

災害対応作業ロボット “Super Giraffe” の開発と 福島第一原子力発電所でのロボット活用

藤 田 淳

災害や事故等で、人の立ち入りが困難な環境となった施設内等において、人に代わって作業を行うロボットの開発が2012年度（独新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託事業として実施され、8m高所でマニピュレータ作業が可能な移動ロボット“Super Giraffe”（以下「本移動ロボット」という）を開発した。このロボットの特徴はモジュール設計を取り入れたことで、災害現場の多様なニーズに対して、必要なモジュールの開発・交換で対応できる拡張性に富んだロボットである。福島第一原子力発電所での全電源喪失環境を模擬した社内検証試験で、現場への適用性が確認された本移動ロボットは、既に福島第一原子力発電所で適用されている作業ロボット“MEISTeR”（以下「本作業ロボット」という）同様、今後モジュールの拡充を行うことで災害現場適用を図る。なお、本稿は三菱重工技報51-1号（三菱重工ホームページより閲覧可能）に記載した内容をベースに追記編集した¹⁾。

キーワード：ロボット，モジュール設計，災害対応，福島第一原子力発電所

1. はじめに^{2), 5)}

2011年に発生した東日本大震災で甚大な被害が発生した福島第一原子力発電所では、放射線被曝や設備倒壊による負傷等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。災害直後に用いられたロボットの役割は、カメラによる被災状況の確認や、各種センサによる温度・放射線量等の計測が主で、小型で高機動性を有するロボットが適していた。現場の状況が徐々に判ってきた現状において、今後は、瓦礫撤去や遮蔽体の運搬、コンクリートや手すりの切断撤去、バルブ操作、鍵やレバーの操作によるドア開閉等、小型ロボットでは不可能であった「作業」が必要となり、これらを人に代わって行うロボットのニーズが高まっている。

こうしたニーズに対応すべく、2012年度に「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」がNEDOで実施された³⁾。このプロジェクトは災害や重大事故等によって家屋、産業・公共施設等が被災し、作業員の立ち入りが困難となった状況において、速やかに状況把握、機材等の運搬、復旧活動を行うためのロボット研究開発を目的としている。同プロジェクト中「作業移動機構の開発」のうち「狭隘部遠隔重量物荷揚／作業台車の開発」において、狭隘な場所での高機動性と高所作業性を両立しながら、将来の多様な

ニーズへも容易に対応（転用）できる拡張性に富んだ本移動ロボットを完成させた（写真—1）。本稿ではそのロボット開発の概要を報告するとともに、福島第一原子力発電所で活躍している作業ロボットについても紹介する。



写真—1 本移動ロボット外観

2. 本移動ロボットの概要

本移動ロボットは、移動台車に8m高所でのマニピュレータ作業を可能とする荷揚げ機構（5段伸縮梯子構造）を搭載した無線遠隔操縦ロボットである。マニピュレータ先端には様々な専用ツールを装備することが可能で、2012年度のNEDOプロジェクトではバルブ開閉ツールを開発し搭載した。移動台車は建屋内

表-1 本移動ロボット主要仕様

項目	仕様
外形寸法・質量	全長 2530, 幅 800, 全高 2000 [mm], 4 [ton]
移動方式	4 輪駆動 4 輪操舵方式
走行性能	段差 50 [mm], 傾斜 15 [度], 平地最大 6 [km/h]
移動性能	前後進, 右左折, その場旋回, 横や斜め等全方向への平行移動
荷揚げ機構	5 段伸縮梯子構造, 荷揚力 1470 [N] (150 [kgf])
マニピュレータ	7 軸多関節, 先端取扱質量 20 [kg], 繰返し位置精度 0.5 [mm]
アクセス高さ	8 [m]
先端ツール	バルブ開閉ツール
操作方式	ノートパソコン+ゲームコントローラによる無線操作
動力源	電気自動車用リチウムイオンバッテリー, 稼働時間 5 時間以上
安全装備	アウトリガー荷重監視による転倒防止インターロック
その他	モジュール構造を採用, モジュールの交換・追加・削除でカスタマイズが容易

