

2.2.9 災害対応ロボット

(1) 研究開発領域の定義

地震、津波、集中豪雨による水害、台風による暴風雨、山崩れ・地滑り、森林火事、竜巻、火山噴火、土石流、雪崩、未知のウイルスによる感染症などの自然災害および工場でのプラント事故、原子力発電所の事故、公共交通機関での事故、テロによる事故、火災などの人為災害が世界で頻繁に発生している。これらの災害現場に人間が入っていくには大きなリスクがある。本領域は、人間の代わりに災害直後の現場に進入し、情報収集や人命救助などの緊急対応や災害からの復旧復興に関わるタスクを極限環境で遂行するロボット（災害対応ロボット）に関わる研究開発領域である。なお、災害対応ロボットはレスキューロボットとも言う。

(2) キーワード

アクセシビリティ、耐環境性（防塵防水防爆性、耐放射線性）、Human-in-the-loop、ユーザーフレンドリーなインターフェース、自律機能、ロバストな通信、時空間情報統合システム、インターフェースの共通化・標準化、レスキューロボット、ドローン

(3) 研究開発領域の概要

世界各地で災害が多発しており、それに備えることは各国共通の課題である。災害には、自然災害（洪水、地滑り、地震、台風、森林火災、雪崩、未知のウイルスによる感染症など）と人為災害（テロ、プラント災害、火災、交通事故など）があるが、大規模災害では多くの人が被災し、被災した国の組織と経済に大きな影響を与える。災害の様相は国の風土や文化によってさまざまであるが、災害対応技術の基礎となる基盤技術は共通であり、特に情報収集はあらゆる災害において最重要である。日本では阪神淡路大震災で地震直後に瓦礫の中に閉じ込められた被災者の生存確率は3日後には5%以下になってしまうことが分かった。この「黄金の72時間」以内に、被災者を発見し救助することがその生死を分ける。災害の被害をいかに少なくできるかは、初動にかかっている。二次災害を起こすことなく、迅速に大域的な情報と局所的な情報を収集し、適切な対応策を実施することが重要である¹⁾。また、2019年12月に発生したCOVID-19の世界的な感染拡大は、災害として考える必要がある。未知のウイルスに対する備えや対応は多くの課題を残したままである。

災害時には電力・人材・時間・情報・食料など全てのリソースが不足する。このリソース不足を技術によって補完することで、より効果的効率的に災害対応活動を支援することは工学分野の使命のひとつである。特に情報が錯綜する初動時に、迅速に正確な情報を収集し共有することは極めて重要である。要救助者の位置の特定など、局所的な詳細情報を提供できれば、救助活動の効率化に大きく貢献する。これらの時間と空間に依存した大域的・局所的情報を、時空間地理情報システムにて管理・利活用することは、災害初動期だけではなく復旧・復興期も含め重要である。

災害では、被災者が受けた災害時の精神的ダメージや避難所・仮設住宅での生活に対するストレスでPTSDなどを発症する場合もある。また、被災者だけでなくレスキュー隊員・医療従事者・災害対応支援者なども同じく精神的なストレスを受けることになる。これらのストレスをケアすることも災害対応として重要である。アザラシ型ロボットのパロ²⁾はメンタルケアに有効であることが医学的にも証明されており、ロボット技術がメンタルケアにも貢献できることを示している。今後の進展が期待される。

日本は災害大国だと言われている。災害を経験した国は、その対応策を次に同じ問題に直面する国々に示す必要がある。しかし、全ての国にとって、それが可能とは限らない。地震・津波・豪雨・火山の噴火・台風・原子力発電所の事故・COVID-19による感染症など多くの災害を経験した災害大国であり先進国である日本は、災害を経験した国々の代表として、その解決策を世界に示す必要があり、それが日本のプレゼンスを示すことにもなる。

[研究開発の動向]

日本では、1995年の阪神淡路大震災や地下鉄サリン事件を契機として、大都市直下型の地震や地下街などの閉鎖空間にけるNBC¹テロ災害などを想定して、大学の研究者を中心にレスキューロボット開発が進められてきた¹⁾。海外では、2001年にハイジャックされた旅客機がニューヨークの世界貿易センタービルに突っ込むというテロが発生した。この9.11テロの現場において、軍用の遠隔操作ロボットを使って遺体を発見するという事例があった。また、フランスなど原子力発電所を積極的に進めている国々では、事故時に備えて原子力災害対応ロボットが開発・配備されてきた。日本でも1999年に発生した東海村JCO臨界事故直後に、原子力災害対応ロボットが政府主導で開発されたが、開発のみにとどまっておき、実運用には至らなかった。2011年に日本で発生した東日本大震災では、陸海空のロボットが実災害現場で使用された^{3), 4)}。JSTとNSFの支援で、日米の合同チームが結成され、水中ロボットによる瓦礫の調査や遺体の探索が実施された⁵⁾。また、福島第1原子力発電所の事故現場では、無人化施工機械が瓦礫の除去に活用された。これは、国土交通省が普賢岳における土石流対策のための土木工事を遠隔で行うためのシステム開発を継続してきた成果である。現場での実運用を通じて開発にフィードバックする体制を継続的に支援してきたからこそ、福島第1原発での成果につながった。また、建屋の中の情報収集に国内外のロボットが用いられた。廃炉まで30～40年を要すると予想されており、現在でもさまざまなロボットが開発されている。

