

災害対応ロボットのあるべき姿

田 所 論

東日本大震災の災害対応や復旧にはさまざまなロボットが適用され、今後はロボット活用が世界的な趨勢となっていくと考えられている。本稿では、このような災害対応ロボットのニーズ、ロボットに求められる必要要件、今後の活用が期待されるさまざまなロボットとその現状、原子力プラント災害を例にとった災害対応ロボットシステムのあるべき姿などについて、技術的観点から考察を行う。

キーワード：レスキューロボット、災害対応、災害情報収集、復旧作業、原発事故

1. はじめに

東日本大震災では数多くのロボットが災害対応や復旧に適用された。これは歴史上初めてのケースだったと言っても過言ではないだろう。福島第一原発事故はもちろんのこと、海中や湖底の遺体捜索、構造物・港湾・産業施設等の被害調査、あるいは、被災者のメンタルケアなど、さまざまな用途に活用された。

政府中央防災会議は、南海トラフでマグニチュード 9.0 の巨大地震が発生した際の津波高・浸水域等のシミュレーションに基づき、表 1 のような想定被害を発表した¹⁾。これによれば、最大で東日本大震災の 17 倍の死者・行方不明者、18 倍の建物被害が発生するとされ、また、避難の迅速化により津波による死者は最大 9 割減少、耐震化の推進によって全壊建物棟数は 6 割減少するとされている。

東日本大震災では「想定外」という言葉がメディアを賑わせた。工学的設計のためには仕様を定める、すなわち想定を行うことが必要である。たとえば、かかる荷重がおおよそでも仕様として決められないと機械部品を設計することはできない。ところが、今回の震災が示したことは、想定を超えた途端に数々の問題が発生し、極限状態にまで至ってしまうという事実だった。これは構造物や施設設備の問題だけではな

く、災害対応行動全般における問題でもあった。たとえば、釜石市大槌湾では、想定されていた津波浸水地域から少し外れた地域において、避難遅れによる死者・行方不明者が数多く発生した。

発生頻度が極めて低いものの、発生時には甚大な被害が予測される災害に対して、どのようにして備えるべきか、は大変難しい問題である。少なくとも、経済的合理性によって判断することはできない。PSA（確率的安全性評価）のような手法²⁾は、頻度が比較的高い災害に対しては定量的判断材料を合理的に与えることができるが、事象の発生確率や大きさの予測精度が非常に低い場合には、有効とは考えられない。

被害発生を未然に防げない場合でも、事後対応によって被害拡大を防止し、迅速に復旧を行い、少なくとも極限状況に至らないための手段が必要である。災害復旧の土木工事や救急医療はその最たるものであるが、ロボットあるいはロボット技術は、そのような場合のための新たな手段である。

レスキューロボットの歴史は浅く、研究が活性化し始めたのは阪神淡路大震災が発生した 1995 年以降である。国内における本格的な研究開発は 2002 年に開始された大都市大震災軽減化特別プロジェクト³⁾が初めてであった。無人化施工が雲仙普賢岳の砂防工事を中心として実戦配備が進められてきたのに対して、

表 1 南海トラフ巨大地震による想定被害（最大のケース）¹⁾

	マグニチュード	浸水面積	浸水域内人口	死者・行方不明者	建物被害(全壊棟数)
東日本大震災	9.0	561 km ²	62 万人	18,800 人	130,400 棟
南海トラフ巨大地震	9.0	1,015 km ²	163 万人	323,000 人	2,366,000 棟
倍率		1.8 倍	2.6 倍	17 倍	18 倍

災害対応ロボットは研究開発が先行し、実用化・配備・適用が遅れている。

2. 災害とロボットのニーズ

(1) ロボットのニーズ

ロボットのような遠隔機器が必要とされるのは、主として次の3つのケースである。

- 1) 人間や従来型の機器では不可能。
- 2) 人間が行うには危険性が高い。
- 3) 作業品質・能力・コスト等の点で優れる。

災害対応作業を大別すると情報収集と復旧等の作業とに分かれる。作業を計画するためには現場状況の把握が必要であり、情報収集は大変重要であり、上記のようなケースにおけるロボットへの期待は大きい。一方で、作業については、既存の作業機械があるものの上記1), 2)の理由で遠隔作業が必要な場合にニーズが高い。これらを整理すると、下記ようになる。

○情報収集

内容：被害発生の覚知、被害の状況把握、復旧作業の計画手配、被害調査・情報収集、要救助者の発見、老朽化調査、他。

必要性：

- 1) 狭所、高所、水中等での作業を遠隔で安全に行う、他。
- 2) 汚染、火災爆発の危険、安全が確認できない場合に、作業を遠隔で行う、他。
- 3) 長期に亘る広域モニタリングを自動化してコストを下げる、位置情報と収集情報との統合精度

