

災害・事故対応に求められるロボット技術

浅間 一*

1. はじめに

2011年3月11日に生じた東日本大震災と津波によって、15,000人を超える人が犠牲となり、東日本の沿岸地域において、多大な被害が発生した⁽¹⁾。さらに、それによって発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、原発周辺の住民には、避難生活が強いられている。今も原子力発電所の冷温停止、封じ込め、燃料の取り出し、廃炉に向けた作業が続けられているが、廃炉までには30年以上かかるとも言われている⁽²⁾。

日本はそもそも災害の多い国である。地震や津波のみならず、台風や火山などの自然災害も多く、そのような災害対策は、古くからの課題である。一方、1999年に生じたJCOの臨界事故をはじめとする、人工物の事故も後を絶たない。工場、プラント、コンビナートなどの大型設備の事故のみならず、橋梁やトンネル、鉄道などの社会設備の事故もある。最も身近なのは、自動車などの交通事故であろう。ヒューマンファクターが要因の事故もあるが、人工物の劣化による事故も少なくなく、人工物の長寿命化にともない、それをいかにメンテナンスするかという問題も考える必要に迫られている。

このような災害や事故への対応では、人手で対処できることに限界があることから、様々な機器の導入が図られてきた。特に、今回の東日本大震災や福島原子力発電所の事故では、その広域性や厳しい環境条件のため、ロボット技術を含む遠隔操作機器の導入が強く求められた。本稿では、災害・事故対応に求められるロボット技術について、東日本大震災および福島原子力発電所で求められ、導入されたロボット技術を具体的に紹介するとともに、今後の課題について考察する。

2. ロボット技術

そもそもロボット技術とは何か。ロボットと言うと、産業用ロボットやヒューマノイドロボットを想像する人が少なく

ないだろう。しかし、ロボット技術とは、必ずしもロボットそのものを指すわけではない。ロボット技術(RT: Robot Technology)という言葉は、情報技術(IT: Information Technology)との対比で用いられる。ITは、情報世界(仮想世界)における情報処理・通信技術であり、情報処理デバイス、その周辺デバイス、通信ネットワーク、ソフトウェアなどから構成される。それに対し、RTは、指定された環境において、要求されたミッションを遂行するという要求に対し、センサやアクチュエータなどの要素を組み合わせ、メカ、制御システム、認識・計画・制御アルゴリズムなどを設計し、それを実際に動作させることで、要求される機能を実現する、システムインテグレーション技術、総合技術(シンセシス)である。換言すれば、ミッションという課題に対し、機械工学、電気工学、制御工学、情報処理などの知識と技術によってソリューションを導出する技術と言える。

一方、「ロボット」には、自動化や自律性というイメージもある。しかし、東日本大震災や原子力発電所事故への対応で必要とされたのは、遠隔操作可能な機器であり、RTはそのような遠隔操作可能な機器として導入された。ただし、「自律」と「遠隔操作」は、本来対立する概念ではない。もし、ロボットが何の知能や自律性も持っていないとすると、多自由度のロボットを遠隔操作するには、すべてのアクチュエータの動作をオペレータが教示しなければならなくなり、それは自由度の増加とともに困難になる。遠隔操作を円滑に行えるようにするためにも、ある程度の自律性は必要となる。逆に、多様な作業をロボットに自律的に行わせようとしても、現在の技術で実現できているロボットの知能は、人間のそれに比べはるかに劣っており、自律的に行える作業は極めて限定される。それゆえに、目的の作業を達成するには、遠隔操作によって適宜介入するが必要となる。すなわち、「自律性」と「遠隔操作」は、相補的な関係なのである。

製造業において用いられる産業用ロボットは、自動化の要素として用いられるが、サービスロボットでは、人間の様々な活動を支援するツールとして位置づけられることが多い。本稿においても、RTを、ITも含めた広い支援技術と捕ら

* 東京大学教授；大学院工学系研究科精密工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
Robot Technology Demanded for Response of Disasters and Accidents; Hajime Asama (Department of Precision Engineering, the University of Tokyo, Tokyo)
Keywords: robot technology, disaster response, accident response, nuclear power plant, teleoperation, assistive technology
2011年12月6日受理

