原子力災害対応ロボットの設計と開発

大 西 献* 大 西 典 子* 藤 田 淳*
原 浩 二* 橋 本 達 矢*

Design and Development of Robots which Support Activities of Recovery from Nuclear Hazards

Ken Onishi*, Noriko Onishi*, Jun Fujita*,
Koji Hara* and Tatsuya Hashimoto*

In Fukushima Daiichi nuclear power plant in which the accident occurred by the East Japan Earthquake in 2011, in order to avoid radioactive exposure of workers, many robots are used. However, it seems that the nuclear peculiarity and the singularity of Fukushima obstruct ordinary robot technicians' entry.

In order to make these barriers low, we explain how the nuclear power plant company is designing the robot, and argue also about the difficulty of mechatronics.

Key Words: Robot, Nuclear Hazard, Design, Module, Remote

1. は じ め に

2011年3月11日に発生した東日本大震災で被災した事故が起きた福島第一原子力発電所（以下「福島発電所」）では、事故に起因する課題を収束させる活動（以下「収束支援」）に携わる作業員の放射線被ばくや設備倒壊による負傷などの危険を避けるため、人に代わってロボットが用いられている[1]。特に放射線量の高い建屋内において、当初ロボットは、カメラによる被災状況の確認や、各種センサによる温度・放射線量の計測などの「監視」に用いられ、機動性の高い小型ロボットが適していた[2][3]。現場の状況が徐々に分かってくるにつれ、瓦礫撤去や遮へい体の運搬、コンクリートや手すりの切断撤去など小型ロボットでは不可能な「作業」を行うロボットの現場への投入が望まれている。

一方、ロボット技術者からは「原子力災害の収束支援に協力したいが、やり方が分からない」「そもそも対応するに十分な技術が確立していないのではないか」といった意見を耳にする。福島発電所の収束支援に参画することはロボット開発面でも「敷居が高い」ようである。

本稿は、懸命の収束支援が続く中、叡智の集積を阻害するこうした見えないバリアの技術的中身を明らかにし、設計技術によって課題を解決するアイデアを提示することにより、ロボット

技術者が原子力災害収束支援に参画する敷居を低くすることを目的とする。具体的には、2012年度NEDO委託事業「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト[4]」にて開発した「狹隘部遠隔重量物荷揚／作業台車“Super Giraffe”」へ設計技術をどのように展開し、課題を解決したかを例示することにより、具体的なイメージを喚起し、合わせて今後の展開とさらなる課題について考察する。

2. 原子力災害の特徴と収束支援ロボットの課題

原子力災害現場における収束支援を想定した遠隔操作ロボットは、過去に検討や準備がされたことがあった[5]。国内で代表的なプロジェクトとしては、1999年9月30日、茨城県東海村の株式会社ジェーシーオー（以下JCO）で発生した臨界事故（核分裂反応が意図せず原子炉内のように連鎖的に起こる状態）を教訓に、原子力施設の事故に遠隔で対応するロボットシステムを備えるべく実施された経済産業省委託事業「原子力防災支援システム開発」[6]～[8]が挙げられる。しかし当時は“いつ使うか分からないロボット”に対する理解が得られず、筆者らはロボットの維持・開発が継続しなかった原因と課題を指摘した[9]。Fig. 1は、当時想定した原子力災害現場の環境や作業である。

階段を上り、ドアを開け、作業をする点では、JCO事故でも福島発電所事故でも対応するロボットが実行する内容は同じであるが、JCO事故は災害範囲が小さく、設備や建屋の破壊がないため環境条件が既知であるなど福島発電所事故とは大きく条件が異なり、JCO事故当時のロボット仕様そのままでは福島発電所事故に対峙できないことが分かる。

原稿受付 2014年3月19日

*三菱重工株式会社

*Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

■ 本論文は有用性で評価されました（システム設計・構築分野）。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

Fig. 1 Nuclear hazard convergence work assuming JCO accident

しかし 12 年前の原子力防災支援システム開発後に指摘されたロボットへの課題と、福島発電所収束支援で直面する現在の課題とを下記 (1) (2) に比較すると、ロボット技術者を福島発電所から遠ざけているのは、福島発電所事故の特異さだけでなく、昔も今も変わらない原子力の特殊さと、実用を目指したメカトロニクス設計の難しさであることが分かる。

