

解説

原子力発電所事故対応のための遠隔操作技術

Remote Control Technology for Response of Nuclear Power Plant Accidents

浅 間

一* *東京大学

Hajime Asama* *The University of Tokyo

1. はじめに

東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故対応において、これまで様々な遠隔操作機器が使用されてきた[1][2]. また、今後中長期措置においても、新たな機器開発が求められている[3].

これまでに、ロボティクスの分野において、様々な遠隔操作技術に関する研究開発が行われてきたものの、福島原発の実際の現場で使用されたものは、非常に限定的であった。一方、無人化施工と呼ばれる土木分野の遠隔操作技術は、現在でも活用されており、福島原発の事故対応においても使用された。

本稿では、これまでに現場で利用された遠隔操作技術について概観しながら、その経験を通して得られた様々な知見や技術的課題などについて述べるとともに、災害や事故が発生した際に、遠隔操作技術がスムーズに現場で利用できるようにするための要件について述べる。

2. 現場で求められる遠隔操作技術

これまでに、ロボティクスの分野において、遠隔操作をしやすいするための多くのヒューマンインタフェース技術が開発されてきた。テレプレゼンスやテレイグジステンストと呼ばれる技術開発がその典型例である[4]. ロボットなどの機器を遠隔から操作するには、ロボットが作業を行う環境を、臨場感豊かにオペレータに提示する技術が重要である。具体的には、立体視などによる三次元映像提示や、力覚や触覚デバイスを用いた力学的な情報提示などの技術であり、それは、可視化、仮想現実感 (VR: Virtual Reality) や拡張現実感 (AR: Augmented Reality) などの技術にも関連している。

一方で、原子力分野では、直接手で触れることのできない危険物質を扱うために、ホットセルで放射性物質をハンドリングするマニピュレータ (いわばマジックハンドの括

張) など、メカニカルなデバイスが古くから用いられてきた。上記の遠隔操作技術は、この機能を拡張する技術として開発されてきた。マニピュレータは、メカニカルなものから電氣的に制御するものへ進歩し、オペレータが操作するマスター側と物質を直接ハンドリングするスレーブ側との間も、メカニカルな伝達機構から、通信システムによる電氣的な信号伝達機構に変化した。しかしながら、こういった研究開発が進む一方で、そういった技術の実社会での普及は限定的であり、現場では、非常に単純な操作画面とジョイスティックなどのコンソールが使われるケースが多い。これは、現場のニーズとして、オペレータの使いやすさ、簡便性、信頼性、コストなどが求められるからであろう。

これまでに、遠隔操作が、研究開発のためだけでなく、現場で用いられてきた分野として、原子力、宇宙、災害対応工事などがある。無人化施工と呼ばれる技術は、1991年に雲仙普賢岳の噴火の際、災害対応工事を行う際に開発され、用いられた技術である。当時、火砕流や土石流によって、大きな被害が発生した。被害の拡大を阻止するための工事が必要となったが、火山活動は収束しておらず、二次災害の危険性も大きい状況にあった。そのような状況の中、建設機械に人が搭乗することなしに、遠隔から操作しながら工事を行える技術が開発され、適用された。「無人化」は、「自動化」を意味するものではなく、建設機械に人が搭乗しない、という意味で用いられる。その後も、2000年有珠山の噴火、2004年の新潟県中越地震、今回の福島原発の事故、2011年の台風12号で生じた自然ダムの工事などにも用いられている。

遠隔操作技術の現場での導入を考えた場合、具体的にどのような要件が求められるのか、いかなる技術的課題があるのかについて、これまでに導入された無人化施工の経験などを参考にしながら述べる。

3. 遠隔操作の技術的課題

3.1 情報提示技術

まず、どのような情報を、オペレータに提示するかという問題がある。これまでの検討では、映像、力学・触覚情報

原 2012年4月24日

キーワード: Response of Accidents, Remote Control, Interface, Information Presentation, Communication

*〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

などの提示が主であり、映像に関しても、単に二次元映像でなく、三次元立体映像が多く検討されてきた。しかし、無人化施工では、十分な解像度の映像が提示できれば、二次元の映像でも十分作業を遂行することが可能となっている。

ただし、無人化施工では、建設機器に搭載したカメラの映像だけでなく、現場に固定カメラを設置したり、カメラを搭載したカメラ車を配置し（これも遠隔操作される）、複数の映像を用いながら作業が進められている。カメラの台数は、10台以上になることもある。オペレータは、複数のカメラ映像を交互に見ながら作業を進める。最近では、フルハイビジョンが用いられるようになってきている。高解像度の映像は、立体的な認識の手助けになるので、操作の効率を上げるうえで、重要な要素である。

また、オペレータが作業する上で、作業状況を実時間で把握することが重要となるが、現場のオペレータは、作業環境のみならず、建設機械の音や振動など、機械自体の情報も利用しており、それらの情報を提示する有効性も示されている。ただ、力覚情報の提示は、まだ実用としてはほとんど用いられていない。信頼性、実時間性、コストなどがまだ十分でないこと、作業を行う上で必ずしも必要ないこと、などがその理由である。

原発事故に対する中長期措置では、冷却水が漏えいする中で、あるいは濁った汚染水の中で、ロボットを遠隔操作しながら漏えい箇所を同定することが求められている[3]。そのような場合、ロボットで取得した映像をそのまま表示するだけでは操作が難しい。画像処理によってノイズを除去して映像を提示する技術[5]、複数のカメラから得られた映像を統合して俯瞰画像として提示する技術、レーザレンジセンサ、超音波カメラ、ガンマカメラなど、異なる種類の情報を統合、マッピングし、可視化する技術などが必要となる。

3.2 通信技術

今回の東京電力福島第一原子力発電所の事故対応における遠隔操作では、通信が一つの大きな問題になった。原子力建屋の内部は、その特有な事情から、壁や障害物が多く、直線的な通路は少なく、曲がり角が多い。このような状況では、無線通信が届きにくい。ロボットの無線による遠隔操作では、市販の2.4[GHz]帯の無線LANを用いているケースが多いが、この周波数帯域は多くの機器で利用されており、様々な機器を持ち寄って使用するような災害時には、チャンネルが干渉しないような管理が不可欠となる。また、この周波数帯域の電波は直進性が高いので、障害物が多いと通信が確立できない。それを解決する方策として、中継器を随時設置（場合によっては、ロボットなどの遠隔操作機器で設置）する手法なども開発されているが、中継器が多くなると、その分通信遅れも大きくなり、操作性が悪化するという問題もある。福島原発の事故対応において

行われたPackbotを用いた調査では、1台のPackbotに無線中継器を搭載し、それを有線で操作しつつ、もう1台のPackbotを無線で操作しながら調査をするという手法が採用された。

災害などの非常時に、遠隔操作機器を迅速に準備・運用するには、確実かつ安定に利用可能な無線通信インフラ、特に使用できる周波数帯域、バンド幅を確保することが極めて重要になる。総務省では、地上テレビジョン放送のデジタル化に伴って得られた周波数の空き領域（ホワイトスペース）の利用を検討している[6]。低い周波数帯域での無線通信は、通信速度が遅く、実時間での画像伝送という点で欠点もあるが、GHz帯に比べ障害物の回り込みなど、優れている面もある。

そもそも、遠隔操作における通信の要求仕様は非対称である。上り（機器からオペレータへ）は、画像などの大量のデータの送信が必要となるが、下り（オペレータから機器へ）は、制御信号のみを送信すればよい。これまでの無人化施工においては、300[ms]程度の遅れであれば、オペレータは十分作業を行うことが可能であることが知られている。1[s]の通信遅れでも、馴れば操作は可能と言われているが、その場合は、遅れ時間がばらつかない（ジッターが小さい）ことが条件となる。