表一2 消防のロボットへの期待⁴⁾

災害と必要な機能	期待割合 (%)
CBRN 災害	
センサによる CBRN 物質の特定	80
安全な場所への被災者の搬送	61
CBRN 物質の除去	49
火災	
ビル内の消火	61
ビル内での搜索	51
輻射熱にかかわらず消火	49
地震災害	
瓦礫の上からの搜索	53
瓦礫の中での搜索	45
重量瓦礫の除去	43
水害	
要救助者の搜索	55
水の中からの救助	49

を上げる、他。

○復旧作業

内容：応急修繕作業、緊急医療、患者搬送、被害構造物撤去、運搬、修繕作業、新構造物搬入設置、治療、他。

必要性：

- 2) 危険場所での作業を遠隔化して安全性を向上する、他。

(2) ロボットが求められる災害

ロボットのニーズがある災害現場として、下記のような代表例を挙げることができる。

- ・火災
- ・原子力・化学プラント災害
- ・構造物の破壊、倒壊
- ・土砂崩れ、地滑り、雪崩、火砕流、噴火
- ・水害
- ・CBRN（化学・生物剤・放射能・核物質）汚染
- ・爆発
- ・各種事故
- ・テロ、有事
- ・被災地支援

全国主要都市消防へのアンケート調査によると、消防がロボットに対して期待する機能は表一2のようであった⁴⁾。特に、CBRN 災害、火災、地震災害、水害に対するニーズが高く、その理由は2.(1)で述べた1), 2), すなわち、不可能な作業を可能にすることとリスクの低減にあることがわかる。

これとは別に、災害発生を未然に防ぐための対策も重要である。我が国ではインフラやプラント施設等の老朽化が進んでおり、小さなきっかけでも大きな被害に発展する可能性が高まっている。過去の震災でも耐震化補強は大きな効果を示し、被害発生が少ない⁵⁾。

3. ロボットに求められる要件

以上のようなタスクを行うロボットでは、少なくとも下記の性能を考慮する必要がある。

①運搬、設置時間、必要付加機材

集積地から現場に運搬し、設置するまでの容易性。セットアップに必要な時間が十分に短いこと。また、運搬車両やクレーンなどの補助機材を併用して作業を行う際の容易性など。

②移動・静止能力

現場で想定される条件（地形、環境、気象など）で、作業を行うために十分な移動能力と静止能力を持つこ

と。移動ロボット技術や制御技術が関連。

③センシング・認識能力

現場条件で十分な、目的の情報に関するセンシング能力を持つこと。また、操作者が作業を行う上で十分な現場状況の把握を可能にし、あるいは、自律的な作業を可能にするため、センサ情報を取得・解釈できること。センサ技術、計測技術、診断技術が関連。

④作業能力

現場条件で十分な、目的とする作業能力を持つこと。また、センシングや異常状態回避に必要な作業能力を持つこと。さまざまなロボット作業技術、マニピュレーション技術などが関連。

⑤通信能力

情報収集、作業遂行、遠隔操作等に十分な通信帯域、短い通信時間遅れ、移動や作業時の安定性、障害に対する復旧能力を確保すること。有線の場合、無理のないケーブルハンドリングができること。無線の場合、アンテナ設置や帯域管理が容易なこと。

⑥情報収集・整理・提示能力

活用しやすい情報としてセンサ情報を解釈・整理し、記録し、利用者に直感的に提示する能力を有すること。情報が不足する場合に追加情報を収集できること。GIS、3D、マルチモーダル、没入感、距離・位置関係把握など、さまざまな情報処理やバーチャルリアリティ技術が関連。

⑦遠隔操作、ヒューマンファクタ、必要な操作者数

長時間でも疲れずに遠隔操作し、高い作業効率と低い失敗確率で作業を遂行することができること。必要な操作者の人数が少ないこと。さまざまなヒューマンインタフェース技術が関連。

⑧自律機能、自動作業、部分作業の計画

部分的に自律機能によって作業を自動化することができること。また、それを合理的に計画できること。作業教示、学習、分散協調、などさまざまな知能ロボット技術が関連。

⑨稼働時間、耐久性、耐環境性、防爆、耐熱、耐水

作業に十分な耐久性や耐環境性能などの基本性能を有すること。

⑩メンテナンス、補給

メンテナンスや給油・充電が容易であること。

⑪規格化、性能評価法、標準化

技術規格や性能規格が定められ、標準化が進んでいること。

⑫コスト

経済的に導入・維持・運用ができること。

⑬人間や他の機器との役割分担、全体業務計画

人間や他の機器との役割分担を明確化し、全体の業務計画を容易に行えること。現場での、指揮所や操縦卓の配置など。

⑭現場への悪影響

ロボットの導入によって現場作業全体の遂行や、現場の環境条件などに悪影響を与えないこと。現場作業員からの不満が出ないこと。

⑮現場対応改造

現場で必要とされる機能に応じて、柔軟に改造を行い、緊急ニーズに応えられること。

⑯配備運用体制

配備運用体制が整備されていること。

4. 災害対応ロボットの種類と現状

(1) ロボットの種類と現状

災害にはさまざまな種類があり、それに適用可能と考えられるロボットの形態も多様である。

①地上移動ロボット (Unmanned Ground Vehicle; UGV)