米国のレスキューロボットの開発は、国防高等研究計画局（DARPA）からの豊富な資金援助を背景に軍用ロボット技術を転用することで進められてきた。これに比べ、日本では災害対応のみに用途が限られるレスキューロボットでは市場を形成することはできず、大学の研究者が開発を担ってきたため、商品化は困難な状況であった。しかし、東日本大震災における福島原発事故対応のために、政府も予算をつぎ込んで災害対応ロボットの開発を進めるようになり、状況は少しずつではあるが変化している。今後は、平常時に使っているロボットシステムを緊急時にも使うという、平常時と緊急時のデュアルユースの考え方で災害対応ロボットシステムの開発を進めることが重要である。

ヨーロッパ諸国の原子力発電所を積極的に進めていた国々では、ドイツ電力会社等によって出資設立されたKHG社やフランスの原子力事業者によって設立されたグループアントラ社などにより、事故時に備えて原子力災害対応ロボットが開発・配備されてきた。2015年から2017年までANR（The French National Research Agency）から公募された、石油サイト向け自律ロボットの国際コンテストARGOS Challenge - Autonomous Robots for Gas & Oil Sitesが開催され、プラントの保守点検および緊急時の対応にロボット技術を導入する試みがなされた。また、2018年にEUのプロジェクトであるHorizon2020において、Boosting the effectiveness of the Security Union（SU）の分野でInnovation for disaster-resilienceに関する研究開発が実施されるなど、継続的に災害対応ロボットシステムに関するプロジェクトが採択・実施されており、災害対応の初動における技術の重要性が認識されていることがうかがえる。

日本では、World Robot Summit（WRS）のプレ大会が2018年に東京ビッグサイトで開催され、災害対応のカテゴリでプラント災害予防チャレンジ、災害対応標準チャレンジ、トンネル事故対応・復旧チャレンジの三つの競技が実施された。2021年にはWRS2020本大会が福島ロボットテストフィールドで実施された⁶⁾。プラント災害予防チャレンジは、平常時と緊急時のデュアルユースの考え方に基づいたロボット競技会であり、本大会では東北大学のQuixが優勝した。平常時には、プラントの保守点検、施設の警備、建物の床下・天井裏の点検などにロボットを適用し、緊急時には災害対応に活用することにより、災害対応ロボットシステムの市場が創出され普及が加速する。その先鞭として、三菱重工はプラント自動巡回点検防爆ロボットEXROVRを開発し、商品化している⁷⁾。このロボットは、6自由度のマニピュレータを持ち、自律移動機能・自動充電機能（非接触自動給電）などを搭載しており、複雑なプラント内での夜間の自動点検などに活用が期

1 核物質、生物剤又は化学剤若しくはこれらを用いた大量破壊（殺傷）兵器を使用したテロ [首相官邸のHPより]

待されている。

石油コンビナートにおける大規模・特殊な災害では、消防隊が現場に近づけない等の大きな課題がある。消防庁では、耐熱性が高く、災害状況の画像伝送や放水等の消防活動を行うAI技術を活用した消防ロボットシステムの研究開発を進めている⁸⁾。指令システムを搭載した搬送車両、飛行型偵察・監視ロボット、走行型偵察・監視ロボット、放水砲ロボット、ホース延長ロボットで構成された消防ロボットシステムが開発され、2019年に千葉県市原市消防にスクラムフォースとして配備されている。

アジアに目を向けてみると、中国は各分野で国策として多額の予算をかけて、世界のトップを目指して研究開発を加速させている⁹⁾。第14次5カ年計画(2021-2025)では、ロボットを鉱業、石油、化学、電力、建設、航空、宇宙、原子力などさまざまな産業に適用する必要性が指摘されている。災害対応ロボットシステム分野もその例外ではなく、地震などの自然災害直後に用いるロボットから、災害調査や公共安全等に用いられるロボットまでさまざまなロボットの開発が精力的に行われている。開発されているレスキューロボットは地震災害対応ロボット、消防ロボット、災害調査無人飛行ロボット、水難事故対応ロボット、水中ロボットなどである。開発体制は、瀋陽自動化研究所、上海交通大学、ハルビン工業大学、北京航空航天大学、北京理工大学、中国鉱山大学などの研究所や大学などから、企業へとその中心が遷移し、商品化が進められている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

近年の人工知能の進展は目覚ましく、深層学習(Deep Learning)が画像認識に対して有効であることが明らかになり、ロボットの認識技術も大幅な向上が期待されている。災害対応分野では、被災者の発見などに適用が試みられている。また、移動ロボットの自己位置と環境地図を同時に作製するSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術にも大きな進展があり、ロボットの自律化に大きく貢献している。さらに、ドローン(無人ヘリコプター)の活用が加速しており、自律飛行技術も実用化され、大規模災害時の大域的情報収集に非常に有効である。倒壊家屋内の調査や平常時のインフラ点検を目的として、ドローンを細い骨組みで覆った球殻ドローンが開発され実用化されている。なお、災害対応ロボットに限らないが、ロボットのソフトウェアのオープン化も進み、ミドルウェアであるROS(Robot Operating System)や動力学シミュレーターGazeboが普及し、世界中で活用され、全世界の研究者のアルゴリズムやソフトウェアなどの知見を共有できるようになってきた。日本でも、同様な目的で産業技術総合研究所(産総研)が中心となりRT(ロボット技術)ミドルウェアの開発普及に向けた努力がなされている。