通信の遅れを解決するための、様々な試みもある。一つは、光ファイバとの併用である。奈良の自然ダム工事現場で行われている無人化施工では、光ファイバとの併用によって、高速通信が実現されている。また、通信を高速化するために、フルハイビジョンの画像に対し、新たな画像圧縮技術が適用されており、10[ms]程度の伝送遅れが実現されている[7]。

3.3 操作インタフェース

操作インタフェースの実用性を考えると、現場での操作のしやすさが最優先となる。研究開発では、コックピット型の操作インタフェースも開発されてきたが、災害時には、むしろ迅速に設置可能で簡便な操作インタフェースが有用である。これまでに福島原発事故で用いられているロボットの操作用インタフェースは、いわゆるゲーム機のコントローラなど、ジョイスティックによる操作用インタフェースが多い。ディスプレイやコントローラボックスを持ち運び可能なケースに収まったタイプのもの、机上に設置するタイプのもの、ティーチングボックスのような可搬型のコンソールなどが用いられている。作業環境を直接目視できない場合は、ディスプレイを見ながらの操作が必要となる。情報提示技術で述べたように、カメラ画像の表示に関しては、これまでの研究で、ロボットに搭載したカメラからの前方画像だけより、情報から鳥瞰図的に表示しながら操作したほうが、操作性が高いことが知られている。

無人化施工において使用されているコンソールを図1に



図1 無人化施工の操作インタフェース ((株) 熊谷組提供)

示す。建設機械では、建機メーカーによらず、操作レバーが標準化されている。例えば、バックホウであれば、ブームの上下左右の動き、バケットの動作、建機自体の前後進・旋回などを四つのレバーで操作するようになっている。そこで、無人化施工のコンソールも、それに対応するようなレバーの配置になっており、オペレータが違和感なく操作できるよう、工夫されている。ロボットの遠隔操作に関しても、実用性を考えれば、このような標準化が重要であると考えられる。

3.4 その他の技術的課題

東京電力福島第一原子力発電所の事故対応では、瓦礫や階段が存在する環境で移動し調査する移動ロボットとして、高い走破性を有するQuinceが活用された。Quinceの遠隔操作は、無線通信が届きにくいことから有線による遠隔操作となった。その後、調査に用いられたトピー工業製サーベイランナーも同様である。

ロボットの研究開発では、ロボット本体の機能についてばかり注目される。しかし、今回の原発事故対応などで、ロボットや遠隔操作機器の現場への導入においては、いわゆるロボットや遠隔操作機器自体の機能のみでなく、通信、操作インタフェース、耐放射性など、周辺機能までも考慮して開発することが極めて重要であることが判明した。

その周辺機能の一つに電源も含まれる。多くのロボットでは、バッテリーを搭載しており、バッテリーを電源として動作している。当然ながら、1回のオペレーションの稼働時間はバッテリーの性能によって決まる。ロボットを繰り返し使用するには、充電を行う必要があるため、簡便に充電を行えることも要求された。特に、UAVの場合、軽量化する必要があり、バッテリーの重量とオペレーション可能時間のトレードオフになる。バッテリーの性能が、実用化を左右することになる。

4. 運用上の課題

災害対応や事故対応の現場において、遠隔操作機器を導入するには、機器やシステム自体の検討を行うだけでは不十分であり、その運用上の課題を解決する必要がある。

例えば、機器のメンテナンスである。バッテリーの充電のみならず、機器が故障すれば、パーツの交換や修復が必要となるし、ときに作業に応じて改造も必要となる。また、原発事故対応では、原子炉建屋内部にいったん導入すれば、ロボット自体も被曝する。ロボットが被曝した積算線量の管理も必要となるし、ロボットのクローラに放射性物質が付着したり、自体が放射化するのでも、除染が必要になる。

また、もう一つの重要なポイントとして、オペレータの訓練がある。福島原発事故では、オペレータが、テストフィールドや、事故が生じていない5号機などで、ロボットの遠隔操作訓練を繰り返し行ったうえで、現場に導入している。福島原発の事故対応においては、今後も、事故の収束、廃炉に向けた中長期措置において、様々な機器開発が行われることになるが、プラントのモックアップやテストフィールドを構築し、そこで遠隔操作機器の実証テストやオペレータの訓練を計画的に実施していく必要がある。