- (1) 原子力防災支援システム報告書 (2001) [6] に記載された技術課題
 - ①電子部品の耐放射線性向上および耐熱性向上が必要
 - ②無線制御技術の高度化が必要
 - ③専用ツールの充実・高度化・インテリジェント化が必要
 - ④運転操作技術の高度化が必要
 - ⑤防災支援ロボットの共同作業・操作性向上にかかわる研究が必要
- (2) 東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発計画と基盤研究に関するワークショップ (2013) [10] で報告された技術課題
 - ⑥ニーズや仕様を明確にするのが難しい
現場の状況がよく分からず放射線も高いため、いちいち調査ロボットが必要
ニーズが変化するので、ある程度の無駄（マージン）を覚悟した開発が必要
 - ⑦短期間で開発するので初期トラブルが多い
今後導入される大型ロボットが建屋内でスタックしてしまうと大問題であり、高い信頼性が必要
 - ⑧無線インフラがなく、ケーブル処理装置の不具合も多い
ロボットによる無線インフラの構築が必要
 - ⑨オペレーションおよびメンテナンス・準備片づけ作業に多くの人手が必要で被ばくが多い
 - ⑩現場を完全に模擬したモックアップがなく、十分な事前試験ができない

3. Super Giraffe の概要

本稿で原子力災害対応ロボットの設計手法について例示する Super Giraffe [11] の主要仕様を **Table 1** に、走行時と高所作

Table 1 Specifications of Super Giraffe

general	length 2500mm, width 800mm, height 2000mm wright 4t environmental resistance IP55 remote control by WLAN high maintainability for radioactive decommission handle valve in the altitude of 8m
traveling performance	electrical 4WD & 4WS pivotal turn climb up to 15degree bump up to 50mm
manipulator	7 axis, redundancy control tool changer with less-wiring system based on PLC
battery	Li-ion system based on EV continuously operation 5hours

Fig. 2 Appearance of robot “Super Giraffe”

業時の外観を **Fig. 2** に示す。Super Giraffe は、4 輪操舵 4 輪駆動により横向き移動や超信地旋回が可能な高い機動性と、5 段テレスコプ式のアームの先端にマニピュレータを備え地面から 8 [m] 高所まで広い作業範囲を備えたバッテリー駆動・無線遠隔操縦式の移動ロボットである。

4. 原子力の“特殊さ”への設計対応

原子力災害対応に限らず通常の原子力プラント保全用ロボットには、一般のロボット技術者には理解が難しい抽象的な仕様が要求される。2 章の課題①ではロボットが放射線環境で長い時間正常に稼働するための「耐放射線性」が要求されている。課題⑦ではロボットの信頼性向上と同時に、万一ロボットが現場でスタックしても何らかの方法で回収する「非常脱出性」が要求されている。スタックしたロボットを修理・再起動させるためだけでなく、他の作業の動線の障害とならないための要求仕様であり、放射線環境のため人が長い時間作業できない原子力災害対応ロボット、特に人では運べない大型ロボットではこの仕様を前もってロボットに盛り込んでおくことが重要である。課題⑨では放射線環境で作業したロボットから作業員が被ばくすることなく短い時間で汚染を取り除くための「除染性」が要求されている。以下これらの要求仕様をロボットに装備する設計手法について詳述する。

4.1 「耐放射線性」の設計

耐放射線性とは、ある物質が放射線によってエネルギーを受け変化をしても、本来の物性を維持できる限界を示す指標である。放射線には α , β , γ 線などの種類があるが、原子力分野

Fig. 3 Radioresistance

は宇宙空間とは異なり、 α 、 β 線は薄い金属ケースなどで遮へいできるため、 γ 線のみ考慮すればよい。よって入手しやすい測定器で計測される空間線量率（単位はSv/時）に、放射線にさらされる（被ばくする）時間を乗じた集積線量（単位はSv）でロボットの耐放射線性を単純化して論じることができる。放射線試験設備（例：文献[12][13]など）を利用し、コバルト60から発する γ 線を動作をモニタしながらロボットに照射し、動作限界の集積線量を記録すればよい。耐放射線性試験は破壊試験であり、ロボット全体を照射するのはコスト的に大変である。また、ロボットの大きさによっては照射設備に入りきらないこともあるため、通常は部品単位の照射試験結果からロボット全体の耐放射線を推定する。

Fig. 3にSuper Giraffe等のロボットに搭載される主たる部品の耐放射線試験の結果を示す。この結果より、安全率や以下に述べる誤差を考慮し、Super Giraffeは約100[Sv]の耐放射線性を有すると推定した。

耐放射線性の試験実施にあたって注意した点を記す。

(1) 試験をする機器の内部動作を考慮して試験方法を決定した。例えば、動作開始時のみROMリードして動作する機器などは、連続動作より断続動作での耐放射線性が低い結果となることがある。

(2) 測定誤差だけでなく、機器の製造ロットによる耐放射線性のばらつきを考慮し、試験サンプル数を最低三つ以上とした。本来は、測定結果の蓄積によるデータ分布の解析と統計的考察が必要であり今後の課題である。