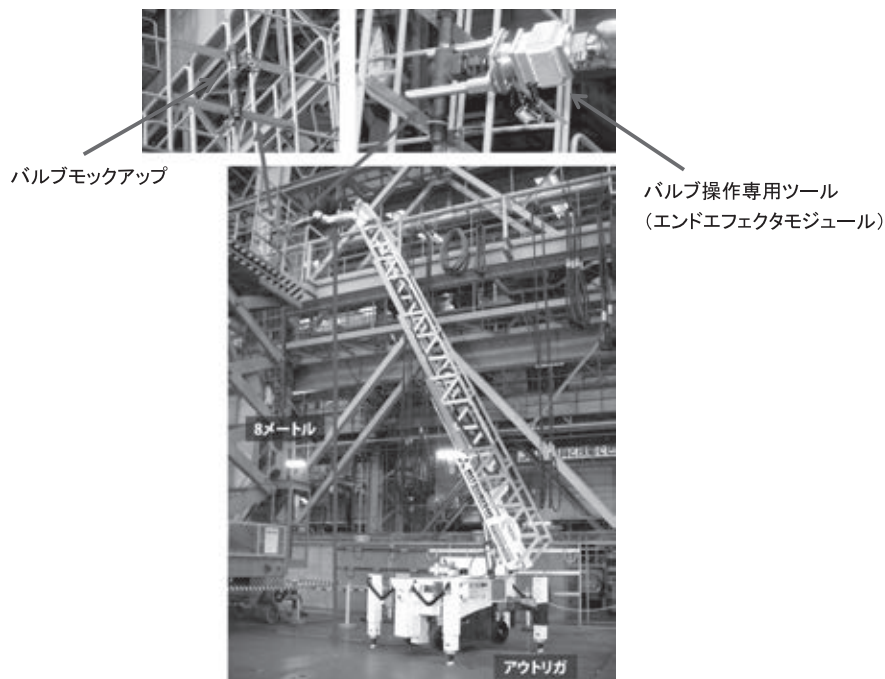


写真-2 高所でのバルブ操作

の狭い環境でも周囲との干渉無く走行しやすい高機動性を重視し、縦列駐車や真横移動、超信地旋回（その場旋回）が容易な 4 輪駆動 4 輪操舵方式を採用した。ロボットの主要仕様を表-1 に、高所バルブ操作の様子を写真-2 に示す。

3. ロボットの要求機能と開発コンセプト

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毎に様々で、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予め適切に予測し、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事も、時間的・コスト的に難しい。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。

NEDO プロジェクトでの開発要求機能は、遠隔操縦により連続 5 時間稼働し、建屋内の移動と、天井近くにあるバルブをマニピュレータ等で操作できることという、ある程度具体的なものであった。我々はこの要求機能に加えて、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等)へも容易に転用できる機能を実現すべく、モジュール設計思想を取り入れた開発コンセプトとした。

4. モジュール設計

モジュール設計では、ロボットは機能性能毎に分割したモジュール単位で開発され、複数のモジュールを組み合わせることでロボット全体が構成される。本移動ロボットは、台車モジュール(移動機構)、荷揚げモジュール(伸縮梯子機構)、搭載モジュール(マニピュレータ部)、エンドエフェクタモジュール(先端工具)の

4つのモジュール構成とした。各モジュールの信号及び動力は共通のインターフェースで接続され、将来必要に応じて、このインターフェースを踏襲したモジュールを開発することで、モジュールの追加・削除・交換が可能である。これを実現させるためには、モジュール単体でも機能する必要がある、各モジュールにコントローラを配置したシステム設計となっている(図-1)。

(1) 各モジュールの開発例(台車モジュールの仕様決定)

