

ヒューマン・マシン・システム研究部会セッション

プラント運転・保守へのロボット技術の適用

Applications of Robotic Technology to the Operation and Maintenance of Plants

レスキューロボットの現状と課題

Current Status and Issues of Rescue Robots

*松野 文俊

京都大学

1. はじめに

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 NBC 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入するというテロが発生した。この9.11テロの現場から、軍用ではあるが遠隔操作ロボットを使って遺体を発見する成果を挙げた。また、欧州の原子力発電所を積極的に進めていた国々では、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、開発のみに留まっており、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。その後も、福島第一原発の現場では、人が立ち入ることが不可能な建屋内外の情報収集に国内外のロボットが用いられ、現在でも様々なロボットが現場投入のために開発されている。本稿では、これらの背景を踏まえて、災害対応ロボットの今後の課題と、今後の展開に関して考えてみたい。

2. 東日本大震災の経験から見えてくる課題

2-1. 政策的課題

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適用された初めての大災害となった[2][3]。発災後約一カ月の4月6日に福島第一原発の瓦礫処理に大成建設・鹿島建設・清水建設の無人化施工機械（バックホウ、クローラダンプ、オペレータ車、カメラ車）が導入された。無人化施工機械は1993年の雲仙普賢岳の噴火に始まり、2000年の有珠山噴火、2004年新潟中越地震などの多くの災害復旧工事での適用実績がある。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運用してきた成果である。現場での実運用を通じて得られた知見を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、福島第一原発での成果につながった。次いで、4月10日には Honeywell 社製の無人ヘリコプタ T-Hawk が導入され、1~4号機原子炉建屋、タービン建屋およびその周辺の撮影を行った。また、4月17、18日には iRobot 社製の Packbot が原子炉建屋内の放射線量・雰囲気温度・雰囲気湿度・酸素濃度の測定を行った。Packbot は建屋内の1階部分の情報収集には成功したものの、階段を登ることができず建屋の2階以上の情報収集ができなかった。その後、6月24日に千葉工業大学・東北大学などが開発した Quince が2号機に投入され、原子炉建屋地下に水位計センサを投入することに、そして7月8日には2号機原子炉建屋の2階以上でダストサンプリングを収集することに成功している。

ここで、これらの活動における課題について考えてみたい。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類の耐放射能性を十分検討する必要がある。電子機器

*Fumitoshi Matsuno

Kyoto University

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り、福島第一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。

さて、次に米国のレスキューロボット開発に関する状況を考えてみたい。国防高等研究計画局 (DARPA) は軍で使うための新技術開発および研究を行っている国防総省の機関である。例えば、インターネットは DARPA からの予算支援を得て開発され、それが民用に転用されて広く普及し、現在ではインターネットが無い世界は考えられないまでになった。米国では、ロボットに関しても同様なシナリオで研究開発が進められている。戦場に人間が行く代わりに、ロボットが戦場に行って戦うのであれば、国民の理解が得られる。また、軍がロボットを調達するので大きな市場が形成され、ビジネスとして企業が商品としてのロボットを開発販売する。さらに、ロボットを実現場である戦場で使って課題を抽出し、開発にフィードバックし、それをまた戦場で使う。このような開発・実証実験・改良のループを回すことができる。これに対して日本では、50年に1度程度しか起こらない大地震による大規模災害のために多額の予算をつぎ込んでレスキューロボットを開発することは民間企業では不可能であり、市場は存在していない。市場が無ければ企業が参入できず、志をもった大学の研究者がレスキューロボットを細々と研究開発し、災害現場へも訓練を積んでいない研究者が出動しロボットを運用するしかない。これでは、研究開発が進むはずがない。平常に使っているロボットシステムが緊急時にも使えるというシナリオで市場を創出する、あるいは消防や自衛隊にレスキューロボットを配備するなど、政府主導で研究開発を加速させる必要がある。東海村 JCO 放射能臨界事故後の原子力事故対応ロボットの開発が、運用までを視野に入れて実施されなかった失敗を反省し、研究開発の支援を継続的に行うことおよび現場での実運用を可能とするようなファンディング制度が必要である。

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[4]。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、次節で技術的課題としても述べるが、無線通信に関して有事には特定の周波数帯の使用や商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。