(3) 試験後に壊れた原因を十分確認した。素子レベルで壊れた箇所を特定しておく、同じ素子を使った他の装置の耐放射線性が推定しやすい。放射線によって壊れたサンプル自体が放射線を発することはよく耳にする誤解であり、通常の設備で原因究明可能である。

γ 線は金属ケースでは実用的には遮へいすることができないため、ロボットの耐放射線性能を高めるためには、ロボットを

HP of Tamagawa Seiki co., Ltd

Fig. 4 Resolvers

Fig. 5 8-axis servo driver with resolver I/F

構成する耐放射線性の低い部品を高い部品に置き換えるしかない。耐放射線性の低い部品とは、集積度の高いメモリなどのICや、光学式エンコーダ・フォトカプラー・CCDカメラなどに含まれる光素子などであるが、これらをすべて耐放射線性能の高いICや素子で置き換えることは現実的ではない[14]。そこで、耐放射線性の高い部品と低い部品を以下の設計コンセプトで使い分けることにより、放射線環境下でのロボットの正常動作を担保した。

(設計コンセプト1)

簡単に交換・メンテナンスできない部品は、耐放射線性の高い部品を選定する。例えば、エンコーダはモータと一体でロボットの中心部に配置する場合が多く、簡単には交換できない。よって、エンコーダとしては、耐放射線性の低い光素子を含む光学式エンコーダでなく、耐放射線性の高いレゾルバなどを採用する。

Fig. 4にSuper Giraffeの可動部に採用しているレゾルバを示す[15]。レゾルバに対応するサーボドライバは残念ながらあまり多種類は市販されていない[16]。筆者らは、ロボット組み込み用として、**Fig. 5**に示す多軸一体サーボドライバにレゾルバI/Fを装備したものを開発し使用している。分解能を要しない場合は、電気I/Fが簡単で耐放射線性が高いポテンシオメータや磁気式近接スイッチ[17]をレゾルバの代替として使用することもある。

(設計コンセプト2)

どうしても耐放射線性の低い部品を使わざるを得ない場合は、

Fig. 6 Package exchange system

Fig. 7 Servo drivers on c-PCI rack

簡単に交換できるように設計する。例えば、多くの IC やフォトカプラなどを含む制御装置は、パッケージでまとめて交換できるように設計し、ロボット各所に耐放射線性の低い部品が分散しないようにする。

Fig. 6 および **Fig. 7** に、Super Giraffe における耐放射線性を考慮した設計を示す。バッテリーや電源は、冷却系などの周辺電気部品もすべて含めてパッケージで交換できる。制御装置やドライバは cPCI ラックサイズに統一しスロット交換できるようにした。これらのコンセプトを適用した設計により、耐放射線性が約 100 [Sv] と推定した Super Giraffe を、電源やサーボドライバをパッケージ交換することにより約 500 [Sv] まで大きな改修をせずに稼働できるようにした。

4.2 「非常脱出性」の設計

非常脱出とは、万一ロボットが動作不能になった場合に、人手を含む何がしかの方法によって、ロボットを回収することである。

非常脱出しやすいロボットとして、マニピュレータを例に挙げる。通常の産業用マニピュレータの関節には無励磁作動ブレーキ（負作動ブレーキともいう）が装備されており、通電していないときにはブレーキがかかって関節は保持され、マニピュレータ動作時にはブレーキに通電して解放し関節をフリーにする。ところが、原子力プラントの保全工事に使用するマニピュレー

Fig. 8 Emergency escape system for wheel and steering

タの関節には作動原理が逆の励磁作動ブレーキ（正作動ブレーキ）を装備することが多い。これは、マニピュレータが原子力プラント内での作業中に動作不能になった場合、電源を遮断することでブレーキを解放し、マニピュレータの関節をフリーにして非常脱出しやすくするためである。すなわち、電源遮断など誤操作によって関節がフリーになり、マニピュレータをプラント機器にぶつけてしまうリスクより、非常脱出性を優先したフェールセーフな設計手法による。

Super Giraffe は、アウトリガー 8 軸・梯子伸縮 1 軸の合計 9 軸の油圧駆動可動部と、車輪 4 軸・ステアリング 4 軸・梯子旋回 1 軸・マニピュレータ 9 軸の合計 18 軸の電動駆動可動部を有する。Super Giraffe の最終的な非常脱出方法は、すべての可動部を Fig. 2 左図に示す初期姿勢にもどし、車輪をフリーにしてけん引する方法である。よって、制御や動力がなくても、すべての可動部をロボット外部から人手で動かせる必要がある。