本移動ロボットのモジュール開発例として、台車モ

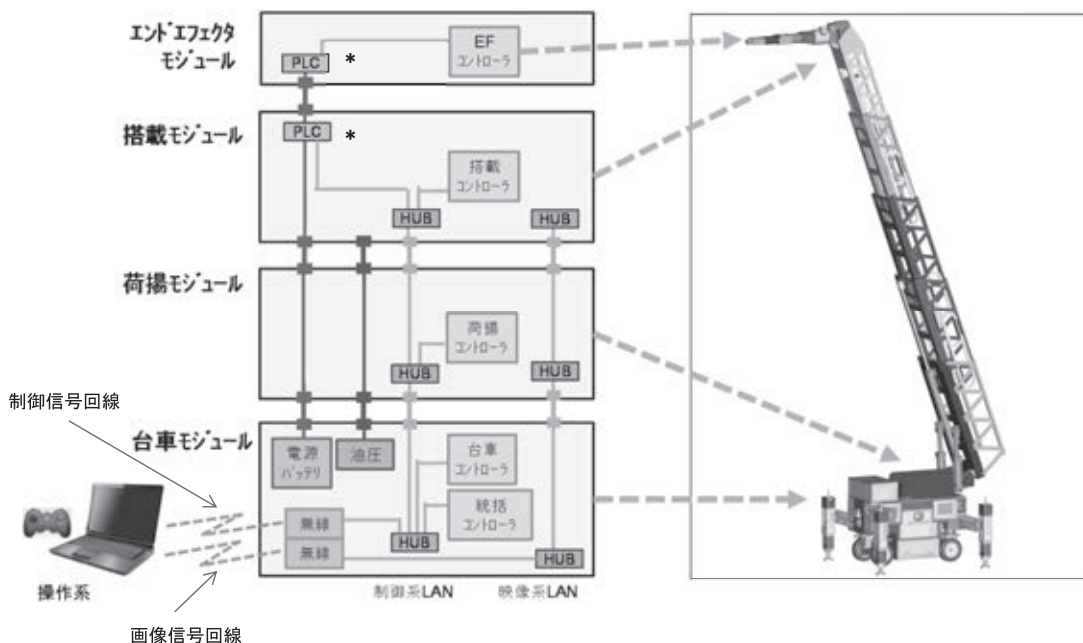


図-1 モジュールシステム概要

モジュール候補 検討項目	モジュール候補			
	4輪操舵	2輪操舵	4クローラ	2クローラ
走行可能通路幅1.2[m]以上。	○ 幅800mmで設計			
8m高所での搭載モジュール及びエンドエフェクタモジュール作業を支持。	○ 作業時はアウトリガーを用いて支持			
縦列駐車が容易、全方向への移動可能	○	×	×	×
走行速度6[km/h]以上。	○ 6[km/h]以上で設計			
超信地旋回可能。	○	×	△ 抵抗が大きい	△ 抵抗が大きい
登坂可能傾斜度15[°]以上。	○ 15[°]以上で設計			
乗越え可能段差50[mm]以上。階段昇降、踊り場での旋回は考慮不要。	○	○	◎ 階段昇降可能	◎ 階段昇降可能
開発仕様	○			

図-2 台車モジュール トレードオフ

ジュールの仕様トレードオフ (図-2) を紹介する。NEDO の要求機能やロボット移動に関するニーズからロボット設計に反映すべき項目を抽出し、候補となる台車モジュール構造のそれぞれについて評価・検討した結果、NEDO プロジェクトで開発するロボットの台車モジュールには、評価ポイントが最も高い4輪操舵方式を採用することとした。

(2) モジュール設計による利点

モジュール設計によりロボットを開発する利点を以下にまとめる。

(a) ロボットシステムとしての高い拡張性 (図-3)

必要なモジュールのみを開発し組み替えることで、災害現場で求められる様々な仕様のロボットへ、スピーディーに転用できる高い拡張性がある。各モジュールを接続する共有のインターフェースを用いることで、他社でもモジュール開発が可能となり、各社の得意分野で開発されたモジュールラインナップが揃えば、ロボットの活用が増えると期待できる。

(b) ロボットシステムとしての高い信頼性

モジュールの交換で新機能のロボットシステムを実現させる場合、新規開発したモジュール以外は開発が完了したモジュールであるため信頼性が高い。従って新機能のロボットへ転用する際は、新規モジュールの

開発及び検証試験にウエイトを置くことが可能で、少ない労力でロボットシステム全体の高い信頼性を維持できる。

(c) 短期間での開発が可能

現場でのロボット活用と、工場での新規モジュール開発を並行して進められ、モジュール完成時に組み合わせるだけで新しい仕様のロボット開発が可能である。ロボット改造に要する期間(ロボットが使えない期間)が短いことから、新規ロボットを短期間で開発できる。また、各モジュールは、機能性能毎に分割されているため、開発チームをモジュール毎に切り分けて編成しやすく、設計→開発→検証を各チームが同時進行できる。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利点もある。

5. エンドエフェクタモジュールの省配線化⁴⁾

エンドエフェクタモジュールは現状のバルブ操作以外に、検査や溶接等の様々な機能を有するラインナップの拡充を検討している。これらモジュールは機能が異なるため、搭載されるカメラやセンサ類の信号線や動力線がモジュール毎に異なる。従って、様々なモジュールが接続されるマニピュレータ側の配線は、こ