2-2. 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。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。通信方式に関して、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出す方式が取られているが、本体重量の増加を招いてしまう。実際、福島第一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についても重要な課題である。

無人ヘリは上空からの情報収集には非常に有効な手段であり、福島第一原発の被害状況を上空から把握することができた。しかし、運用が容易な小型の無人ヘリ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安定な飛行は難しい。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、屋外での無人ヘリの自己位置同定は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、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。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、あらゆる時期に利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。

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の訓練には時間を要することに注意しておく。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、実戦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。オペレータの負担を軽減化できるインタ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、今後は移動から様々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・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情報を利活用できる情報システムの構築も重要な課題である。

3. 課題解決のために

3-1. 技術的課題解決のためのアプローチ

前章では、東日本大震災でロボットを適用した経験から、主に陸上ロボットと上空ロボットに関して、それぞれの今後に解決すべき課題について考えた。ここでは、まず各々のロボットの長所を活かしながら、欠点をお互いに補完するような空中ロボットおよび陸上ロボットの連携による協調作業について考えてみたい。陸上ロボットは小型無人ヘリに比べ大きなバッテリーを搭載することができる。陸上ロボットから小型無人ヘリに有線で給電し、協調移動させることによって、広域の情報を収集することができる。例えば、陸上ロボットとして無人化施工機械を用いれば、不整地環境における走破性にも優れ、劣悪環境でも確実に稼働することができる。小型無人ヘリは有線給電することにより航続時間の問題は解決でき、上空からの広域な情報収集が可能となる。さらに、小型無人ヘリからの俯瞰映像は陸上ロボットの操作性向上に大きく寄与する。小型無人ヘリには風やケーブルの動きが本体への外乱として働くので、外乱の影響を抑えるロバストな制御系設計が必要となる。さらに、陸上ロボットと無人ヘリとの協調制御における、遠隔操作システムの開発が重要な課題となる。

また、大規模災害では陸海空の大量なロボットを現場投入することにより、一部のロボットが故障しても、全体としての機能を落とすことなく、ミッションを遂行する方策も考えられる。そのためには、異種のロボットで構成された群ロボットを容易に操作する遠隔操作システムが重要である。ロボット数が増え

た場合に、個々のロボットに指令を与えるような集中制御では、システムが破たんすることは容易に想像できる。この場合、群れロボットに対する分散制御システムを構築し、スケーラビリティを担保することが重要である。

前章での技術的課題でも述べたが、ロボットの構成要素の耐環境性は重要である。例えば、日本で耐放射線試験が実施可能な施設は限られており、これらの環境の充実も重要である。また、宇宙分野では耐放射線性に関する知見や経験が蓄積されており、他分野で得られている情報を共有することも重要である。

災害は二度と同じものが起こらないと言われている。どのような環境にでも対応できるような万能ロボットを構築しようとする、現状の技術レベルではシステムが肥大化し運用面での問題だけでなく、結局役に立たないロボットシステムとなってしまう。多様な災害に対して臨機応変に対応できるように、現場でセンサやアクチュエータを適切に挿げ替えたり、システムを容易に組み替えたりすることが可能な設計が必要である。ハードウェアおよびソフトウェアをモジュール化し、インタフェースを標準化することにより、柔軟なシステムを構築することが重要である。ロボットの標準的ミドルウェアとして ROS (Robot Operating System) が広く使われており、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、同様な目的で産総研が中心となり RT ミドルウェアの開発普及に努力がなされている。このような、国際的な標準化と技術共有が重要である。

3-2. 実用化のための実証実験

災害の実現場でロボットシステムを運用する経験は滅多にできない。その経験不足を補うためには、実寸大の仮想的な災害現場による実災害を想定した訓練が重要である。米国テキサス州の Disaster City には、FEMA の全米最大のレスキュートレーニング施設である様々な災害を想定した模擬フィールドが用意された広大な訓練施設がある。残念ながら、日本では、これほど大規模な訓練施設はなく、今後このような施設を設置し、レスキュー隊員・レスキュー犬・レスキューロボットなどの訓練に有効活用されることが望まれる。

日本から生まれ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 年から実施されており、現在では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。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如何に正確に多く収集できるかを競うものである[4]。本競技のフィールドは米国国立標準技術研究所(NIST)が主導して設計されている。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レスキュー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養われるとともに、評価方法も洗練されていくことになる。