内閣府が進めた革新的研究開発推進プロジェクト(ImPACT: Impulsing PARadigm Change through disruptive Technologies)では、「タフ・ロボテックス・チャレンジ(TRC)」が採択され、2014年度から5年間のプロジェクトが実施された¹⁰⁾。TRCでは、(1)サイバー救助犬(センサーユニットなどを装備し情報化された救助犬)、(2)細径索状ロボット(瓦礫内の探査を目的とした能動スコープカメラ)、(3)太径索状ロボット(プラント点検を目的としたヘビ型ロボット)、(4)脚ロボット(二足歩行、四足歩行、腹這い移動などを実現する4脚ロボット)、(5)飛行ロボット(劣悪環境で自律飛行可能な無人ヘリコプター)、(6)建設ロボット(双腕を搭載した建設ロボット)、(7)極限油圧コンポーネント(小型軽量大出力の油圧アクチュエータユニット)(8)シミュレーター(動力学シミュレーター:Choreonoid)、(9)フィールド評価・安全・STM(Standard Test Method)に関する研究開発と実用化に向けたフィールド評価が実施された¹⁰⁾。また、2019年から3年間JSTのSICORP e-ASIAプログラム「防災」分野で日本・ロシア・タイの3カ国国際共同プロジェクト「洪水と地すべり災害における分散的異種ロボット群を用いた情報システム」が実施された¹¹⁾。2021年から日本の内閣府が進めるMoonshot Research & Development Programの目標3「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」では、災害対応をも視野に入れた「多様な緩急に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」プロジェクトが推進されてい

る¹²⁾。また、2023年から実施予定の「月面探査/拠点構築のための自己再生型AIロボット」も地上展開として災害対応を視野に入れて研究開発が進められる予定である。

米国Boston Dynamics社が開発した4脚ロボットSpotは、重量2kgで、可搬重量が17kgであり、360度の環境認識が可能で、必要に応じたセンサーを搭載することができる。このロボットは軍用に開発されたBigDogで培われた技術が転用されたものであり、民生用としてさまざまな現場での点検や調査および災害時に適用可能であり、試験運用がなされている。

ヨーロッパでは、2018年から開始されたEUのプロジェクトであるHorizon2020において、災害対応ロボットシステムの研究開発に関するプロジェクトが実施されている。既に終了した、CENTAUROSプロジェクト¹³⁾では、先端に車輪を持つ5自由度の4脚に7自由度アームと9自由度ハンドにより構成される腕を二つ搭載した胴体を持つ遠隔操作ロボットが、ICARUSプロジェクト¹⁴⁾では人間の緊急対応支援チームの補助をするUGV・UAV群ロボットにより収集された情報に基づいて3Dの環境モデルをリアルタイムに構築するシステムが開発された。Horizon2020では災害対応ロボットシステムに関する、CURSORプロジェクト¹⁵⁾、INGENIOUSプロジェクト¹⁶⁾、ResponseDronsプロジェクト¹⁷⁾、Proboscisプロジェクト¹⁸⁾が実施された。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本発の研究者を対象とした国際的なロボット競技会であるロボカップにおいて、ロボカップレスキュー実機リーグが2001年から実施され、現在、世界大会のほか各国でロボカップオープンが開催されている¹⁹⁾、²⁰⁾。この競技会は、災害空間を模擬した実寸大のフィールドで、開発したロボットシステムを用いて、被災者を含めた環境情報をいかに正確に多く収集できるかを競うものである。本競技のフィールドは米国国立標準技術研究所(NIST)が主導して設計した。NISTは米国ホームランドセキュリティ省からレスキューロボットの評価方法を標準化するプロジェクトを受託し、国際標準の策定を行ってきた。この評価方法は、本競技を長年実施して蓄積された知見を基盤として、Disaster Cityなどを利用したロボットの評価実験における多くのレスキュー隊員たちの協力のもと、試行錯誤を経て構築されている。したがって、この評価方法には現場の隊員のニーズが反映されており、将来的にはここで構築された評価方法がレスキューロボットシステムの調達での重要な役割を担うことになる。レスキューロボットリーグにおいて、この評価方法の基盤をなすフィールドを採用することにより、競技を通して現実的な課題に解を与える技術が培われるとともに、評価方法も洗練されていくことになる。2019年シドニー世界大会では、日本の京都大学のSHINOBIチームが総合優勝した。2020、2021年はCOVID-19の影響で現地開催は中止されたが、2022年にバンコクで開催された世界大会でもSHINOBIチームが総合優勝し2連覇を果たした。技術的には、不整地の自律走破やロボット転倒時の自律復帰機能など遠隔操作システムに自律機能の導入が進んでいる。このような災害現場を模した実寸大の模擬フィールドでロボットを運用することは、米国のように軍用ロボットの転用といった研究開発シナリオが成り立たない日本では特に重要である。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)の楢葉遠隔技術開発センターは、福島第1原子力発電所の廃炉推進のために遠隔操作機器(ロボット等)の開発実証施設として整備され、2016年4月より外部利用を開始している。研究管理棟は、廃炉作業の作業計画検討や作業員訓練等に活用可能なバーチャルリアリティシステム、ロボットシミュレーター、音響映像設備を備えている。試験棟は、ロボット等の性能評価のための試験設備を備えるほか、屋内大空間を活用した実規模モックアップ試験に利用することが可能である。また、2020年に全面開所された福島ロボットテストフィールド(RTF)は「ロボット社会実装により安全で豊かな社会の実現に貢献する」ことを目的として、福島イノベーション・コースト構想におけるロボット・ドローンなど航空機の研究開発拠点として位置付けられている²¹⁾。福島RTFでは、陸海空のフィールドロボットの实証実験、インフラ点検・災害対応エリア、無人航空機エリア、水中・水上ロボットエリア、500mの滑走路が整備されており、実践的な実証実験やWRSなどのロボット競技会などが実施されている。これらの施設を有効に活用して、研究開発を進めるためのファンディング戦略が必要である。