えることとする。

3. 災害対応における支援技術

(1) 情報的支援

災害や事故の発生時の初動において最も重要となるのは、情報の伝達・収集・共有である。災害や事故の現場を調査、モニタリングし、その状況をいち早く把握することが求められる。しかし、電話(含携帯電話)、インターネットなどの通常利用している通信手段が、災害時には中継局の不具合や急激なトラフィック増加によって機能しなくなるような事態が発生する。そのような状況においてもいかに通信手段を確保するかが大きな課題となる。

台風による洪水、火山噴火、津波などの災害や事故の発生時には、注意報・警報やそれらの予測情報などを、被災の可能性のある住民に確実に知らせ、それらに対する備えを促し、場合によっては、避難をさせる必要がある。また、避難を行う場合には、避難場所や避難誘導に関する情報を伝達する必要もある。情報伝達の対象者には、要介護者、病気を患っている人、障害者なども含まれるため、多様な住民に対して、情報をいかに確実に伝えるかは大きな課題である。被災者が、外部に対して、安否情報や、救助要請などの情報を発信することも重要である。被災者とその位置情報の把握は、救助のために必要なだけでなく、被災者が生き延びるために必要な物資(水、食料、医療品など)を送り届けるために必要となる。救急医療においては、その患者や要介護者に関する個人情報や医療行為、看護・介護措置活動を行う上で重要な医療情報(血液型、投与する薬、アレルギーなど)を把握する必要があるが、災害時に医療情報へのアクセスが困難になることも考えられる。そのためには、個人情報を含む医療情報や救助された際の情報を、電子タグなどに記録し、患者自身にその情報を持たせるような分散管理が有効である⁽³⁾。

(2) 物理的支援

災害時には、瓦礫や資材、物資の運搬など、肉体的負担が大きな作業が多く発生する。建物の損壊や電源の喪失によって、通常使用しているエレベータをはじめとする搬送用の機械が使用できなくなったり、十分な作業スペースが確保できなくなると、一層多大な肉体的な負荷が強えられることになる。

これらの搬送・運搬作業を力学的に支援する手段の一つとして、ロボットスーツのニーズが高い。これは、人が装着するタイプのロボットである。これを装着すれば、各関節の動作をアクチュエータでアシストすることで、大きな力を要する動作も、小さな力で遂行することが可能になり、肉体的な負荷を軽減させることができる。このような技術開発は、いくつかの研究機関で行われているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、その実用化においては、人との密な力学的相互作用を必要とするために、高い信頼性、耐久性、安全性が重要となる。

また、災害で破壊された人工物の修繕、機器や設備の設

置・解体、施工などの作業を、RTを活用して行うニーズも数多く存在する。人がアクセスしにくい場所での作業や、作業にとって劣悪な環境における作業は、ロボットで代行することが強く望まれる。

(3) 物流的支援(移動・搬送・運搬)

災害時の最優先事項は、被災者の探索と救助である。被災者がどこに存在するのか、彼らがどのような状態なのか、彼らをいかに救出し、どこに搬送するのか、などを把握し、必要な救援措置を施す必要がある。被災者の位置同定が行えれば、次に被災者を救出することが必要となる。病人、要介護者、障害者などを救出する場合、健常者と異なり自立的に移動することが困難な場合があるので、その搬送を補助するシステムが求められる。特に、火災が発生した際には、緊急の救助活動を支援することが必要となる。

また、災害時に、必要な物資を被災者に送り届ける際、現場にアクセスすることが困難な場合には、(1)ヘリや飛行船を用いた空からのアクセス、(2)無人化施工機械などを用いた瓦礫の撤去、およびそれによる陸路からのアクセス手段の確保、(3)瓦礫上や瓦礫内走行による現場へのアクセス、などが考えられ、その移動・輸送・搬送において、RTを活用することが有効となる。被災者の搬送を、RTを搭載した特殊車両で行う検討は、東京消防庁などでも行われているが⁽⁶⁾、ここでも安全上などの問題をどう解決するかが課題として残っている。