車輪型のUGVは、通常車両が走行するような路面を対象として実用化されている。技術的には、遠隔操縦や通信が問題である。

クローラ型のUGVは、階段・瓦礫・荒地などの走行を目的として実用化され、PackBotなど、海外では主として軍事用実績がある。現場では踏破性能や信頼性の限界が見られ、より頑丈、軽量で、運動性能の良いボディや履帯が必要である。

②脚型ロボット

4脚型のロボットは、傾斜地の作業を行うものや、不整地での運搬用として研究開発されてきた。歩行の安定性の問題などが解決されてきており、BigDogやTAITAN IVなど、性能面では実用化に近いものもある。

2脚型のロボットは、従来は災害環境を対象とした研究開発はあまり行われなかった。米国では最近PETMANなど不整地における運動性能を重視した研究開発が行われ、DARPA Robotics Challengeのようなプロジェクトも行われている。

③パワースーツ型ロボット (Exoskeleton)

災害対応としては重量物運搬などを目的としてXOS ExoskeletonやHALなどが研究開発され、技術的には実用に近づきつつある。

④飛行ロボット (Unmanned Aerial Vehicle; UAV)

全長数mの小型ヘリは実用化され、ヤマハRMAXなど火山災害などへの適用事例も多数ある。通信や安

全規制の課題がある。

全長数十 cm の超小型多ローター型ヘリは実用に近づきつつあり、屋内飛行の研究も行われている。強風・突風時の安定性、狭い構造をぬった飛行、ペイロード、飛行時間などの課題がある。

全長数十 cm の固定翼機が上空からの災害情報収集のために実用化されつつある。強風時の挙動や、飛行時間などの課題がある。

⑤小型潜水艇 (Remotely Operated Vehicle; ROV)、自律潜水艇 (Autonomous Underwater Vehicle; AUV)

ROV は国内でも配備が進んでおり、ソナーの性能向上とともに実用性の向上が著しい。水流の影響、ケーブルハンドリング、位置決め、水中の複雑な障害物をぬった遊泳などの課題がある。

AUV は水底に近づいて遊泳することが困難、水陸両用車はケーブルハンドリングの問題がある。

⑥壁登りロボット

平面の鋼構造に対しては技術的実用化段階にあるが、複雑な凹凸や障害物などの踏破能力は未だ不足している。コンクリート構造物等の磁力吸着が不可能なケースに対しては、平面以外では吸着力の安定した発生が困難である。

⑦狭所進入ロボット

ヘビ型ロボットは、蒼竜などが開発され、瓦礫などへの潜り込みが可能であるが、横転しやすく、狭所での旋回性能、瓦礫内での位置推定に課題がある。

ビデオスコープ型ロボットとしては、能動スコープカメラが開発され、瓦礫内で重力方向への探査が可能であるが、運動能力の不足、瓦礫内での位置推定などの課題がある。

⑧地中掘削ロボット

ボーリングマシンのようにマシンや立坑を反力として3次元方向に削孔する技術は実用化されているが、地盤を反力として掘削しながら地中を進むロボットは開発が進んでいない。地中での位置推定に課題がある。

(2) センサの種類と現状

ロボット搭載センサにはさまざまな種類がある。

①映像：カメラ、近赤外カメラ、サーモカメラ、放射線カメラ、照明、画像認識

カメラ、近赤外カメラ、サーモカメラは、センサの小型化、高解像度化、高感度化、広帯域化が進み、ロボットへの搭載が容易になってきている。放射線のガンマカメラは重量・サイズ・露光時間が課題である。

②距離：LIDAR, 距離画像カメラ, 超音波ソナー, レー

ダー, 3D 認識

LIDAR (レーザレンジファインダー)、距離画像カメラ、超音波ソナーは精度、解像度、距離、小型化が進み、ロボットへの搭載が容易になっている。ミリ波レーダーは自動車用に実用化が進んでいる。マイクロ波レーダーは、壁の向こう側を撮影する軍用超広帯域レーダーや、瓦礫に埋もれた人の呼吸や心臓鼓動を検知するものが開発されている。3次元認識は自律車両制御のために研究され、実用化に近づいている。