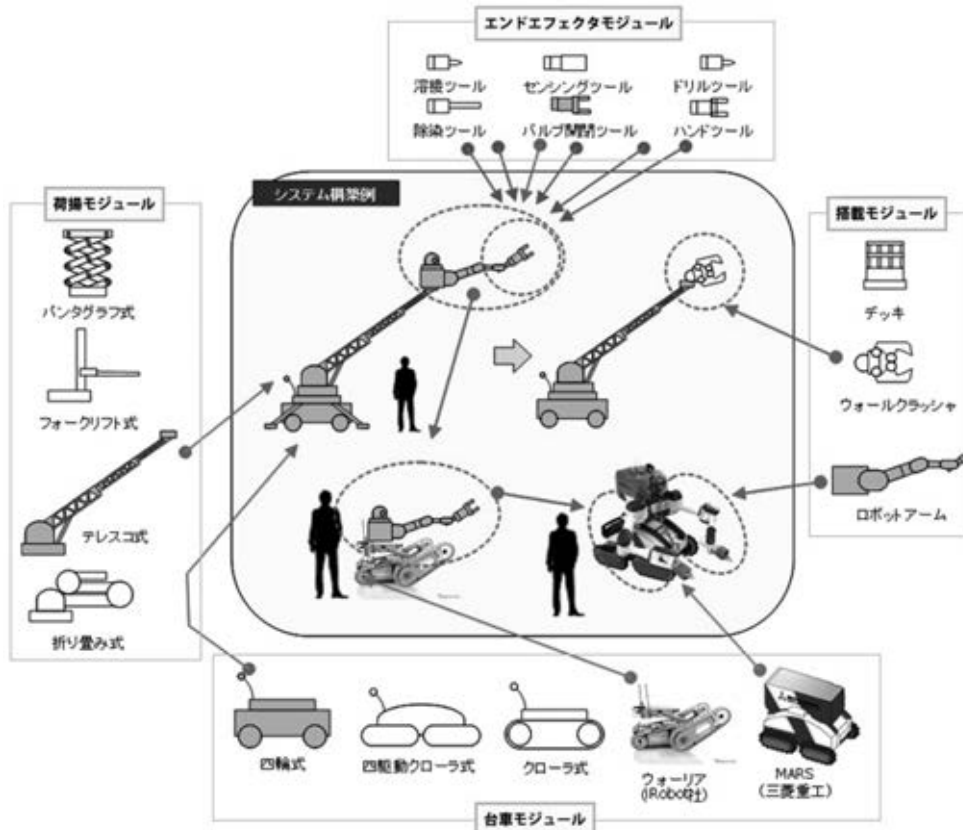


図-3 モジュール組合せによるロボットの拡張性

れらモジュールと接続できるように、多芯ケーブルを準備する必要がある。しかし、エンドエフェクタを取り扱うマニピュレータ外側部に、太く硬い多芯ケーブルを固縛する従来の方法では、多芯ケーブルがマニピュレータ動作の障害になることに加え、多芯ケーブル用のコネクタはサイズが大きい為、これを配置するマニピュレータ先端部が大型化する点が問題であった。

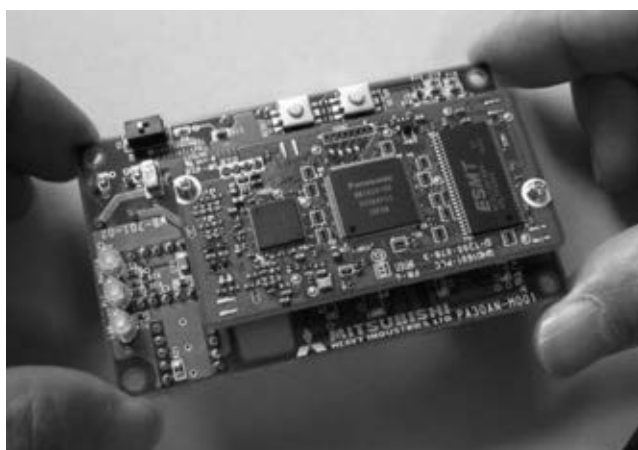
そこで、搭載モジュール先端（マニピュレータ先端）とエンドエフェクタモジュールの接続に電力線通信（Power Line Communication：PLC）技術を用いた省配線化デバイスを開発し、エンドエフェクタモジュールへの電力供給と通信を、マニピュレータ内部配線2本のみを用いて実現した（写真—3）。