油圧駆動可動部は、駆動圧力を抜いてフリーにすることで非常脱出する。このため、非常時にロボット外部から人手で駆動圧力を抜くための手動減圧弁を油圧回路に設けた。電動駆動可動部は、減速器やブレーキがあり簡単ではない。**Fig. 8** に電動駆動可動部の非常脱出機構の例として、ステアリング軸と車輪軸を示す。ステアリング軸のモータと減速器との動力接続部をギヤで分岐し、図中の非常脱出用ハンドルとして本体の外部へ導き出した。ステアリング軸にはブレーキがないため、非常時には外部から人手でこの非常脱出用ハンドルを回してステアリング軸を動かすことができる。車輪は坂道駐車にそなえて無励磁作動ブレーキを装備しているため、ブレーキをモータごと取り外して車輪をフリーにする方法を採用した。

4.3 「除染性」の設計

ロボットを原子力の現場で使用すると、ロボットが放射線を発するようにになり、しばしば「汚れた」と表現する。ロボットの汚れは、周辺環境の放射性物質（汚れ）がロボット表面に付着することによって起こる。ロボットの構造材自体が環境によって変質して放射線源となる（これを放射化するという）ことはなく、しばしば耳にする誤解である。除染とは「ロボットに起因する放射線量を、メンテナンスによって下げること」であり、

Fig. 9 Example of decontamination, bolts

Fig. 10 Easy tire-exchange system for less exposure

通常はロボットの表面を拭く・洗うなどの方法をとるが、汚れがひどい場合は、表面を削り取ったり交換したりすることもある。原子力の現場で汚れたロボットは、除染作業員の被ばく防止のため、防護服と二重ゴム手袋で取り扱うので、ロボットの内部や狭い隅部をきれいに拭くなどの器用な作業はできない。すなわち、ロボット要求仕様としての「除染性が高い」とは以下の要件を必要とする。

- (1) 密閉構造で、外部の汚れが内部に入らないこと
- (2) 表面が滑らかで汚れが付着しにくく、小さいすきまがなく汚れをふきとりやすいこと
- (3) 汚れやすく除染しにくい部品は、簡単に交換しやすいこと

これらの要件を達成するためには、清掃しやすい一般機器と同じ感覚で設計すればよいが、特に(2)に関して見落としがちなポイントを Fig. 9 に例示する。機器の設計には、トルク管理や作業のしやすさから六角穴付きボルトを用いることが多いが、六角穴部やボルト外表面のローレット加工部は細かい隙間が多く清掃しにくい。ましてボルトの頭を“沈める”座繰り(図左)加工をするとさらに清掃しにくくなる。筆者らは、汚れが予想される箇所にはできるだけ六角ボルトを用いる。ボルトは一例であり、除染性を確保するためには、従来の設計手法にこだわらず、すきまを少なくするために設計を見直すことが必要である。

Super Giraffe ではタイヤが最も汚れやすく、ゴムは水洗いしても汚れが落ちにくいので、しばしば交換する。汚れたタイヤを履きつづけると、ロボット全体の放射線量が上がり、ロボットメンテナンス員が被ばくするので望ましくない。タイヤ交換時の被ばく低減のため、タイヤ交換時間を短くする工夫として、Fig. 10 に示すようにタイヤをセンターコラム一箇所固定する方式とした。4 個のタイヤを短時間(10 分以内)で交換できる。

5. 福島発電所事故の“特異さ”への設計対応

災害現場で用いるロボットは、シンプルで操作が容易という観点から、単機能なロボットが好まれることが多い。しかし、災害現場の状況は災害ごとに様々で、復旧作業の進捗に伴い必要な作業も都度変化するため、ロボットへの要求機能をあらかじめ適切に予測し、準備しておくことは難しい。また、ニーズが明確になった後、ロボットを都度開発することも、時間的・コスト的に大変である。このため、災害対応用ロボットの開発仕様は、高機能で何にでも対応できる“スーパーロボット”になりがちであるが、完成したロボットは、構造や操作が複雑でコストも高く、維持管理が大変で使いにくいロボットとなってしまうことが問題であった。2 章の課題⑥で指摘されたのはまさにこの課題であり、福島発電所事故は災害として規模が大きく、先を見通しにくい点では特異である。仕様がないロボットは作れないが、仕様が明確になってから完成までの時間を短縮することは設計問題として対応可能である。

Super Giraffe への要求仕様は、遠隔操縦により連続 5 時間稼働、建屋内の移動、天井近くにあるバルブをマニピュレータなどで操作できることといったある程度具体的なものであった。この要求仕様に加えて、将来必要となるかもしれない作業ニーズ(例えば不整地走行、重量物運搬、高所での溶接や配管の切断撤去など)へも容易に転用できる仕様を実現すべく、モジュール思想を採用した。モジュール思想は 2 章の課題③に要求されるツールのインテリジェント化にも対応する。