東京オリンピックに合わせて開催予定であった、WRS (World Robot Samite) 2020の国際ロボット競技大会が、COVID-19の影響で延期され2021年に開催された。(1) BtoB中心の分野(ものづくり、農林水産業・食品産業分野)、(2) BtoC中心の分野(サービス、介護・医療分野)、(3) インフラ・災害対応・建設分野の3分野で競技が開催された。(3)では、プラント点検、プラントの中の人の発見・救助などが活用シーンとして想定されており、「プラント災害予防チャレンジ」と「トンネル事故災害対応・復旧チャレンジ」、「災害対応標準性能評価チャレンジ」の3種目が、福島RTFで実施された。プラント災害予防チャレンジでは、プラント設備のクラックや錆の自動検出やメータの自動読み取りなど点検タスクにAI技術が導入され、平常時と緊急時のデュアルユースを加速させる試みがなされている。

EUのHorizon2020で現在実施中のCURSORプロジェクト¹⁵⁾は、EUと日本の国際共同プロジェクトであり、日本側はJSTが東北大学に研究開発費用を提供している。大型UGVと小型UGVとUAVを開発し、母船UAVが通信のハブになり、ロボット群と制御センターとの通信を可能としている。また、INGENIOUSプロジェクト¹⁶⁾とResponseDroneプロジェクト¹⁷⁾は、現在実施中のEUと韓国との国際共同プロジェクトであり、前者はUAVで収集された情報をレスキュー隊員に提示するための装着デバイス、後者は収集された情報の共有システムと意思決定支援システムを開発している。

中国では2021年2022年と災害対応に関する大規模演習「緊急使命」においてロボットの運用試験が実施されている。「緊急使命2022」の演習では、レベル7.5の地震にて、家屋の倒壊や死傷者が多数発生したほか、被災地の一部の道路、電気、水道、ガス、通信が寸断され、山間部で土砂崩れや倒木が発生した状況を想定し、延べ5000人以上が参加した。DEEPRobotics社(曇深处科技)²²⁾が開発した四足ロボット絶影X20は、温度カメラ、放射線センサー、有毒ガスセンサー、点群センサーなどが装備されており、遠隔操作で災害現場を探索した。Beijing lesentech社(北京力升高科)²³⁾が開発した長いアームで高所の消火活動や火災が発生した建物の窓から部屋に進入して内部を消火することが可能な消防ロボット「RXR-M40L-16」も演習に参加した。Beijing lesentechは、消防員の代わりに燃えている建物に進入でき1000°Cの熱に30分耐える消防ロボット「RXR-M80D-AX2」を開発しており、この会社のロボットは数十回の使用実績がある。成都時代星光科技²⁴⁾が開発した大型ドローンは、可搬重量25kg、動作時間5時間で、車での高速充電や複数ロボットの制御、長距離通信(5km)が可能である。森林火災、山岳事故の調査にも使用が可能で、赤外線熱画像で被害者を発見して非常食を運搬することが想定されている。中国航空工業集团有限公司²⁵⁾が生産する翼竜-2H(CAIG Wing Loong-2H)は長時間滞空無人航空機の災害対応バージョンである。災害現場の無線通信が完全に破壊されることを想定し、長時間の携帯ネットワーク(2G、3G、4G)を提供することができる。2021年9月5日に四川の地震災害に使用された実績をもつ。また、2019年長江幹線水域共同搜索救助演習が、重慶市福陵区の黄旗埠頭の海域で開催された。水上消防ロボット(上海欧迅睿智能科技(株)OXR-S10)、消防ドローンロボット²⁶⁾や人が持ち運べる水上レスキューロボット「イルカ1号」が参加した。イルカ1号は遠隔操作することも可能であり、緊急時は救命ロボットを水面に投げただけで、溺れている人のそばまで素早く正確に航行し、安全な場所に牽引することが可能である。ロボットの動作時間35分、長距離リモコン800m、耐荷重200kgである。2021年7月の洪水災害に100台ほど配備され、試験運用された²⁷⁾。また、中国ではCOVID-19対応ロボットとして、自動パトロールロボット、消毒液散布ロボット、サービスロボット、医療ロボットなどさまざまなロボットが開発された。中国政府によりCOVID-19対応における科学技術支援に優れた企業として表彰された79社の内、18社がロボット会社である²⁸⁾。消毒液を噴霧するロボットとして、屋内を想定した创泽机器人(株)社²⁹⁾のCZ Proや屋外を想定した山东国兴智能科技(株)社³⁰⁾のクローラー型ロボットが開発された。また、墨影科技(株)³¹⁾が開発した鼻咽喉ぬぐいによる検体採取ロボットは、工業ロボットを改造したもので、深圳市罗湖医院において試験運用されている。新聞によると2022年6月14日までに634名の被験者が使用した。