開発した省配線化デバイスは、電力線2本を接続するだけで、制御信号と70Wの高容量直流電力を供給できる。電源の直流化と、耐ノイズ性を高めるフィルタに工夫をすることで開発に成功した（図—4）。

6. 操作コンソール

人がロボットを操縦する操作コンソールは、大規模な専用コックピットと、ハンディコントローラの2種類に大別できる。専用コックピットは、操作スイッチやディスプレイの配置自由度が高く、多くの情報を一度に表示できるため操作性は高いが、現場への移動・設置作業に労力がかかり機動性が低い。一方ハンディコントローラは、どこへでも手軽に持ち運べる機動力があるが、限られたボタンやレバーでの操作となる為、操作モードの切り替えが煩雑になったり、一度に表示できる情報が少なかったりと、操作性に劣る。

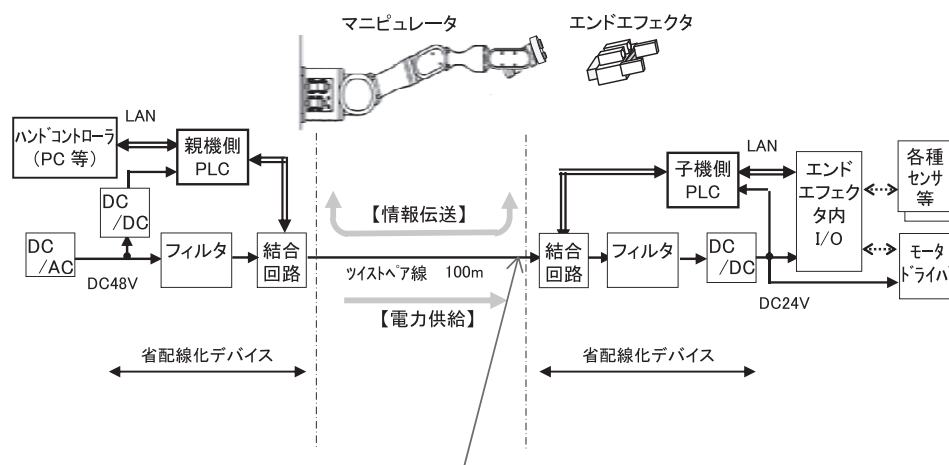
災害現場で使われる本移動ロボットは、ロボットを操縦する場所を臨機応変に素早く移動・設置できる事が重要と考え、操作コンソールはノートパソコンとゲームコントローラの構成とした。また、ロボット操作用とは別にカメラ映像表示用パソコンを準備し、多くの画面を表示させることでロボット周囲の状況を確



写真—3 省配線化デバイス



写真—4 本移動ロボット操作コンソール



2本の配線で信号と電力を供給

図—4 省配線化デバイスを用いたモジュール接続

認し易くしたり、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させたりすることで、操作性を向上させる工夫をしている(写真-4)。

7. 検証試験

開発した本移動ロボットが災害現場で使用できる性能を有していることを確認するため、工場内での最終検証試験では福島第一原子力発電所でのSBO(Station Blackout:全電源喪失)環境を模擬した暗所で行った。また、汚染環境でのロボット操作を想定し、オペレータは全面マスク、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操縦した。その様子を(写真-5)に示す。



写真-5 SBO環境での検証試験

想定した2種類の検証作業(①狭隘位置へのロボット移動、②高所に設置したバルブモックアップの操作)を完遂できたことで、災害現場に適用できる性能を有していることを確認した。

8. 福島第一原子力発電所へのロボット適用

現在福島第一原子力発電所で用いられるロボットの役割は、目視調査や計測に加えて、様々な作業が加わってきており、その一つが除染作業である。除染作業とは、放射線を出している原因物を取り除き、人が立ち入って作業ができるレベルまで放射線量を下げる作業で、具体的には汚染した瓦礫の回収や、コンクリート表面の汚染した部分を取り除く(僅かに削り取る)作業等である。さらに後者では、コンクリート表面からのくらい深くまで汚染しているかを、除染作業前に知る必要が有ることから、コンクリートからコア(直