5.1 モジュール設計

ロボットを機能性能ごとに分割したモジュール単位で開発し、複数のモジュールを組み合わせることでロボット全体を構成するモジュール設計の利点を以下にまとめる。

- (1) ロボットシステムとしての高い拡張性を有する

必要なモジュールのみを開発し組替えることで、災害現場で求められる様々な仕様のロボットへ容易に転用できる。各モジュール間のインターフェース仕様を踏襲することで、サードパーティでのモジュール開発が可能となり、各所の得意分野を生かしたモジュールラインナップを容易にそろえることができる。

- (2) ロボットシステムとしての高い信頼性を有する

新規開発するモジュール以外はずでに開発が完了し信頼性が確保されているため、新規モジュールの機能検証に開発ウエイトを置くことができ、少ない労力でロボットシステム全体の信頼性を維持できる。

- (3) 短期間での開発が可能となる

現場でのロボット作業と、工場での新規モジュール開発を並行して進められるため、作業完了から次の新機能ロボットへの転用までのロボットが使えない時間が短い。また、複数モジュールの開発も同時進行可能であり、災害現場の多くの作業ニーズにスピーディーに対応できる。

5.2 Super Giraffe のモジュール設計

Super Giraffe のモジュール構成を Fig. 11 に示す。メカ的には、台車モジュール(移動部)、荷揚げモジュール(作業範囲拡大部)、搭載モジュール(作業部)、エンドエフェクタモジュールの 4 モジュール構成とし、各モジュール間をボルト数本で接続

Fig. 11 Module design system of Super Giraffe

Table 2 Functional trade-off of cart module

candidate of performance	4WD	2WD	4 crawlers	2 crawlers
traveling within width of 1.2m			○	
working and handling valve in height of 8m		○ with outriggers		
parallel parking, omnidirectional traveling	○	×	×	×
traveling at 6 km/h or more			○	
pivotal turning	○	×	△ high resistance	△ high resistance
climbing up to 15 degree			○	
bumping up to 50 mm	○	○	◎ stairs	◎ stairs
selection for an initial model	○			

した。エンドエフェクタは頻繁な交換を想定し、産業用ロボットで多用されているツールチェンジャをベースに新規設計して適用した。遠隔操作でメカと電気配線・エアー配管を一括脱着できる。各モジュール間のインターフェースは、情報用と映像用のイーサネットを各1系統、動力としてDC141[V]とDC24[V]を各1系統と14[MPa]の油圧系統だけに単純化した。モジュール単体での新規開発・性能検証を可能とするため、モジュールごとにコントローラを配置して独立でも機能するシステム設計とした。各モジュールがイーサネット上の独立したIPアドレスを有するため、モジュール同士の複雑な同期動作を求めない限り、個々のモジュール設計者は他モジュールの機能を意識する必要がなく、ソフトウェアも独立して制作検証できる。

Super Giraffeの初期モデルとして、台車モジュールに「四輪駆動・四輪操舵の台車」、荷揚げモジュールに「多段はしご式伸縮機構」、搭載モジュールに「7軸マニピュレータ」、エンドエフェクタモジュールに「バルブ操作ツール」をそろえた。Table 2に台車モジュールの、Table 3に荷揚げモジュールの仕様トレードオフを示す。福島発電所でのSuper Giraffeの作業としては、がれきなどが片付いた後の除染や検査など比較的複雑な作業を想定している。台車モジュールとしては、キャタピラ式の踏破性より、狭い発電所内での位置決め性能を優先して4輪駆動・4輪操舵の車輪式を採用した。荷揚げモジュールとしては、作業対象の真下に台車モジュールがもぐりこめない場面を想定し、オーバーハング性能を重視し、動作が単純で周辺環境との干渉回避制御が簡単なテレスコピック方式を採用した。

Table 3 Functional trade-off of lift-up module

candidate of performance	pantograph	forklift	telescopic	manipulator
accessibility to transverse offset	×	×	○	○
accessibility over obstacles and handrails	×	×	×	○
accessibility at narrow place	○	○	○	×
reach height 8 m			○	
lift up mass 150 kg			○	
selection for an initial model			○	

6. 実用を目指した「メカトロニクス」の設計対応

2章に列記した課題④⑤および課題⑨⑩には、遠隔操作性の向上が、12年の歳月を超えてなお変わらないメカトロニクスの課題として指摘されている。遠隔操作手法に関しては、規制はもちろん、規格や教科書などのガイドラインが少なく、課題に直面した技術者が経験をもとに個別に対応してきた。操作性にはメカトロニクスに含まれる多くの技術領域が複雑に関連しており体系化が難しい。本稿では、2章の課題②および⑧に指摘されている無線インフラも広義の遠隔操作性の課題ととらえ、しばしば議論となる、配線が操作性に与える影響、モックアップ機能検証のやり方、操作画面の作り方を例に、設計による課題の解決手法を示し、今後の展望を述べる。