③音声：マイク、振動計、音響認識

音声認識、音像定位、音声分離などは一般生活環境では実用化が進んでいるが、騒音環境や、瓦礫内などで伝搬特性の特定が困難な環境では研究途上である。

④触覚：接触、力、近接、テクスチャー、柔軟性

複雑な手触りやすべりなどのセンシングが可能になってきている。

⑤環境：ガス、放射線、塵埃、薬品

小型半導体センサが一般的となり、ロボットへの搭載が容易である。物質が限定できない場合には、質量分析計が必要である。

⑥非破壊検査機器

産業用途の機器が実用化されているが、センサプローブを対象物に密着させるなどの必要がある。

5. 福島第一原発事故対応に必要なロボット⁶⁾

原子力プラント事故対応ロボットにおいても、情報収集を主たる目的とするものと、工事や除染などの実作業を主とするものに大別される。ロボット導入の目的は、ロボットにより作業を代替し、作業員の被曝や危険性を最小限に抑えることにある。

ロボットは1台で多様な作業を行うことはできないため、移動・作業プラットフォームを共通化してセンサやツールなどを交換する方式により、さまざまな作業ニーズや予期しない事故に備える必要がある。

施設内には、状況把握や計測が困難な場所(高所、上階、地下、水中など)が多数ある。情報収集のためには、対象箇所までセンサ(カメラ、線量計等)やサンプリング装置(マニピュレータなど)を移動させて計測することにより、状況を把握し作業計画に反映させる必要がある。

実作業としては、除染や遮蔽板の設置によって作業員の被曝を軽減すること、重量物運搬などを支援して作業負担を軽減すること、配管工事等の危険作業を代替すること、が重要である。

(1) 調査・モニタリングロボット (図-1)

①移動プラットフォーム

原子力プラント内のすみずみまで調査・モニタリング・軽作業を行えるよう、共通で使用可能な高い移動能力を持つプラットフォームが必要である。

具体的には、45度の階段、段差、障害物などがあってもプラント建屋上階や地階などすみずみまで移動可能な地上移動プラットフォーム、障害物や錆などがあっても高さ5mのコンクリートや鉄などの壁面を移動できる壁移動プラットフォーム、配管や障害物があっても建屋内外高所に安全に移動可能な空中移動プラットフォーム、狭隘・屈曲などの条件にかかわらず配管の内外を移動できる配管用プラットフォーム、配管や障害物にかかわらず原子炉建屋地下階などの水中を移動できるプラットフォーム、が必要である。

これらのプラットフォームは、現場で必要とされるさまざまな環境条件(温度、高線量率、高湿度など)で動作する必要があり、狭隘部での移動や旋回、軽量・コンパクト、迅速性などの性能を備えていないといけない。バッテリーは4時間程度の連続作業を可能とすることが望ましく、搬入後すぐに作業を開始できる必要がある。防塵・防水が必要であり、防爆が望ましく、

除染が容易でなければならない。

②調査・モニタリング・軽作業の機能

原子力プラントにおいては、種々の要求がある。調査や異常点検としては、作業環境条件、ガス漏洩、臭い、水漏れ、液体、火災、火花、爆発、亀裂、隙間、減肉、穴、塗料剥げ、錆、構造損傷、緩み、脱落などを調べる必要がある。作業のモニタリングとしては、安全確認、作業環境監視、進捗監視、精度チェック、路面状況確認、音声対話支援、緊急事態支援、要救助者支援などを行う必要がある。

そのためには、映像(静止画・動画)、音、3次元形状、線量率、γ線源、温度画像、ガス濃度、温度・湿度などのセンシングの機能が必要である。また、液体、ガス、ダスト、粉体、固体、スミヤ式採取、土壌、植物などをサンプリングできる機能も必要である。また、軽作業(センサの移動、サンプリング、センサの設置、軽ドア・フタ開閉、軽量物運搬、軽溶接など)を行う機能が必要である。

調査・モニタリング・点検の結果を集約し、プラント内のどこで何が起きているかを「見える化」する必要がある。そのためには、各種センサに加えて、センサからの情報を図面上に記録する機能、収集情報をリ



図-1 原子力プラント内調査・モニタリングロボットシステム

アルタイム伝送する機能, 3次元マッピングする機能, 3次元位置計測する機能が必要である。

通信がプラント内全域で安定して行えることが必要であり, 大容量データの伝送や通信遅れが短い必要がある。無線の場合には電波遮蔽体が至るところにあっても通信できるためのアドホック中継機能が, 有線の場合には通信ケーブルが絡まないためのハンドリングが必要である。

遠隔操作は, 操作者にとって容易に高い操縦性を発揮できることが望まれ, 標準化された操縦卓に加えて, 短期で操縦訓練が完了できること, 半自律機能などによって操縦が支援されること, 単純作業が自動化されること, 操作者が高い没入感を持てることが望まれる。