(4) その他

災害時には、犯罪が多発する。その予防にもITやRTの活用が求められる。ロボットなどの移動手段を用いながら、通信インフラやカメラを設置したり、あるいはカメラを搭載したロボットを移動させながら、被災地の監視や見守りを強化し、犯罪の発生を防止することが求められる。一般に災害現場は人が立ち入りにくい状況が多いため、RTを活用した災害現場の映像による調査や監視・見守りのニーズは、極めて高い。2011年の台風12号によって発生した和歌山県南部の土砂ダムにおいても、映像による現場の様子の遠隔からの把握が求められた。

また、災害時における被災者やその家族などのメンタルケアも極めて重要な課題である。家族を失ったり、家や財産を失ったりすることで、多大な精神的な被害を受けることになる。また、被災者が避難所等で生活する際にも、プライバシーが犠牲になったり、様々な人間関係や極限的な生活環境から精神的な負荷を受け、体調を壊す人も多い。このような活動に対しても、ITやRTを活用したセンシング・データ収集・観察などの情報的支援、必要な物資や器材などの配送支援のみならず、心理的な支援活動を行うことも考える必要がある。そのような目的で、メンタルセラピーを支援するロボットの活用が注目されている。すでに、開発されているセラピーロボットも存在するが⁽⁷⁾、今後、このような技術の実用化、事業化に向けたより一層の取り組みが求められる。

4. 東日本大震災対応で活用されたロボット技術

東日本大震災が発生した直後から、NPO 国際レスキューシステム研究機構(IRS: International Rescue System Institute)に所属するレスキューロボットの研究者などが、被災地の現地にそれぞれ開発してきたロボットシステムなどを、自主的に、あるいは要請に基づき持ち込み、災害対応に貢献した。ロボット導入のニーズは、被災者探索・レスキュー、倒壊建造物内調査、プラント・設備(コンビナートなど)の調査・診断・修復、水中探査、復旧作業、被災地のマッピング、重作業のパワーアシスト、被災者のメンタルケアなど多岐に渡った。これに対し、能動スコープカメラ(東北大田所論教授)、Quince(千葉工大小柳栄次副所長、東北大田所論教授、新エネルギー・産業技術総合開発機構、IRS)、KOHGA3(京大松野文俊教授)、Anchor Diver III(東工大広瀬茂男教授)、遠隔操縦機ROV(東大浦環教授)、双腕式油圧ショベル型ロボット(日立建機)、被災地計測・モデル化・マッピング計測車・全方位カメラ(東大池内克史教授、東北大出口光一郎教授)、Paro(産総研柴田崇徳主任研究員)、スマートスーツ・ライト(北大田中孝之准教授)などのRTが投入され、災害対応における貢献を果たした。また、海外からも、米国 Texas A&M 大学 Robin R. Murphy 教授が率いる CRASAR (Center for Robot-Assisted Search and Rescue) が、実際に日本の災害現場にロボットを持ち込み、空中からの原子力発電所の建屋調査や水中調査に多大な協力を行った。ロボット技術開発に携わる大学、研究所、企業の研究者や技術者は、災害対応に貢献を果たすべく積極的な活動を行ったが、実際のニーズに対する効果という点では、十分にその期待に応えられるものではなかったことは否めない。

災害や事故は多様であるために、RT に求められる機能もその都度異なってくる。たとえば、被災者の探索に関して、阪神淡路大震災では、建物の崩壊による圧死が主な死因であったのに対し、東日本大震災では、津波による溺死で多くの方が亡くなった。前者では瓦礫内の探索が必要となるが、後者では水中探索のニーズが高かった。このように、災害の状況によって、求められる技術は異なるので、様々な状況やニーズに対応した備えが必要となる。

5. 原子力発電所の事故対応で活用されたロボット技術

原子力発電所の事故対応では、放射線レベルが高く、作業員の立ち入りが極めて困難な状況で、ロボットや無人化施工などの遠隔操作技術が数多く投入され、継続的に用いられている。緊急的なミッションは、事故現場の情報収集・調査、冷却系の安定化、汚染物質の封じ込めなどであった。