6.1 無線インフラ整備による操作性の向上

無線インフラに関する課題は、近年の無線LAN技術の進歩と雲仙普賢岳での遠隔建機の経験[18]などにより改善されてきた。福島発電所の屋外には無線インフラが整備され、大型建機の無線操作が可能となっている。また屋内では、千葉工業大学などが開発したロボットクインスのケーブル処理装置に不具合が生じたとき、別ロボットから無線LAN接続してクインスを救出することができている[10]。

Super Giraffeの開発を含む「NEDO災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」ではコンソーシアムとして、複数の周波数を用いて冗長性を確保した無線LANシステムを開発し、複数ロボット共用のプラットフォームとした[4]。遠隔操作ロボットによる屋内無線インフラの設置が今後の課題であり、難しい作業であるが、現状の研究成果や実績で対応可能である。

また、障害物の影響を受けにくくより安定なロボット用無線インフラとして、公共ブロードバンドや地上デジタル放送ホワイトバンドなど低い周波数帯の利用に関し、技術面および法整備面の課題への取り組みが始まっている[19][20]。

6.2 省配線化による操作性の向上

近年、イーサネットやCANなどシリアル通信技術の進歩によりロボット内部の省配線化が進み、高メンテナンス性と低コストに寄与している[21]。しかし、マニピュレータの先端に装備するエンドエフェクタを省配線化するのは簡単ではない。エンドエフェクタの種類ごとに搭載されるカメラやセンサ類が異なるため、様々なエンドエフェクタと接続されるマニピュレータ側の配線は、これらすべてのエンドエフェクタと接続できるよう多種類のケーブルを準備する必要があり、通常はマニピュ

レータ外部の太い配線となる。

マニピュレータの外部配線の有無や太さと、マニピュレータの遠隔での操作性との関係を **Fig. 12** で考察する。操作性は外部配線の太さに比例せず、外部配線の有無が支配的となることはロボット設計者が共有すべきノウハウである。1本でも外部配線があると、遠隔操作に多数のカメラを配したとしても、外部配線を周辺の障害物に引っ掛ける危険性から操作者は保守的となり、操作性は落ちる。よって、ロボット設計者は、操作性を確保するために、マニピュレータの外部配線をなくす工夫をしなければならない。

Super Giraffe ではエンドエフェクタの配線を省配線化してすべてマニピュレータ内部配線とすべく、電力線通信 (Power

Fig. 12 Problem between wiring and operativity

Fig. 13 Appearance of less-wiring device

Line Communication : PLC) 技術を用いて **Fig. 13** に示す省配線化デバイスを開発し [22], マニピュレータの外部配線をなくした。マニピュレータ内部配線 2 本のみで、エンドエフェクタへ 80 [Mbps] イーサネット制御信号と 72 [W] 直流電力を供給する。

本デバイスを用いたエンドエフェクタのシステム構成を **Fig. 14** に示す。Super Giraffe 初期モデルのエンドエフェクタモジュールとして開発したバルブ操作ツールのモータ動力と、制御やカメラ等センサ情報をこの PLC 省配線化デバイスで伝送している。これによりエンドエフェクタの配線はすべてマニピュレータの内部に実装することができ、良好な操作性を得ることができた。

6.3 モックアップ機能検証による操作性の向上

開発したロボットを現場で十分に機能させるためには、現場投入前に設計仕様を十分検証し、必要な改良を施しておくことが重要である。そのためには、できるだけ忠実に現場を模擬したモックアップで機能検証をしたい。

Super Giraffe は福島発電所での SBO (Station Blackout : 全電源喪失) 環境での作業を想定しており、工場内での機能検証も同等の環境を用意した。照明条件として暗所を模擬するだけでなく、汚染環境でのロボット操作を想定し、**Fig. 15** に示す

Fig. 15 Super Giraffe operation on Station Blackout

Fig. 14 System diagram of less-wiring manipulator system

Fig. 16 Operation console with master-arm and monitors

ように操作者は現場作業と同等の全面マスク、タイベック（化学防護服）、ゴム手袋の装備を着用し、ロボットに搭載された照明とカメラ映像のみを頼りに、ロボットを直接目視できない位置から遠隔操作した。想定した2種類の作業（①狭隘位置へのロボット移動、②高所に設置したバルブの操作）を実施することにより、操作性に関する設計・製作の妥当性ととともに、作業現場への往復を含めた5時間以上の移動と作業をバッテリーで連続稼働できる性能を確認した。また、バックアップ要員を含めた複数の操作者トレーニングに合わせて、操作系の改良を実施した。

現在国を中心にして、福島発電所を模擬したモックアップの準備が進んでいる。模擬すべきは寸法や照明条件だけでなく、幾何学的な誤差や温度湿度など個々の設計条件に対応した検証試験が必要であることに注意して、モックアップの仕様にインプットしている[20]。