また、中国でも災害対応に関するロボット競技会が開催されている。「智创杯A-Tec」(Advanced Technology & Engineering Challenge)が深圳市政府と清華大学が主催し2020年10月26日から29日

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

に開催された³²⁾。ロボット競技の課題は「災害後の地域の探索と救援」であった。ロボット競技として、複雑な通路を通過する、障害物を取り除く、ドアを開ける、階段を上り下りする、未知の領域を自律的に通過する、濃い煙の環境で火災に対処する、人命を救うなど13の競技タスクが用意された。実際の災害後の環境をシミュレートするために構築された4,000平方メートルの会場で、ロボットが同じステージで競い合った。ロボットは2時間かけて、競技タスクに挑戦し、クリアした競技の数で優勝チームが決定された。優勝賞金800万元(当時約1億3600万円)であった。国際的な競技として準備されたが、コロナの影響で大会の規模が縮小された。

(5) 科学技術的課題

大規模災害現場ではライフラインや通信網など社会基盤システムが大きなダメージを受け、使用可能な情報インフラが限られているという想定をしなければならぬ³³⁾。災害直後にテンポラリーにロバストな通信インフラを構築することは重要であり大きな課題である。有線通信は確実であるが、移動ロボットの運動の制約になる。陸上のロボットではケーブルをロボット本体に搭載して手繰りだす方式が採られているが、本体重量の増加を招いてしまう。実際、福島第1原発の事故対応でもケーブルのトラブルにより建屋内に取り残されたままのロボットも存在する。無線通信の場合には、アドホックネットワークなどが適用されているが、ホップするごとに伝送量が減少してしまうなど問題がある。また、通信と同様に、エネルギー供給に関しても、有線と無線(バッテリー駆動)のトレードオフがある。災害現場でのエネルギー源の確保も大きな問題である。

原子力発電所の事故の様な災害現場では、放射能の影響を考えた耐放射線性を付与する必要がある。また、尼崎の列車脱線事故やトンネル内の事故やプラント災害など、火気による爆発の危険性がある場合には、防爆性能が要求される。このように、防塵防水に始まって防爆や耐放射線性など耐環境性の実現も重要な課題である。

ドローンは上空からの情報収集には非常に有効な手段であり、福島第1原発の被害状況をはじめ火山、氾濫した河川、山崩れなどさまざまな災害の被害状況を上空から把握する調査に適用された。しかし、運用が容易な小型のドローンは強風下での飛行が困難であり、建物の壁などの近くでは気流の乱れにより安定な飛行は難しい³⁴⁾。航続時間も30分程度であり、適用に大きな制約が課される。航続時間を延ばそうとすると大容量のバッテリーを搭載する必要があり、機体重量の増加を招く。ここにもトレードオフの問題がある。効率の良い(軽量で長時間持ち、急速充電が可能な)安全なバッテリーの開発が急務である。また、屋外でのドローンの自己位置同定はGPSを用いれば精度よく計測でき自律飛行も可能であるが、屋内の自律飛行にはSLAMのような自己位置同定技術が必須であり、非GPS環境下で高精度の自己位置同定を可能とする技術開発が求められる。

東日本大震災において日米の合同チームなどにより水中ロボットを用いた、港の瓦礫の調査・ご遺体の探索・沖合の漁場や養殖場の調査などが実施された⁵⁾。瓦礫などの対象の位置を特定し、地理情報システムに連動させて情報を記録し、その後の瓦礫撤去や養殖施設再生など、あらゆる場面で活用されることになる。水中でセンシングに有効な物理量は光と音波であり、これらの物理量を用いて水中の対象物の位置を特定することは非常に難しく、精度の高い位置計測装置は非常に高価である。水中での位置同定技術開発も大きな課題である。

陸(UGV: Unmanned Ground Vehicle)・海(UUV: Unmanned Underwater Vehicle)・空(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)のそれぞれのロボット群による効率的な被害状況の調査には、システム全体の故障に対するリスクを分散するために、集中制御でなく自律分散制御系を構築する必要がある。また、UGV群、UUV群、UAV群で構成された異種のロボット群により自律分散協調的に情報収集や救助支援タスクを実現できる安価で大量に現場に投入でき、故障に対してロバストな異種群ロボットシステムの構築も今後の課題である。

さらに、陸海空すべてのロボットに共通するが、ロボットを操作するオペレーターの訓練には時間を要する

ことに注意が必要である。災害現場は未知の環境であり、人間による遠隔操作が基本である。災害現場を模したモックアップを構築し、実災害さながらの訓練を通して、日頃からの運用やメンテナンスを実施することは、有事にシステムを有効に機能させるための必須の条件である。また、実災害現場でのロボット操作には失敗が許されず、オペレーターにかかる精神的および肉体的負担は想像を絶するものがある。オペレーターの負担を軽減化できるインターフェースの開発が重要である。そのために、未知の不整地環境でも自律的に移動や作業が可能な知能に関する研究開発を推進し、半自律機能を搭載していくことも今後の大きな課題である。

現状ではレスキューロボットに期待されている主なタスクは情報収集であり、アクセシビリティをどのように向上させるかが課題となっているが、今後は移動からさまざまな作業へと適用できるタスクを広げていく必要がある。さらに、広域災害では情報が錯綜する。携帯電話などによる人間からの情報や固定センサー・レスキューロボットなどで収集した情報など膨大な時空間情報を柔軟にハンドリングでき、災害直後だけでなく復旧復興を経て平時に至るまでを含めたそれぞれの時期に、有効に活用できる情報システムの構築は重要な課題である。また、収集したリアルタイムの災害情報を用いて、災害対応戦略を検討する災害対応シミュレーターを構築し、効果的効率的な意思決定支援をすることができる情報システムとシミュレーターが連動した統合化システムを構築することも重要な課題である。