③試験フィールドでの実証試験, 改良による実用性能の向上

システムを標準試験フィールドで繰り返し試験を行って改良すると共に, 操縦者の訓練を行い, 現場で必要な作業を実用的なレベルで行えるようにする必要がある。平時から使われるような体制作りが望ましい。こうしたフィールドを活用して, RoboCup や米国の DARPA Robotics Challenge のような手法により, 研究開発の進捗を見える化し, 競争的な環境の醸成に

よって技術革新を促進することも重要である。

(2) 作業のためのロボット (図-2)

①汎用重作業移動プラットフォーム

作業員に代わって作業ツールを移動させるための移動プラットフォームが必要である。これは 5. (1) のプラットフォームと比べて, 重量物 (数十 kg 以上) の取り扱いが必要な点が異なっており, そのため比較的大型でありながら狭隘部での移動旋回が可能な地上移動ロボットの形態となる。

移動台車は, 段差乗り越え機能が必要不可欠であるが, 必要に応じて移動能力を拡大するためのレール・リフター・建機などを併用する必要もある。マニピュレータは作業に応じた自由度, ツールの着脱可能, マスタースレーブやジョイスティックによる遠隔操作が必要である。作業によっては, 双腕や複数台の協調作業が有効である。

移動プラットフォームに備えられる通信, 遠隔操作, センサに関する必要要件は 4. (1) と共通である。

②遠隔重作業ツール

遠隔作業には, それぞれの作業に応じて取り替えられる作業ツールが必要である。

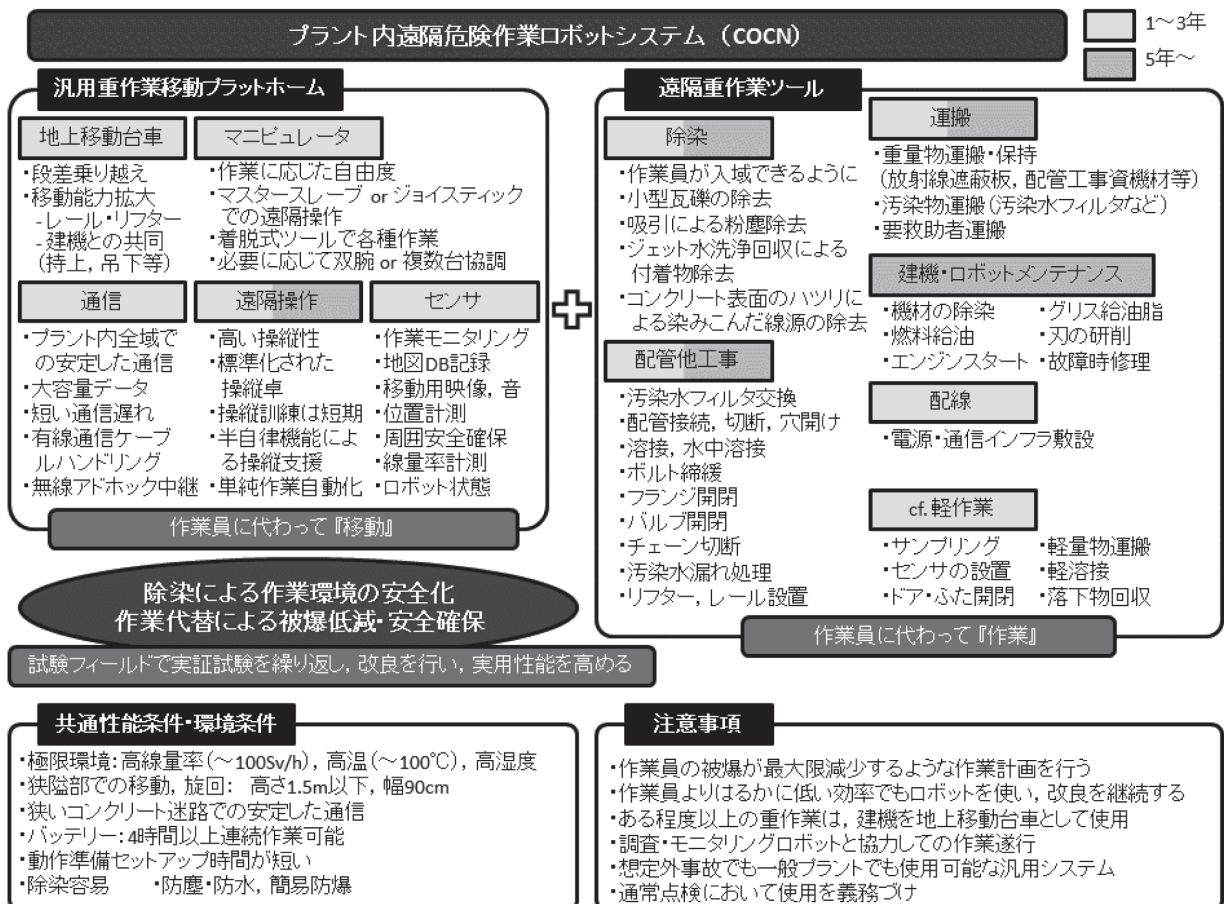


図-2 原子力プラント内遠隔危険作業ロボットシステム

原子力プラントでは、作業員が入域して安全に作業ができるようにするために、放射性物質の除染のニーズが最も高い。除染のためには、小型瓦礫の除去（大型瓦礫は建機で除去）、吸引による粉塵除去、ジェット水洗浄回収による付着物除去、コンクリート表面のハツリ（機械的手段、レーザーなど）による染み込んだ線源の除去、などの方法があり、現場状況に応じて選択できなければならない。

建屋内への重量物（放射線遮蔽板、配管工事資機材等）の運搬支援は重要である。また、被曝量を低減するために、汚染物運搬も重要な作業である。

配管等の工事は危険を伴うため、ロボットによる支援が求められている。具体的には、汚染水フィルタ交換、配管接続・切断・穴開け、溶接、ボルト締緩、フランジ開閉、バルブ開閉、チェーン切断、汚染水漏れ処理、リフター・レール等設置、などが必要であり、ツール交換による対応の必要がある。

建機やロボットのメンテナンスは被曝を伴うため、ロボット化のニーズがある。具体的には、機材の除染、給油、刃の研削、グリス給油脂、エンジンスタート、故障修理などである。また、配線作業（電源、通信インフラ敷設）のニーズもある。

(3) システム統合化・標準化・試験評価とキーとなる基盤技術の開発 (図一3)