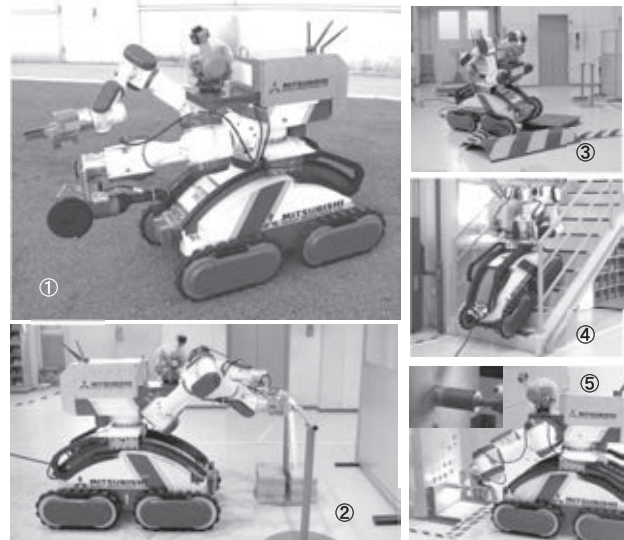


写真-6 本作業ロボット

①本作業ロボット全景、②配管切断試験、③不整地走行試験、④階段昇降試験、⑤コンクリートコアサンプリング試験



写真-7 本作業ロボット(福島第一原子力発電所内での除染作業)

径70mm、長さ70mm程度のかたまり)を削り取って持ち帰り、分析する作業も必要となる。

上記作業を行うために、不整地走行が可能な双腕ロボットの本作業ロボット(写真-6, 7)が、福島第一原子力発電所に適用されている。

本作業ロボットは本移動ロボットと同じく先端に様々な専用モジュールを装備できるマニピュレータを2本装備しており、高度な作業に対応できるロボットである。右マニピュレータにはコンクリートドリルモジュール、左マニピュレータにはコンクリートコア把持回収モジュールを装備し、ロボットを遠隔操作してコンクリートコアを採取するという非常に難易度の高いミッションを成功させている。またブラスト除染モジュールや瓦礫回収モジュールを適宜取り付けことで、これら全ての作業を1台のロボットで対応可能で

ある。

本作業ロボットは人と同様の床面や高さ1.5m程度の壁面が作業可能エリアであるが、同様のモジュール装備を本移動ロボット用に開発すれば、福島第一原子力発電所内における高所除染ニーズにも対応できる。

また目視ロボットのニーズは今後も多く、目視調査のみならず、本移動ロボット等の作業ロボットの監視や通信の中継等バックアップ用途の期待が大きい。地上走行型ロボットで唯一、福島原子力発電所の最上階であるオペレーションフロアまで階段を上り到達した“Quince”の改良ロボットである“櫻Ⅱ号”(写真-8)も、今後の活躍が期待されている。

9. おわりに

2012年度NEDOプロジェクトに参画し、8m高所でのマニピュレータ作業が可能な4輪駆動4輪操舵方式の移動台車ロボットを開発した。このロボットは、モジュール設計思想を取り入れ、必要に応じてモジュールの追加・交換・削除を行うことで、多様なニ-



写真-8 櫻Ⅱ号

ズに対応できる高い拡張性が特徴である。

福島第一原子力発電所での災害を想定したSBO環境での検証試験を実施し、オペレータによる遠隔操作で、狭隘位置へのロボット移動や高所に設置したバルブ操作を、本ロボットシステムを用いることで実現可能であることが確認でき、災害現場で適用できる目処を得た。

福島原子力発電所では、本作業ロボット MEISTeRをはじめ多くのロボットが活躍している。今後は、各種モジュールの充実や、ロボットシステムの改良を進め、福島第一原子力発電所での災害収束支援等に適用していく。

本移動ロボット Super Giraffe の開発は2012年度NEDO国プロ「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト/作業移動機構の開発」のうち「狭隘部遠隔重量物荷揚/作業台車の開発」で実施された成果である。

JCMA

《参考文献》

- 1) 三菱重工技報 Vol.51 No.1 (2014) p.34 ~ 39
- 2) 藤田 淳, 大西 献: 日本ロボット学会誌, Vol.32 No.2 (2014) p.58 ~ 60
- 3) (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)
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100045.html
- 4) 大西 献, 機械設計 日刊工業新聞社 Vol.57 No.11 (2013) p.23 ~ 29
- 5) Super Giraffe ホームページ, <http://www.mhi.co.jp/discover/pickup/giraffe>

【筆者紹介】

藤田 淳 (ふじた じゅん)
三菱重工業(株) エネルギー・環境ドメイン
原子力事業部 機器設計部
主席技師