(6) その他の課題

2011年3月11日に発生した東日本大震災は地震動や津波による被害さらには原子力発電所の事故が折り重なった巨大複合災害であり、日本で災害対応ロボットが運用された初めての大災害となった^{3), 4)}。ここで、これらの活動における課題について考える³²⁾。事故後の原子炉建屋内は強い放射能が予想され、ロボットに搭載されている電子機器やセンサー類の耐放射能性を十分検討する必要がある。電子機器はビット反転する可能性があり、CCDカメラやLRFなどのセンサーはいずれ使用不可能になってしまう。耐性が無い場合には何らかの措置を講ずる必要がある。福島第1原発の対応では準備に時間を要した。実は、1999年に発生した東海村JCO臨界事故が起こったことを受けて、国がプロジェクトを設置し、短期間に多くの技術者が心血を注いで放射能災害対応ロボットが開発された。しかし、製作しただけで、ロボットシステムの運用やメンテナンスや改良に必要な予算が計上されず、技術者たちもそのプロジェクトから離れざるを得なかった。せっかく培った技術や知見が消えて行ってしまった。無人化施工機械の成功例を見ても研究開発を継続し、現場での運用実績を積み重ねることが重要であることは明白である。

東日本大震災においてレスキューロボットを用いた災害対応支援のための日米の合同チームが結成されたときに、なかなか公的な機関からの要請が出ず、米国チームの来日が遅れた経緯がある⁵⁾。即時の受け入れが可能なような制度の設計が必要である。また、活動予算に関しても直後からの支援は重要である。海外からの支援を受け入れる場合に、協調活動をスムーズに進めるためには、システムの統合や情報の共有が容易なようにプロトコルを国際的に標準化しておく必要がある。また、前節で技術的課題としても述べたが、無線通信に関して有事には特定の周波数帯の使用や民生用で許可されている微弱な電波のパワーの増大を認めるような法整備も必要である。

東日本大震災における福島第1原発の事故は人類史上最悪の事故であり、その廃炉には30 - 40年に歳月が必要と言われている。これは、われわれの世代だけでは解決できない未来への大いなる負の遺産である。この課題を次世代の人たちに託していかなければならない。その意味でも、経験や英知の伝承のために次世代を担う人材育成は非常に大切である。いくつもの要因が複雑に絡み合った大規模複合災害に立ち向かうためには、自分の専門に関する知識や技術だけでは不十分である。自治体職員・レスキュー隊員・医師や看護師・臨床心理士をはじめ他機関や他分野の職員・研究者・技術者・支援者などとの協力により課題を解決することが必要である。さらに、政治や経済の状況を正確に把握したうえで、行政と協働することにより初めて大規模複合災害に対応することができる。安全で安心して暮らせる災害に強い文化や社会を築くためには、俯瞰的に物事をみることができ、的確な判断をすることのできる人材育成が必須である³⁵⁾。

近年、デジタル技術としてAR、VR、AI、IoT、Roboticsが発展してきており、生産やサービスがプロセスのデジタル化に向かっており、ビジネスプロセスにおける意思決定のデジタル化も進んでいる。災害対応ロボットシステムの平常時と緊急時のデュアルユースの重要性を述べたが、その具体的展開がプラントのDX化にロボット技術を組み入れることである。ロボティクスを活用した次世代プラント操業において、プラント事業者は関連ステークホルダーとデジタルでの深い相互連携が一層進み、DX化された企業グループ同士での新たなデジタルビジネスが生まれてくることが期待される。また、人間主体のプラントオペレーションから、ロボティクス活用による無人オペレーションを前提とするプラント設計に変遷することは、プラント建設のためのコストや工期が大幅に削減と可能になり、カーボンニュートラル時代に向けた新規プラント建設手法となるが期待される。その中で、プラントや建設物の屋内点検の省人化と高精度化を実現するためにデジタルツイン・ロボット・人を連携するための汎用的なミドルウェアの開発が重要である。ミドルウェアをプラント業界が推進するDX化に対応させることにより、ロボットと人の連携を汎用的かつ効率的に統合化し、プラント業界へのロボット導入や管理をしやすくする。また、日本発のミドルウェアを国際標準化することを目指し、さまざまな業界の共通課題であるDX化の推進に合わせてロボットの利活用を可能とすることが重要である。日常のプラントの自動巡回や保守から災害時に即座に対応できるロボットシステムを構築することで、市場の創出を図り、災害対応ロボットシステムを日常に溶け込ませることを目指してプラント業界やロボット業界の連携を支援することが重要である。