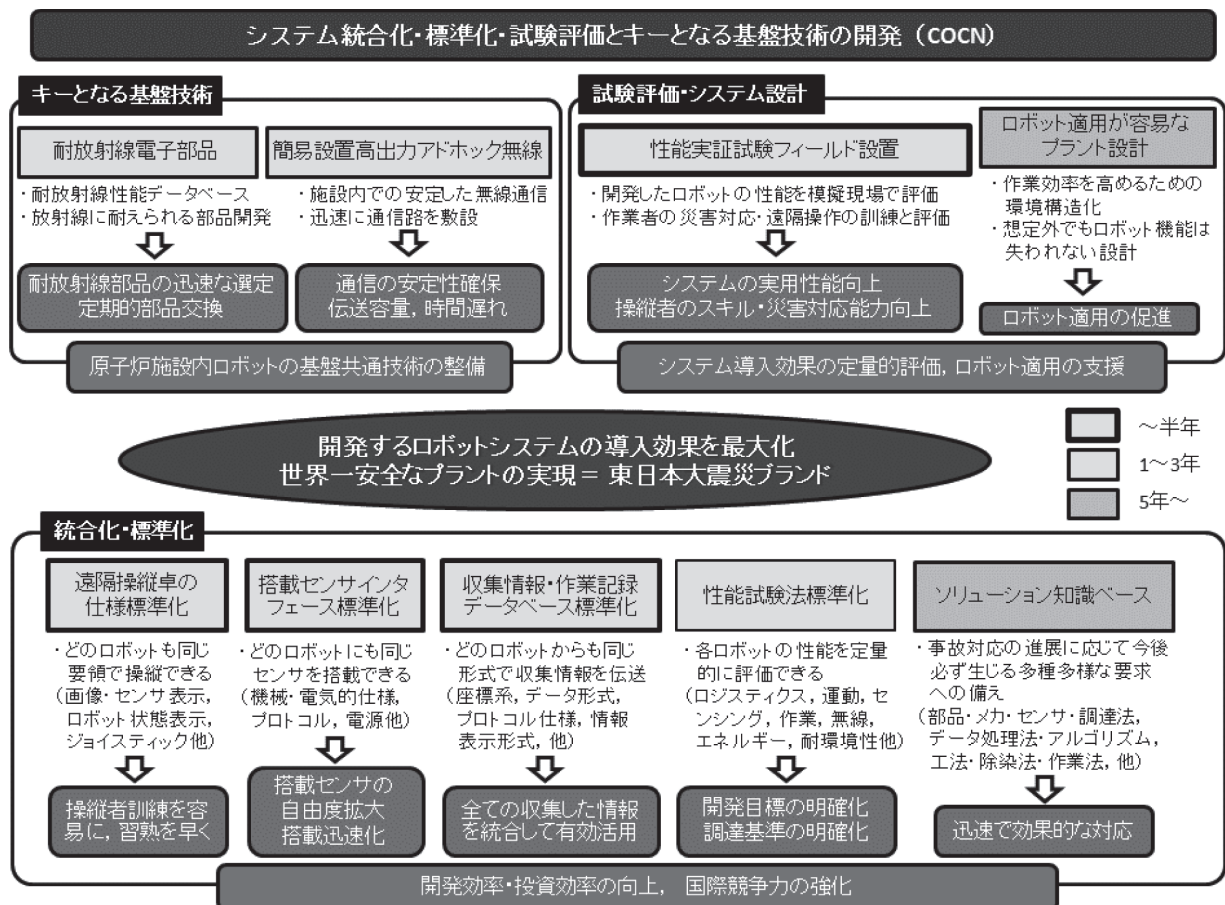
①性能試験評価法の確立と、性能試験評価フィールドの設置

ユーザ側での作業判断や機材選択を容易にし、開発側での目標・要求仕様・問題点を明確化するとともに、操作者の訓練基準を定めるために、各ロボットの現場適用性能や使用条件を定量的に評価できることが必要である。これにより、防災ロボットの実用化を促進し、現場配備・作業使用に至る障壁が下がる。

この目的のために、ロジスティクス、運動、センシング、作業、無線、エネルギー、耐環境性、耐久性、などに関する試験評価方法を標準化することが重要である。また、この基準に則って、性能試験評価フィールドを設置することが必要である。設置場所の選定には、被曝なく試験できること、専門家アドバイザ確保の容易性、運用コストなどを考慮し、実質的な成果を上げられるようにしなければならない。

②キーとなる基盤技術の開発と検討

簡易的に設置できる高出力のアドホック無線は、さまざまな防災ロボットに共通の課題であり、基盤技術として整備すること、専用の周波数帯域を確保するこ



図一3 原子力プラント用緊急対応ロボットのシステム統合化・標準化・試験評価・基盤技術開発

とによって配備と開発の両面から実用性の高い機材としていくことが必要である。原子力対応ロボットのコストを抑制するためには、専用品と比べて安価に入手可能な部品の耐放射線性能に関するデータベースの作成が不可欠である。

③遠隔操縦卓の仕様，搭載センサインタフェース，収集情報・作業記録データベースの標準化

投資効率を高め，世界的競争力を確保するために，オープンアーキテクチャ標準化が必要である。マーケットが小さい場合には，複数社が個別に開発を競う形態は効率的でない。国内外の企業が連合して世界標準を作ることによって，開発効率を高め，マーケットの整備を図ることが可能であり，それにより，災害対応・汎用保全ロボットの実用化と普及を促進できる。

6. 事例：Quince の場合⁷⁾