6.4 操作画面の作り方による操作性の向上

操作コンソールの規模はしばしば議論になる。マニピュレータを有する作業用ロボットのコンソールとしては、カメラ操作とマニピュレータ操作を複数のオペレータで同時操作が可能な大型コンソール[18]が有用であると筆者らは考えており、JCO事故を教訓に2001年度に開発した原子力防災支援システムではFig. 16に示すマスターアームを含む大型コンソールを開発し良好な作業性を得た[6]。

一方、監視などを主たる目的とする小型ロボット用として、ノートパソコンとゲームコントローラで操作コンソールを構成することが多い。コンパクトな操作コンソールは、どこへでも手軽に持ち運べる機動力がある反面、一度に表示できる情報が少なかったり、操作モードの切り替えが煩雑になったりと、操作性に劣る。今回 Super Giraffe では、現場での機動性を重視したコンパクトな操作コンソールを選択したが、Fig. 15に示すように、ロボット操作用とは別にカメラ映像表示用ノートパソコンを準備して同時に多くの画面を表示したり、コントローラの写真と各ボタンの動作説明を操作モードに合わせて画面上に表示したりすることで、操作性を向上させる工夫をした。

操作コンソールへの画像の表示方法も課題であり、特に移動ロボット後退時のカメラ映像の表示方法は議論になった。Fig. 17右上に示すように、後方カメラの映像を自動車のバックモニターのようにそのまま表示するか、同図右下に示すように操作者が振り返った状態を想定し左右を反転して表示するかは問題である。

Fig. 17 The problem between operativity and camera images

Super Giraffe では、2本のジョイスティックのうち、片方の前後に台車の前後進速度指令を、もう片方の左右に台車の方向指令を割り当て、自動車のハンドルに似た操作系を構成しており、後退時のカメラ画像はFig. 17右上のような自動車のバックモニターのような画像を表示すると良い操作感が得られた。福島発電所で稼働中の移動ロボット“Quince”ではさらに、前進／後進を明示的に切り替え、前方カメラ画面と後方カメラ画面の位置や操作器の操作方向も逆転することにより、操作性が向上することが報告されている[23]。もしクローラ型の台車で、左右のジョイスティックに左右のクローラの前後進速度指令を割り当てている場合は、Fig. 17右下の画像の方が操作しやすいと予想できる。

以上のように操作性の良し悪しは、ロボットのメカ的・電氣的な性能や操作画面のつくり方だけでなく、ロボットの動作指令を操作レバーにどう振り付けるかといったソフトウェアに関する考え方や操作者の慣れなどにも影響される複雑な問題である。今後、経験値の蓄積を進め、メカロニクス設計論に人間工学などをあわせた学問化を深めていく必要がある。

7. ま と め

原子力災害収束支援へのロボット技術者の参画を阻害するバリアの実態を明らかにし、設計による解決方法を提示した。多くの叡智が集結し、産学連携活動によって課題を解決する一助となれば幸いである。今後、ロボット技術者としての知識の蓄積と、原子力プラントメカ技術者としての経験発信やノウハウの見える化を進める。

2012年度 NEDO 委託事業「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」に参画し、機能拡張が容易なモジュール設計思想を組み込んだ Super Giraffe を開発した。引き続き、経済産業省補助事業において、高所でサンドブラストを用いた除染作業をするために、プラスチックの供給・回収用ホースリールを備えた専用の荷揚げモジュールや、原子炉格納容器の漏えいの有無を狭隘部で検査する専用のエンドエフェクタなどの開発を進めている。今後、各種モジュールの充実や操作性の改良を進め、福島発電所での災害収束支援などに適用していく。

謝辞 Super Giraffe の開発にあたり、プロジェクトリーダー浅間先生（東京大学）、サブリーダー佐藤先生（東京大学）、推進委員、評価委員の皆様および NEDO 川島様に多大なご指導とご尽力をいただきました。また、同プロジェクトでコンソーシ