防災学術連携体は、防災減災・災害復興に関わる59学協会のネットワークで、日本学術会議を要として集まり、多分野の学協会の連携を進め、緊急事態時に学間の緊密な連絡がとれるよう、2021年に設立された一般社団法人である。本連携体は「日本学術会議と連携して平常時から学協会間の連携を深め、大災害等の緊急事態時には、日本学術会議と共に、学協会間の緊急の連絡網として機能するべく備え、高まる災害外力から国土と生命を守るために、学協会をこえて議論し、学協会間の連携を深め、防災減災・災害復興に関わる諸課題に取り組む」ことを目標に掲げている³⁶⁾。災害の様相は多様であり、関連学協会の連携が必要であり、今後災害対応ロボットシステムのあり方を他分野の研究者・自治体・政府関係者と議論する必要がある。日本災害医学会と日本ロボット学会が、連携体制を構築すべく、会合を重ねており、このような連携を加速させること、そのような活動を支援することも重要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	EUのHorizon2020やe-ASIAなどのプロジェクトで他国・地域との国際共同研究プロジェクトは実施されているが、日本独自の災害対応ロボットに関する大きな研究開発プロジェクトは実施されていない。Moonshotプロジェクトにおいて、出口として災害対応を考えているプロジェクトもあるものの直接的には災害対応ロボットシステムの研究開発を実施しているわけではない。
	応用研究・開発	○	↗	重工メーカーが防爆仕様のプラント自動巡回点検ロボットを商品化した。また、福島原発の廃炉に向けてさまざまなロボットが開発され、実際に現場に投入されている。また、石油コンビナートの災害に備えるべく消防ロボットシステムが消防に実戦配備されている。
米国	基礎研究	○	↘	DARPAのロボティクスチャレンジの後、災害対応ロボットシステムに関する大きなプロジェクトは実施されていない。ロボット関連の重要な国際会議における論文発表の状況から推測すると、災害対応分野でのロボット技術の基礎研究の学術的な状況は大きな変化はないように思われる。
	応用研究・開発	○	→	DARPAの支援で開発された軍用のBigDogが民生用のSpotとして、プラントの保守点検や建物の内外の警備などをターゲットとして、応用研究開発が加速されている。

2.2
俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

欧州	基礎研究	◎	↗	Horizon2020で火災などの災害やテロ災害に対応するための災害対応ロボットシステムの研究開発プロジェクトが、UE以外の国を巻き込んで実施されている。
	応用研究・開発	○	→	Horizon2020で多くの災害対応ロボットシステムが研究開発されているものの、実用化には少し時間がかかりそうである。
中国	基礎研究	△	→	ロボット関連の重要な国際会議における論文発表の状況から推測すると、災害対応分野でのロボット技術の基礎研究はそれほど進んでいないように感じられる。
	応用研究・開発	◎	↗	災害対応だけでなく軍用を視野に入れて、大学や研究所を中心に開発が進められたロボットシステムが企業で実用化されている。DJIの成功は好例である。さまざまなロボットが大規模な災害対応訓練にも適用されるなど実用化を加速している。COVID-19対応ロボットシステムも即座に開発され、実証試験も実施されており、そのスピード感からも国としてさまざまな分野へのロボット技術の適用に力を入れていることがうかがえる。
韓国	基礎研究	○	→	Horizon2020でEUとの国際共同研究プロジェクトINGENIOUSプロジェクトとResponseDroneプロジェクトが採択され実施されているなど、ある程度の研究開発は進められている。ロボット関連の重要な国際会議における論文発表の状況から推測すると、災害対応分野でのロボット技術の基礎研究はそれほど進んでいないように感じられる。
	応用研究・開発	△	→	Horizon2020で研究成果が実用化されるまでには少し時間がかかりそうである。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) 松野文俊「阪神淡路大震災を振り返って」『日本ロボット学会誌』28巻2号(2010):138-141., <https://doi.org/10.7210/jrsj.28.138>.
- 2) 柴田崇徳「メンタルコミットロボット「パロ」の開発と普及:認知症等の非薬物療法のイノベーション」『情報管理』60巻4号(2017):217-228., <https://doi.org/10.1241/johokanri.60.217>.
- 3) 一般社団法人日本ロボット学会「特集:震災対応 レスキューロボットの活動を振り返ってI」『日本ロボット学会誌』32巻1号(2014):1-41.
- 4) 一般社団法人日本ロボット学会「特集:震災対応 レスキューロボットの活動を振り返ってII」『日本ロボット学会誌』32巻2号(2014):91-161.
- 5) 松野文俊「東日本大震災におけるレスキューロボットと国際協力」『日本ロボット学会誌』30巻10号(2012):1013-1016., <https://doi.org/10.7210/jrsj.30.1013>.
- 6) 田所諭, 他「World Robot Summit 2020福島大会の概要と成果」『日本ロボット学会誌』40巻6号(2022):475-483., <https://doi.org/10.7210/jrsj.40.475>.
- 7) 大西献「石油ガスプラントなどでガス爆発災害の予防と対応に貢献するロボット技術:防爆技術を中心として」『日本ロボット学会誌』38巻3号(2020):235-238., <https://doi.org/10.7210/jrsj.38.235>.
三菱重工業株式会社「プラント自動巡回点検防爆ロボットEX ROVR:製品」
https://www.mhi.com/jp/products/energy/ex_rovr_products.html, (2023年2月21日アクセス).