Quince は CBRNE 災害に対応することを目的として NEDO 戦略先端ロボット要素技術開発プロジェクトで開発された。その技術基盤は大都市大震災軽減化特別プロジェクトで培われた。爆発や倒壊による瓦礫環境を想定して開発したため，福島第一原発事故の現場で活用されることとなり，他のロボットでは不可能な 2 階以上の線量や画像等の情報収集を行い，冷温停止状態の実現や廃炉に向けた取り組みに貢献してきた。

同プロジェクトの開始にあたっては，次のようなブラッシングがなされた。

- 1) 想定シナリオを明確に設定。
- 2) 実証評価による複数開発者間の協調的競争導入。
- 3) 開発者が自社で取り組みたい内容をテーマに。

ここで取り上げた技術課題は，3. で述べたものと共通しており，以下のように取り組んだ。

(1) 運動性能

クローラ機構の前後に独立した 4 本のサブクローラ（フリッパ）を持つ変形クローラ構成を採用した。RoboCupRescue 競技会などの経験に基づき，ボディ下に物体が挟まってクローラによる運動制御が不可能にならないようにボディ全面を覆うようなクローラ構成とし，サブクローラが狭いギャップに挟まって抜けなくならないように形状の工夫を行った。また，実用化版の Quince では，防水・防塵・耐落下性能を確保するため，駆動系の緩衝機構やシールなどを設け，石・砂・泥・雪・がれきなどが詰まらないように機械設計の工夫を行った。70 度の階段の昇降，30 度の階段途

中での U ターンを可能にするため，低重心設計を行った。

これらの性能を改良し，実用化するため，RoboCup Rescue 競技世界大会への出場，世界最大の都市災害救助の訓練施設である Disaster City での災害対応ロボット性能評価訓練会への出場，大規模振動台 E-Defense での 3 階建木造家屋の倒壊試験現場の活用，東京消防庁立川訓練所の瓦礫におけるデモンストラクション，落下試験，砂浜試験，雪中実験などを行い，問題点の改善を重ねてきた。その結果，RoboCup 2007 Atlanta 大会および 2009 Graz 大会での運動性能部門での世界優勝，Disaster City で 40 m 四方に積み上げられた木材瓦礫・コンクリート瓦礫の走破，などを果たし，高い実用性能を実証した。