福島原子力発電所事故で、これまでに遠隔操作機器が導入された例としては、コンクリートポンプ車による注水(冷却系の安定化)、無人化施工機械による瓦礫撤去、小型無人ヘリ(T-Hawk)による爆発を生じた原子炉建屋の空撮調査、

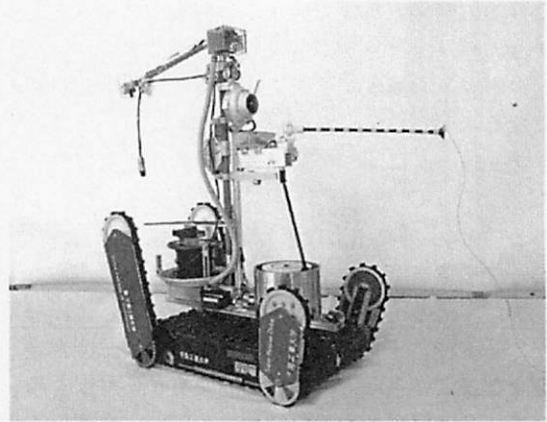


図1 Quince. (千葉工業大学 小柳栄次副所長, 東北大田所論教授提供)

Packbot, Quince などの移動ロボットによる建屋内調査(映像、放射線量、温度、湿度、酸素濃度など)、カメラを搭載した移動ロボットによる汚染調査、吸引装置を搭載した Warrior (移動ロボット)による除染、Talon や Brokk などの移動ロボットによる原子炉建屋内の瓦礫の除去などである。

今後は、燃料の取り出し、解体などの、さらに困難なミッションが待ち受けている。RT に求められている具体的な作業としては、原子炉建屋内の瓦礫除去、サーベイマップの作成(放射線測定と地図生成)、原子炉建屋やタービン建屋内の調査(画像、放射線量、温度、湿度、酸素濃度など)、計測機器などの設置、サンプル採取、遮蔽、除染(はつりなどを含む)、機材の運搬、配管・機器の切断・解体・設置などである。図1は、前述の Quince を改造したものである。このロボットは走破性が極めて高いことから、瓦礫や階段が存在する建屋内の調査に使用されている。ただし、建屋内の状況についても、まだ十分調査が行えているわけではない。格納容器内や圧力容器内の調査をはじめ、調査が必要な場所は多く存在し、いずれの調査も高放射線環境下での調査であり、容易ではない。水中環境も含む高放射線環境下での、圧力容器、格納容器、圧力抑制室などの漏えい箇所の同定、止水は、かつて誰も行ったことがない、極めて困難なミッションであり、そのためのロボット技術開発はまさにグランドチャレンジである。

前述のように、燃料の取出しなどの中長期措置には30年以上要するとも言われており⁽⁶⁾、これからも長期にわたって、必要なロボット技術開発を行うことが求められている。これは、避けられない現実であり、我々は、まさにこのような困難な状況を打開し、社会的な問題を解決するために、必要な技術開発をやり遂げ、社会に対して技術的な貢献を果たさなければならない。

6. これからのロボット技術に必要となる材料

前述のように RT は、システムインテグレーション技術であるが、ニーズに応じて、システムを構成するためには、高

機能な要素の開発も重要である。材料的なニーズとしては、アクチュエータ、センサ、情報処理デバイス、バッテリーなどと、ロボットを構成する構造体における高機能材料ということになる。

アクチュエータに関して言えば、屋内用途ではサーボモータ(ACおよびDC)や油圧を用いることが多いが、より高機能であること(小型高出力など)が常に要求される。ステッピングモータや空気圧アクチュエータを用いたロボットも存在する。また、その一方で、新たな取り組みとして、静電型アクチュエータや、圧電素子、ER流体、形状記憶合金、水素吸蔵合金などといった、特殊な機能を有する材料を用いたアクチュエータの研究も行われており、これらを用いることによって、従来のアクチュエータでは困難であった機能を実現できる可能性がある。

一方、センサに関して言えば、エンコーダやレゾルバといった内界センサ、CCDカメラ、レーザレンジセンサ、超音波センサ、赤外線センサなどの外界センサで高性能のものが常に求められている。特に、原子力分野では、 γ カメラや耐放射線機能を有するセンサが求められた。