アムを組んだ大学・メーカー様およびコンソーシアムまとめ米谷様（日立 GE））にも感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] 松野 他：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」「(同)Ⅱ」, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.1/2, 2014.
- [2] 浅間：“災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.1, pp.37-41, 2014.
- [3] 小柳, 吉田, 西村：“福島第一原子力発電所建屋内探査用ロボットシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.31, no.1, pp.47-48, 2013.
- [4] (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：災害対応無人化システム研究開発プロジェクト, 2012.
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100045.html (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [5] 東日本震災関連委員会（原子力関係記録作成分科会）：原子力ロボット記録と提言, 日本ロボット学会, 2013.
- [6] 製造科学技術センター：平成 11 年度原子力防災支援システム開発補助事業成果報告書, 2001.
- [7] 間野, 濱田：“原子力防災支援システムの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6, pp.714-721, 2001.
- [8] 柴沼：“原研における事故対応ロボットの開発 (その 2) 耐環境型ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6, pp.710-713, 2001.
- [9] 藤田, 大西：“三菱重工の災害対応ロボットへの取り組み”, 日本ロボット工業会機関誌「ロボット」, no.206, pp.47-51, 2012.
- [10] 吉野：福島第一原子力発電所における遠隔操作・ロボットの課題, 東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発計画と基盤研究に関するワークショップ第 5 回, 2013.
<http://www.nsra.or.jp/safe/fdecomi/haifu05-02.pdf> (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [11] 三菱重工業株式会社：遠隔操作作業ロボット MHI-Super Giraffe, <http://www.mhi.co.jp/discover/pickup/giraffe/> (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [12] 大阪府立大学放射線研究センター：コバルト 60 ガンマ線照射施設, <http://www.riast.osakafu-u.ac.jp/index.html> (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [13] ラジエ工業株式会社：放射線照射サービス, <http://www.radia-ind.co.jp/products/index.htm> (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [14] T. Oomichi, Y. Isozaki and M. Kojima: “Practical design of robots operating in radiation environments,” Advanced Robotics, vol.21, no.5-6, pp.515-532, 2007.
- [15] 多摩川精機株式会社：レゾルバ, <http://www.tamagawa-seiki.co.jp/jpn/lvdt/> (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [16] 多摩川精機株式会社：サーボモータシステム (レゾルバ式), <http://www.tamagawa-seiki.co.jp/jpn/servo/> (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [17] 株式会社マコメ研究所：磁気近接スイッチ, <http://www.macome.co.jp/PRODUCTS/sw/index.htm> (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [18] 建設無人化施工協会, <http://www.kenmukyou.gr.jp/> (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [19] 総務省：ライフサポート型ロボット技術に関する研究開発および東日本大震災復興関連事業 (平成 23 年度第 3 次補正予算) 報告書, 2013, http://www.soumu.go.jp/main_content/000262771.pdf (HP アクセス：2014 年 1 月 1 日)
- [20] 産業競争力懇談会 (COCN)：災害対応ロボットセンター設立構想, 中間報告書, 2013, 最終報告書, 2014.
- [21] T. Izushi, M. Hotta, T. Oomichi, S. Seki and J. Koyama: “Development of Network Plug-in Actuator,” JRM, vol.19, no.2, pp.232-242, 2007.
- [22] 大西：“電力線通信 (PLC) を利用したロボットの省配線技術”, 機械設計, vol.57, no.11, pp.23-29, 2013.
- [23] 古田, 吉田, 西村, 大和：“原発内作業・調査ミッション用ロボットの開発と改良”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.2, pp.92-97, 2014.

大西 献 (Ken Onishi)

1986 年東京大学工学部精密機械工学科卒業, 同年三菱重工業株式会社に入社, 原子力・一般産業・家庭用などのロボットの企画・開発・設計および製造に従事し, 日本ロボット学会実用化技術賞を 3 度, ロボット活用社会貢献賞などを受賞. 技術士 (機械部門), Professional Engineer (機械および電気), 気象予報士, 日本機械学会, 日本ロボット工業会会員.

(日本ロボット学会フェロー・正会員)

藤田 淳 (Jun Fujita)

1995 金沢大学機械システム工学科卒業, 1997 同大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻修士課程修了. 同年三菱重工業株式会社入社. 原子力発電所内で使われる保守・点検・作業ロボットの設計開発に携わり現在に至る. 技術士 (機械部門・ロボット), 日本機械学会会員.

(日本ロボット学会正会員)

橋本達矢 (Tatsuya Hashimoto)

2006 年筑波大学大学院博士前期課程修了. 修士 (工学). 2009 年より三菱重工業で原子力プラントの検査・補修装置の設計に従事. ロボットの駆動機構やその制御方法に興味があり, 近年は福島第一原発向けの遠隔操作ロボットの開発を行っている.

大西典子 (Noriko Onishi)

1984 年甲南大学理学部経営理学科卒業, 同年三菱重工業株式会社に入社, 神戸造船所にてロボットの開発に従事. 可搬式汎用知能アームの実用化で日本ロボット学会実用化技術賞を受賞. 廃炉解体用ロボット, 原子炉容器検査・保全ロボット (A-UT マシン, 高速 INLAY) などの主として制御ソフトウェア設計・製作に携わる.

原 浩二 (Koji Hara)

1989 年県立兵庫工業高等学校電気科卒業, 同年三菱重工業株式会社に入社, 所内インフラ設備, シンガポール空港搬送設備, 原子力発電プラントの電気制御や検査・補修装置 (ロボット) の設計に従事. バッテリーや無線制御技術に興味を持ち, 近年は福島第一原子力発電所向けの遠隔操作ロボットの開発を行っている.