5. おわりに

本稿では、福島原発の事故対応における遠隔操作や無人化施工での遠隔操作などでの事例を参考に、災害や事故の現場で、遠隔操作機器を導入する上で重要となる課題などについて述べた。なお、今回の震災対応や原発の事故対応において、日本のロボット技術がなぜスムーズに導入できなかったのか、支援技術としてロボット技術に何が求められているのか、今後発生し得る、災害や事故に対応する備えとして、いかなる準備をしておくべきか、などについては、すでに別報で論じているので、そちらをご参照いただきたい[8]~[10]。

最後に、今後の遠隔操作機器開発において、今一度明確にすべきことがある。それは、自律化と標準化である。自動化は、専用機化に向かうため、状況が多様で、予測できないような状況で作業を行うことが求められる災害対応ロボットにはそぐわない。人間が、柔軟に関与し、多様な環境での作業を行うことを可能にするような遠隔操作機能がより強く求められる。ただし、自由度が多くなればなるほど、その操作は難しい、特に、ロボットに不慣れなユーザがオペレーションする場合（オペレータがユーザ側の人である場合）、それは顕著である。そのような場合、繰り返し性の高い動作などは、自律化することが有効である。そもそも、遠隔操作と自律化は、相反する考え方ではなく、相補的な関係にある。また、災害対応、事故対応では、状況が予測できないために、すべての状況を想定して、遠隔操

作機器をあらかじめ準備しておくことは難しい。何らかの標準的、共通的なプラットフォームを用意し、あとは現場のニーズに応じて動的にシステムを構成することが求められる。それを実現するには、機器（ハードウェアおよびソフトウェア）の標準化、さらには機能の実証試験における標準化を進めることも重要であろう。

謝辞 北股地区緊急対策工事の無人化施工調査に関しては、株式会社熊谷組北原成郎氏および関西支店北股作業所のご協力をいただいた。この場を借りてお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- [1] 浅間一：“東日本大震災および原子力発電所事故に活用されるロボット技術”，ITU ジャーナル，vol.42, no.2, pp.44-47, 2012.
- [2] 浅間一：“原発事故対応のための遠隔操作技術の開発と運用”，ロボット，no.206, pp.33-38, 2012.
- [3] 原子力委員会：東京電力（株）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，東京電力（株）福島第一原子力発電所中長期措置検討専門部会，2011.
- [4] S. Tachi: Telexistence. World Scientific Publishing, 2009.
- [5] 山下淳 他：“カメラの方向変化を利用した悪天候時の視野明瞭化～首振りカメラを用いた画像中の視野妨害となる水滴の除去～”，映像情

報メディア学会誌，vol.57, no.10, pp.1347-1353, 2003.

- [6] http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/whitespace/02kiban09_03000093.html
- [7] 岩田明彦：“超低遅延 MPEG-4 AVC/H.264 & MPEG-2 コーデック「HLD-3000」”，放送技術，vol.64, no.12, pp.82-87, 2011.
- [8] 浅間一：“東日本大震災および福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題（その1）”，日本ロボット学会誌，vol.29, no.7, pp.658-659, 2011.
- [9] 浅間一：“東日本大震災および福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題（その2）”，日本ロボット学会誌，vol.29, no.9, pp.796-798, 2011.
- [10] 浅間一：“災害・事故対応に求められるロボット技術”，まてりあ，vol.51, no.4, pp.139-142, 2012.



浅間 一 (Hajime Asama)

東京大学大学院工学系研究科教授。1984年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986年9月理化学研究所化学工学研究室研究員補。同研究所研究員，副主任研究員を経て，2002年11月東京大学人工物工学研究センター教授。2009年11月同大学大学院工学系研究科教授。日本機械学会フェロー。工学博士（東京大学）。（日本ロボット学会正会員・フェロー）