一方、米国では国防高等研究計画局 (DARPA) がロボティクスチャレンジとして、福島第一原発の事故の様な災害を想定した、ロボット競技会を企画・開催した[7]。これは、ヒューマノイドロボットが車両を運転して現場に向かい、ドアを開け、不整地や階段を走破し、バルブを回すなどの作業を遂行するシナリオで実施された。日本では軍事技術開発を支援する DARPA が主催するロボット競技会へ、DARPA から予算支援を得て出場することに対抗があり、大学からの参加は認められなかった。2013 年に米国フロリダ州で開催された予選には、世界各国から 16 チームの参加があり、日本から参加した、大学発ベンチャーの SCHAFT が一位で通過した。しかし、SCHAFT は Google に買収されたため、本選には出場していない。2014 年に経済産業省と米国国防総省の合意に基づき、NEDO がこの DARPA のロボティクスチャレンジに大学チームが参加できる枠組みを急遽作って、日本からは 5 チームが本選に参加した。2015 年に米国カリフォルニア州で開催された本選では、世界各国から 25 チームの参加があり、韓国の大学 KAIST で開発されたロボットが優勝した。実施されたタスクは、車の運転・車から降りる・ドアを開けて建物中に入る・

壁の弁を開ける・電動ノコギリで壁に穴を開ける・事前には知らされていないタスク（1 日目はスイッチ切り替え、2 日目はコンセント引き抜き）・瓦礫乗り越え・階段を上る、であった。また、通信には帯域の制約などの不定期な外乱が設定されており、不確実な情報インフラを前提としたシステム開発の重要性も意識された競技会のルール設計になっていた。

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、非常に重要な経験である。特に、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、実環境での運用の機会が限られており、開発研究の加速にこれらの模擬フィールドでの実証実験は必須である。また、災害対応ロボットのみでは市場形成できない日本では、平常時に使っているロボットシステムが災害時にも活用できるというコンセプトで研究開発を推進する必要がある。そのような観点で、橋梁やトンネルなどのインフラ点検やダムや河川の保守管理や火山の観察調査などに有用なロボットシステムを開発・実用化することを目的とした戦略的イノベーション創造プロジェクト(SIP: Strategic Innovation promotion Program)などにおいて現場での実証試験が実施されている[5][6]。また、内閣府が進める革新的研究開発推進プロジェクト(ImPACT: Impulsing PARadigm Change through disruptive Technologies)では、災害現場で有効に働く、タフなロボットを開発するタフロボティクスチャレンジが実施されている[7]。さらに、東京オリンピックに合わせて、WRS(World Robot Samite)が開催される予定で、①BtoB 中心の分野（ものづくり、農林水産業・食品産業分野）、②BtoC 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分野で競技が設けられる予定である。③の分野では、プラント点検、プラントの中の人の発見・救助などが利活用シーンとして想定されている。その会場として福島県浜通り地域に災害現場や実プラントを模擬したテストフィールドの建設が進められている。

4. おわりに

本稿では、東日本大震災の経験から見えてくるロボットシステムの政策的および技術的課題とそれらの解決のアプローチについて考えてみた。東日本大震災における福島第一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、我々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。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も必須である[8]。なお、本稿は筆者の原稿（[9]「災害対応ロボット特集号によせて」、ロボット、No. 235, pp. 1-6, 2017）に手を加えたものであることを申し添えておく。

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, Vol. 28, No. 2, pp. 138-141, (2010).
- [2] 特集号 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, Vol. 32, No. 1, pp. 1-41, (2014).
- [3] 特集号 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, Vol. 32, No. 2, pp. 91-161, (2014).
- [4] 田所諭, ロボカップレスキューロボットリーグ, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 9, pp. 983-986, (2009)
- [5] 特集号 次世代インフラ用ロボット現場検証 I, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 8, pp. 491-528, (2016).
- [6] 特集号 次世代インフラ用ロボット現場検証 II, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 9, pp. 571-607, (2016).
- [7] 特集号 タフ・ロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 10, pp. 695-734, (2017).
- [8] 特集号 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, Vol. 35, No. 2, pp. 6-25, (2015)
- [9] 特集号 災害対応ロボットの適用, ロボット (日本ロボット工業会誌), No. 235, pp. 1-45, (2017)