その他の材料としては、バッテリーや構造体材料が挙げられる。構造体材料に関しては、やはり軽量で高強度・高剛性のものが求められるが、原子力分野では、耐放射線材料が求められ、放射化しにくい材料、除染しやすい材料といった要求も存在した。シーリングなどに用いられる樹脂の耐放射線機能についても考慮する必要がある。ロボットは耐久性が求められるが、水中での作業などを行う場合もあり、耐水、防塵という耐環境性も求められる。

7. おわりに

災害・事故対応に求められるロボット技術(RT)について述べ、東日本大震災および福島原子力発電所で求められ、導入されたロボット技術を具体的に紹介し、これからのRTに求められる材料について考察した。

東日本大震災および福島原子力発電所事故においては、ロボットの投入に大きな期待が寄せられた。しかるに、これまで述べたように、必ずしも国内のロボットがスムーズに導入できたわけではなかった。現場で使えるようなロボットを実現するには、ユーザのニーズに基づく開発が不可欠である。技術開発に関しては、ユーザ(消防、防衛、警察、電力会社など)が積極的に技術開発にも参画し、ユーザと一体となった実用機開発プロジェクトを実施する必要がある。

しかし、ロボットがスムーズに導入できなかった原因は、技術開発の問題だけではない。むしろ戦略的な問題が大き

い⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。災害・事故対応ロボットのユーザは、国や自治体、電力会社などに限られており、それらの組織が需要を創出したり、調達を行わない限り、企業が技術開発に参入することは難しい。技術は、なまものと同じで、維持しなければ朽ちてしまう。もし、そのような技術を保有することが重要であるなら、開発することのみならず、技術を継続的に維持することに対しても戦略的に投資を行うべきであった。

米国では、軍が研究開発の予算を出すだけでなく、製品の調達も行っている。日本でそれと同様なことを行うことは難しい。しかし、たとえば、対災害(安全・安心)を国の基軸に掲げて、開発から運用まで、戦略的に一貫した投資を行うことは可能であろう。そして、ロボットを操作する訓練も含め、災害時に緊急的にシステムの導入を可能にする運用体制・組織も構築する必要がある。欧州では、原子力事故に対し、ロボットを含めた機器を備えとして保有することを制度として義務付けている。これも、技術を維持し、緊急時に即導入できるようにする一つの方策である。日本でもこのような制度設計にまで踏み込んで、災害・事故対応のためのRTを開発から運用まで、企業が参入し、ビジネスとして回るようなしなやかな仕組みを考えることが重要である。

文 献

- (1) 警察庁：<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm>
- (2) 原子力委員会：東京電力福島第一原子力発電所における中長期措置に関する検討結果、2011。
- (3) O. Takizawa, A. Shibayama, M. Hosokawa, K. Takanashi, M. Murakami, Y. Hisada, Y. Hada, K. Kawabata, I. Noda and H. Asama: Mobile Response, Springer, (2007), 85-94.
- (4) K. Suzuki, G. Mito, H. Kawamoto, Y. Hasegawa and Y. Sankai: Advanced Robotics, 21(2007), 1441-1469.
- (5) Y. Imamura, T. Tanaka, Y. Suzuki, K. Takizawa and M. Yamanaka: Journal of Robotics and Mechatronics, 23, No. 6, (2011).
- (6) <http://www.tfd.metro.tokyo.jp/ts/soubi/robo/05.htm>
- (7) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2004/pr20040917_2/pr20040917_2.html
- (8) <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sochi/pdf/20111213.pdf>
- (9) 浅間 一：日本ロボット学会誌, 29(2011), 658-659.
- (10) 浅間 一：日本ロボット学会誌, 29(2011), 796-798.



浅間 一

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1984年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了
1986年 理化学研究所化学工学研究室研究員補
2002年 東京大学人工物工学研究センター教授
2009年11月- 現職
専門分野：サービスロボティクス
©自律分散型ロボットシステムの研究、空間知能化、
ユビキタスシステム技術、サービス工学、移動知能などの研究等に従事。原子力委員会福島第一原子力発電所における中長期措置検討専門部会委員。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★