(2) 遠隔操作支援

多くの人が慣れているゲーム用ジョイスティックによる操縦方式を採用し，RoboCupRescue や Disaster City での走行を通じて，使いやすさを向上させた。

災害現場は不定形であり，自律制御で作業を進めることには困難が多いが，知能ロボット技術により操作者の操縦を支援することは有効である。操作者が環境状況を容易に正確に認識でき，かつ，操作者が複雑な操作指令を容易に間違いなく与えられるようにすること，が必要である。

被災家屋では，床が瓦礫状態となって段差やギャップが発生し，複雑な形状の障害物が存在し，電線や建材が垂れ下がった環境が想定される。ロボットに搭載した照明に頼らざるを得ないことや，塵埃が降り積もって色彩に乏しく物体として認識しづらいために，カメラ映像によって操縦することはしばしば困難である。これを解決するために，周囲環境の 3 次元形状を計測し，視点を変えながら操縦者に提示する方式を開発した。これは，特に狭い場所の形状とその中でのロボットの位置形状を知ることに役立ち，操縦に有効であることが各種実験によって示された。

階段や不整地で調査やモニタリングの作業を行うためには，操縦をできるだけ自動化して，操作者に負担をかけない必要がある。そのため，レーザレンジファインダ，あるいは，距離センサとサブクローラの押しつけ力の計測によって，ロボットの推進方向の路面の凹凸を計測・推定し，自律的にロボットの速度やサブクローラの上げ下げを調節する技術を開発した。これにより，操作者は単に前後進旋回の指令を与えるだけで 30 度程度の階段や不整地なら走行できるようになった。Disaster City では，FEMA TF 隊員がほと

んど練習なしで、訓練用の倒壊家屋内や列車衝突事故現場などを容易に操縦できることが示された。

ロボット投入地点から災害地点まで比較的距離がある場合には、少数の操作者で多数のロボットを移送できることが望ましい。そのため、操作者が操縦画面上で経路を次々と指定していき、ロボットがその経路に追従して動いていく操縦方式を開発した。また、周囲の障害物や動いている人間などを自動的に避ける機能を開発し、安全性の向上を実現した。

PC ゲームエンジンを活用した操縦訓練シミュレーターを開発し、パソコン上での操縦訓練を可能にした。

(3) 無線通信

地下街 700 m の空間において、複数台のロボットからの映像や 3 次元形状データを収集し、伝送遅延が少なく違和感なく操縦できるようにするために、有線無線ハイブリッドアドホックネットワークを開発した。ケーブル敷設ロボットによって幹線のネットワークを敷設し、アクセスポイントから直接通信し、あるいは、アドホックネットワークで自動的に中継を行う方式により、通信遅れを最小限に抑えることができた。

(4) 情報統合

複数台のロボットからの情報を収集し、GIS 上にマッピングできる機能や、GIS 上でデータ統合や認識処理などを行える機能を実現した。

7. おわりに

本稿では、主として技術的観点から災害対応ロボットのあるべき姿について考察を行った。ここでは述べなかったもう一つの重要な点として、配備や運用の形態、制度や体制などの課題がある。これらの問題が解決され、ロボットが災害対応や復旧などに広く活用されることを願っている。

JICMA

《参考文献》

- 1) 中央防災会議、防災対策推進検討会議、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ、南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告）、中央防災会議（平成 24 年 9 月 6 日）資料、2012。
- 2) 連載講座、軽水炉の確率論的安全評価（PSA）入門、日本原子力学会誌、Vol. 48, No. 3-10, 2006。
- 3) Satoshi Tadokoro Ed., Rescue Robotics - DDT Project on Robots and Systems for Urban Search and Rescue, Springer, 2009。
- 4) 消防庁、全国政令都市・主要都市の 49 消防局への質問結果、消防・防災ロボット技術のあり方研究会資料。
- 5) 日本機械学会、東日本大震災調査・提言分科会、機械設備の被害状況と耐震対策技術の有効性報告、2012。
- 6) 産業競争力懇談会 COCN、災害対応ロボットと運用システムのあり方、2011 年度プロジェクト最終報告、2011。
- 7) 国際レスキューシステム研究機構他、戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト被災建造物内移動 RT システム（特殊環境用ロボット分野）閉鎖空間内高速走行探査群ロボット成果報告書、NEDO, 2011。

【筆者紹介】

田所 諭（たどころ さとし）
 東北大学
 大学院情報科学研究科、災害科学国際研究所
 教授
 国際レスキューシステム研究機構
 会長

