラットフォームを与えている。

マルチエージェント人工知能研究

災害救助において、最適または準最適の救助戦略を求めするためには、いろいろな人工知能的手法を開発する必要がある。特に、チームワーク、マルチエージェント構成法、不確かな環境下での推論、分散プランニングなどの多くの研究課題が存在する。

分散人工知能と呼ばれる分野⁶⁾が、従来このような研究テーマを扱ってきた。たとえば、マルチエージェントの協調法として契約ネットプロトタイプ^{7), 8)}などが提案されている。しかし、ここで扱う問題では、これまであまり真剣に討議されてこなかった以下の点を扱う必要がある。

- きわめて多くの自律、半自律システムの行動計画の作成と制御が実時間で可能であること
- 自律システムに、実時間認識、推論、計画作成システムが搭載され、外部との通信途絶があっても、救助行動を遂行できること
- 不確かな情報や間違っている情報の混ざった環境で、より良い状況認識と行動計画の策定を行えること
- 実時間で、広域かつ大規模な、救助作業の計画策定ができること
- 状況の変化に応じて、計画の立て直しや修正が頻発するが、効率的な計画修正を継続的に行うことができること
- 効率的な、部隊編制や作業スケジューリングができること
- 物資輸送や被災者の搬送などロジスティクスの計画の立案が、他の救助計画と融合して立案できること
- 不足していたり不正確だと推定される情報を判断し、それを補完する情報収集を行う方法を立案・実行できること
- 事前に決めたシナリオに沿って大枠の救助行動を行

- い、状況に応じて新たな行動計画を生成・実行すること
- 資源制約を前提として計画を立案、実行できること

プロトタイプについて



プロトタイプのアーキテクチャ

2000年6月には公開予定のプロトタイプにおいても、分散シミュレーション方式が採用されている。

分散シミュレーションは、これまでは主として軍事関係で研究開発が盛んであり、1980年代のSIMNET計画に始まり、2000年にはWarSim2000が計画されている⁹⁾。既存のシミュレータや人間のオペレータをソフトウェアの改編を最小限に抑えて、リアルタイムに統合することが要求されるからであろう。

分散シミュレーションを実現する方式として以下のような方法がある。

(1) シミュレーション対象の分割方式：

- 空間分割方式
シミュレーション対象を空間的に分割し、各シミュレータは担当部分をシミュレーションする。
- 能動エージェント分割方式
能動的に行動する単位エージェント、あるいはシミュレーション機能単位ごとにシミュレータを割り当て、シミュレーションする。

(2) データの共有方式：

- 集中管理方式
ネットワーク上にある1つのサーバがデータを管理し、各シミュレータはこのサーバ上のデータを参照、更新する。
- 分散処理方式
各シミュレータがデータを管理し、自分の担当するデータを更新するとともに、必要なデータは別のシミュレータとネットワークを介して取り寄せる。

RoboCup-Rescue プロトタイプは、サーバカーネルを中心にデータを管理する集中管理方式、シミュレーション単位は災害事象やエージェントごとに分割する能動方式をとっている（図-3）。

シミュレータ要素間のプロトタイプ

分散シミュレーションにおいては要素間の通信プロトタイプが重要である。軍事の分野では、1993年に制定されたDIS¹⁰⁾に始まり、最近ではHLA¹¹⁾に発展している。

表-2に、RoboCup-Rescue で用意されたプロトタイプを示す。下層レイヤとしてはUDP/IPを使用している。

(1) 開始時：

カーネルは地理情報システム(GIS)から地理情報データを受け取り、災害シミュレータおよびエージェントに初期データとして渡す。

(2) 各シミュレーションステップ：

各構成要素は以下の処理を行う。

- カーネルは、各構成要素からのプロトコルに応じ、対応する構成要素に情報を渡す。シミュレータに時間ステップごとの空間情報を提供する。
- 災害シミュレーションは、カーネルのシミュレーションステップ(1分)開始時を初期状態とし、さらに細かいシミュレーションステップで終了時までシミュレーションを行う。シミュレーション結果を時空間情報としてGISへ渡す。
- エージェントは、カーネルを介して外部情報入手し、状況判断し、次の行動を決定する。
- GISは、シミュレータのシミュレーション結果やエージェントの時空間行動データを管理する。情報提示システムに表示用の時空間データを供給する。

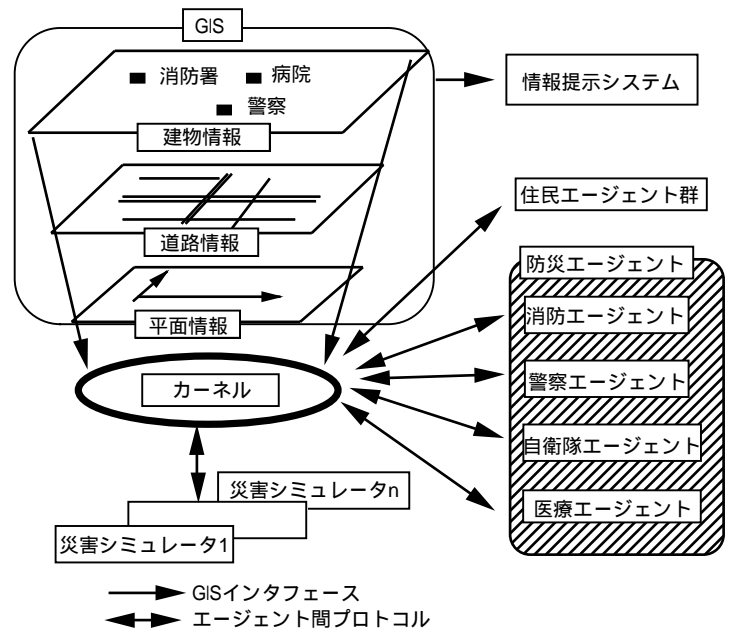


図3 プロトタイプシステムのシステム構成

GISと災害シミュレータ

プロトタイプでは、DiMSISというカーナビゲーションの国際標準フォーマットKIWIに準拠したGISが用いられている。その特徴は、エージェント行動に不可欠な時空間情報の柔軟な管理にある。シミュレーションフィールドとしては、阪神・淡路大震災において大規模火災が発生した神戸市長田区の中心部1.5km四方を最初のトライアルに設定している。

プロトタイプでは、以下のシミュレータが用意されている。

- 建物倒壊シミュレータ：
地盤の表面加速度、築年、構造のデータに基づき、確率的に建物倒壊をシミュレートする¹²⁾。
- 街路閉塞シミュレータ：
建物倒壊に基づき、街路閉塞の度合いをシミュレートする¹³⁾。また、救助エージェントによる道路復旧作業を反映する。
- 火災延焼シミュレータ：
火災の発生については、阪神・淡路大震災時の火災発生データを用いる。延焼過程は、建物1棟ごとに火災を拡大させる神戸市消防局・応用技術・高井(近畿大)の延焼モデル¹⁴⁾が用いられている。さらにそれに加えて、シミュレーションステップごとに、消防隊エージェントの消火活動を反映させる。
- 交通流シミュレータ：
TRANSIMSの方式¹⁵⁾、¹⁶⁾をもとに、道路の幅員、車線

表2 エージェント間プロトコル

コマンド	情報の流れ		機能
初期設定			
init	{agent, simulator}	kernel	エージェント・シミュレータの初期化
map	GIS	kernel	地理情報の設定
エージェント(センシング)			
see	agent	kernel	視覚情報の取得
say	agent	agent	音声情報の発信
hear	agent	{agent, kernel}	音声情報の取得
tell	agent	agent	通信回線での情報発信
listen	agent	agent	通信回線での情報取得
エージェント(行動)			
move	agent	kernel	移動
control	agent	kernel	物体操作
act	agent	{agent, kernel}	行動、働きかけ
災害シミュレータ(動作)			
cause	kernel	agent	災害被害
effect	agent	kernel	防災・救命救助活動

数、歩道幅、交差点での信号、左折ショートカット、右折ポケットなどを考慮した1秒ごとのマイクロシミュレーションを行い、道路閉塞の状況変化を考慮した人や車の流れを計算する。

これらのモデルのほとんどは、阪神・淡路大震災を対象とした個別シミュレーションで高い精度が実証されており、十分な実用性を持っている。

おわりに



長期研究計画

RoboCup-Rescueの最終目標は、シミュレーションプロジェクトとロボティクス&インフラストラクチャプロジェクトがすべて統合され、阪神・淡路大震災のような大規模災害に対してロバストな社会を創ることにある。この壮大な目標はおそらく2050年頃には達成されると考えている。

シミュレーションプロジェクトに関しては、ここで述べたすべての枠組みを2020年頃に完成する予定である。しかしながら、依然として災害現場を精密に計算機内で模擬することと、人間と同等の行動知能をアルゴリズムエージェントに実現することは困難であり、実用化後も仮想世界と現実世界を一致させる努力が必要であろう。それによって、徐々に実用的なレベルに達していくと考えられる。

ロボティクス&インフラストラクチャプロジェクトとしては、2020年までには限定された災害現場において限られた防災・救命救助活動を行う自律知能の技術が開発されると考えられる。しかし、その能力は人間と比べればはるかに劣るものであり、完全に現在の消防などの機能を代替することはできない。したがって、きわめて危険性が高い現場に限って人間の作業を代行するという方法が現実的である。そして、ロボットに人間と同等の防災・救命救助能力を実現することはサッカーロボットが世界チャンピオンを破ることよりも難しく、その実用化は21世紀半ばまでかかると予測される。

短期研究計画

短期計画としては、シミュレーションプロジェクトについて次の計画で研究開発を進めていく予定である。

● Phase 0

きわめて簡単な問題を設定した災害とエージェント行動のシミュレータ開発によるフィジビリティスタディ (---2000.4)

● Phase 1

シミュレータプロトタイプのパブリックと、国際的研究ネットワークの組織 (---2000.6)

● Phase 2

限定した災害、限定したエージェントによるシミュレータの開発と第1回研究評価会議の開催 (---2001.7)

● Phase 3

本格的な災害シミュレータ、多様なエージェントによ

るシミュレータの開発 (---2005.4)

国際的共同研究

以上述べてきたRoboCup-Rescueは、情報科学、人工知能、ロボット工学の最先端技術を結集した防災・救命救助問題へのチャレンジプロジェクトである。ここでは紙面の都合上、概要しか述べるができなかったが、詳細についてはRoboCup-Rescue本¹⁾を、最新情報についてはRoboCupウェブページ <http://www.robocup.org/> をご参照いただきたい。

現在は数十名の研究者によってファーストステップが踏まれようとしている段階であるが、次々と新しい研究者が参加を表明、開発に加わってきており、数年後には数百人~数千人規模の国際的共同研究に発展すると予想される。これは、構想を現実のものとするためには不可欠であり、RoboCup-Rescueでは広く研究者諸氏の参加を歓迎している。

また、このような大規模な開発のためには相応の予算措置が必要であり、現在、国からの研究予算を獲得すべく申請中である。

この研究活動が近い将来に結実し、安全で安心して暮らせる社会の醸成に寄与することが、我々研究者の切なる願いである。

参考文献

- 1) 田所, 北野 (監修), RoboCup-Rescue技術委員会・The RoboCup Federation, ロボカップ日本委員会 (編): ロボカップレスキュー --- 緊急大規模災害救助への挑戦 ---, 共立出版 (2000, 近刊).
- 2) Kitano, H. and Tadokoro, S. et al.: RoboCup-Rescue: Search and Rescue in Large-Scale Disasters as a Domain for Autonomous Agents Research, Proc. IEEE Intl. Conf. on System, Man, and Cybernetics (1999).
- 3) Tadokoro, S. and Kitano, H. et al.: The RoboCup-Rescue Project: A Multi-Agent Approach to the the DisasterMitigation Problem, Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (2000).
- 4) 北野, 田所, 高橋, 松野, 大須賀: RoboCup-Rescue技術委員会, RoboCup-Rescue, bit, Vol.32, No.2-4 (2000).
- 5) RoboCup-Rescue オーガナイズドセッション, 情報処理学会第60回全国大会 (2000).
- 6) 石田, 片桐, 桑原: 分散人工知能, コロナ社 (1996).
- 7) Smith, R. and Davis, R.: Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol.11, No.1, pp.61-70 (1981).
- 8) Ohko, T., Hiraki, K. and Anzai, Y.: Reducing Communication Load on Contract Net by Case-Based Reasoning --- Extension with Directed Contract and Forgetting, Proc. 2nd Intl. Conf. on Multi-Agent Systems, pp.244-251 (1996).
- 9) Warfighters' Simulation (WarSim), Directorate National Simulation Center. <http://www-leav.army.mil/nsc/warsim/index.htm>
- 10) Illgen, J. (ed.): Distributed Interactive Simulation Systems Applications, SPIE (1995).
- 11) Dahmann, J.: High Level Architecture for Simulation: An Update, in Bourkerche, A. and Reynolds, P. (eds.): Distributed Interactive Simulation and Real-time Applications, pp.32-40, IEEE Computer Society TC on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Computer Society (1998).
- 12) 建設省建築研究所, 平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書 (1996).
- 13) 赤倉, 高橋, 中本: 大規模地震による街路閉塞予測シミュレーションの構築, 土木学会論文集, No.632-45 (1999).
- 14) 神戸市消防局 (編): 阪神・淡路大震災における火災状況 (神戸市域), 神戸市防災安全公社 / 東京法令出版.
- 15) Barrett, C.: TRANSIMS-Version TRANSIMS-LANL-1.0, LA-UR-99-1658 (1999). <http://www-transims.tsasa.lanl.gov/>
- 16) Casti, L.: Would-Be Worlds (1996). 中村訳: 複雑系による科学革命, 講談社 (1997).

(平成12年2月24日受付)