- 8) 天野久徳「石油化学コンビナート火災・爆発対応のための消防ロボットシステムの研究開発：研究開発と社会実装としての実証配備」『日本ロボット学会誌』38 巻 3 号 (2020) : 220-225., <https://doi.org/10.7210/jrsj.38.220>. 総務省消防庁「令和2年版 消防白書：2. 研究開発の状況」<https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r2/topics4/56540.html>, (2023年2月21日アクセス) .
- 9) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 中国総合研究交流センター『中国のロボット分野における研究開発の現状と動向』(JST, 2018).
- 10) 一般社団法人日本ロボット学会「特集：タフ・ロボティクス」『日本ロボット学会誌』35 巻 10 号 (2017) : 695-734.
- 11) Evgeni Magid, et al., “e-ASIA Joint Research Program: development of an international collaborative informational system for emergency situations management of flood and land slide disaster areas,” *Artificial Life and Robotics* 27, no. 4 (2022) : 613-623., <https://doi.org/10.1007/s10015-022-00805-3>.
- 12) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「多様な緩急に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」
<https://projectdb.jst.go.jp/grant/JST-PROJECT-20338891/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 13) CENTAURO, <http://www.centauro-project.eu>, (2023年2月21日アクセス) . Tobias Klamt, et al., “Flexible Disaster Response of Tomorrow: Final Presentation and Evaluation of the CENTAURO System,” *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26, no. 4 (2019) : 59-72., <https://doi.org/10.1109/MRA.2019.2941248>. CENTAURO, “Publications,” <http://www.centauro-project.eu/publications>, (2023年2月21日アクセス) .
- 14) ICARUS, <https://icarus.rma.ac.be/fp7-icarus.eu/index.html>, (2023年2月21日アクセス) . ICARUS, “Publications,” <https://icarus.rma.ac.be/fp7-icarus.eu/publications.html>, (2023年2月21日アクセス) .
- 15) CURSOR, <https://www.cursor-project.eu>, (2023年2月21日アクセス) . CURSOR, “Publications and Presentations,” <https://www.cursor-project.eu/results-publications/publications-and-presentations/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 16) INGENIOUS, <https://ingenious-first-responders.eu>, (2023年2月21日アクセス) . INGENIOUS, “Downloads,” <https://ingenious-first-responders.eu/downloads/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 17) ResponseDrone, <https://respondroneproject.com>, (2023年2月21日アクセス) . ResponseDrone, “Research Papers,” <https://respondroneproject.com/resources/research-papers/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 18) PROBOSCIS, <https://proboscis.eu>, (2023年2月21日アクセス) . PROBOSCIS, “Publications,” <https://proboscis.eu/publications>, (2023年2月21日アクセス) .
- 19) 田所諭「ロボカップレキューロボットリーグ」『日本ロボット学会誌』27 巻 9 号 (2009) : 983-986., <https://doi.org/10.7210/jrsj.27.983.20> 松野文俊, 他「ロボカップレスキューから実災害対応へ」『計測と制御』52 巻 6 号 (2013) : 495-502., <https://doi.org/10.11499/sicejl.52.495>.
- 21) 細田慶信, 鈴木慎二「福島ロボットテストフィールドの紹介」『日本ロボット学会誌』40 巻 6 号 (2022) : 471-474., <https://doi.org/10.7210/jrsj.40.471>.
- 22) 曇深処科技 (DEEPRobotics) ,
<https://www.deeprobotics.cn>, (2023年2月21日アクセス) .
- 23) 北京力升高科科技有限公司 (Beijing lesentech) ,
<http://www.lesentech.com>, (2023年2月21日アクセス) .

- 24) 成都時代星光科技有限公司 (Chengdu Timestech)「产品中心」
<http://www.tim-uav.com/Products/zhanlang/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 25) 中国航空工業集团有限公司 (Aviation Industry Corporation of China) ,
<https://en.avic.com>, (2023年2月21日アクセス) .
- 26) 上海欧迅睿智能科技有限公司,
<http://www.oceanring.cn>, (2023年2月21日アクセス) .
- 27) 珠海雲洲智能科技股份有限公司,
<http://www.yunzhou-tech.com>, (2023年2月21日アクセス) .
- 28) 中華人民共和國工業情報化部「点贊! 79家人工智能企業在科技支撐抗擊疫情中表現突出」百度,
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1669927220602750035&wfr=spider&for=pc>, (2023年2月21日アクセス) .
- 29) 創沢智能機器人集團股份有限公司 (CZ-ROBOT) ,
<http://www.chuangze.cn>, (2023年2月21日アクセス) .30) 山東國興智能科技股份有限公司 (Guo Xing Intelligent) ,
<https://www.sdgxzn.com>, (2023年2月21日アクセス) .31) 深圳墨影科技有限公司 (Moying Robotics)「產品&解決方案」
<http://www.moyingrobotics.com/pro.aspx?nid=3&typeid=82>, (2023年2月21日アクセス) .
- 32) 粵港澳青年創業孵化器「智創杯A-TEC」http://www.ghm-yei.com/gzgaqncyfhq/item_22488799_0.html, (2023年2月21日アクセス) .
- 33) 一般社団法人日本ロボット工業会「特集：災害対応ロボットの適用」『ロボット』235号(2017)：1-45.
- 34) Hiroaki Nakanishi, et al., “Modeling and experimental validation for ceiling wall effect on aerodynamic characteristics of a rotor,” *Artificial Life and Robotics* 27, no. 4 (2022) : 734-742., <https://doi.org/10.1007/s10015-022-00798-z>.
- 35) エネルギーレビューセンター「特集：廃炉措置のための遠隔操作技術開発と人材育成」『エネルギーレビュー』35巻2号(2015)：6-25.
- 36) 一般社団法人防災学術連携体,
<https://janet-dr.com/index.html>, (2023年2月21日アクセス) .

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボットイクス