

氏 名	大 西 献
国 籍 ・ 本 籍	京都府
学 位 の 種 別	博士（工学）
学 位 の 番 号	乙第205号
学位授与の日付	平成28年10月21日
学位授与の要件	名城大学学位規程第 3 条第 5 項該当
学 位 論 文 題 目	原子力発電施設向け遠隔操作ロボットのシ ステム設計と開発
論文審査委員	主 査 大 道 武 生
	副 査 福 田 敏 男
	副 査 楊 剣 鳴

論 文 内 容 の 要 旨

国内には原子力発電所をはじめ、核燃料施設（六ヶ所など）や研究用原子炉（東海など）など多くの原子力発電施設が存在する。原子力はさまざまな解決すべき課題を抱えているが、原子力による電力は、現在の産業・生活にはなくてはならないものである。原子力発電施設を健全な状態で稼動するためには、定期的な保全作業（検査、補修、交換など施設の健全性維持にかかわる作業全般を指す、狭義ではメンテナンスとも称す）が必要である。

通常時の原子力発電所では、放射線環境は原子炉格納容器と呼ばれる鋼鉄製の圧力容器内に限定され（閉じ込められ）ているため、大部分の設備は、通常の火力発電所と同様の通常環境であり、人による保全作業が可能である。一方、原子炉容器や蒸気発生器、冷却材配管など原子炉格納容器内の主要機器は放射線量率が高く、人が長い時間作業をすることができなかつたり、水中や狭隘場所で人が直接アクセスできなかつたり、保全作業のロボットによる遠隔化のニーズが高い。原子力発電所の保全作業に従来用いられてきた遠隔装置を例示する

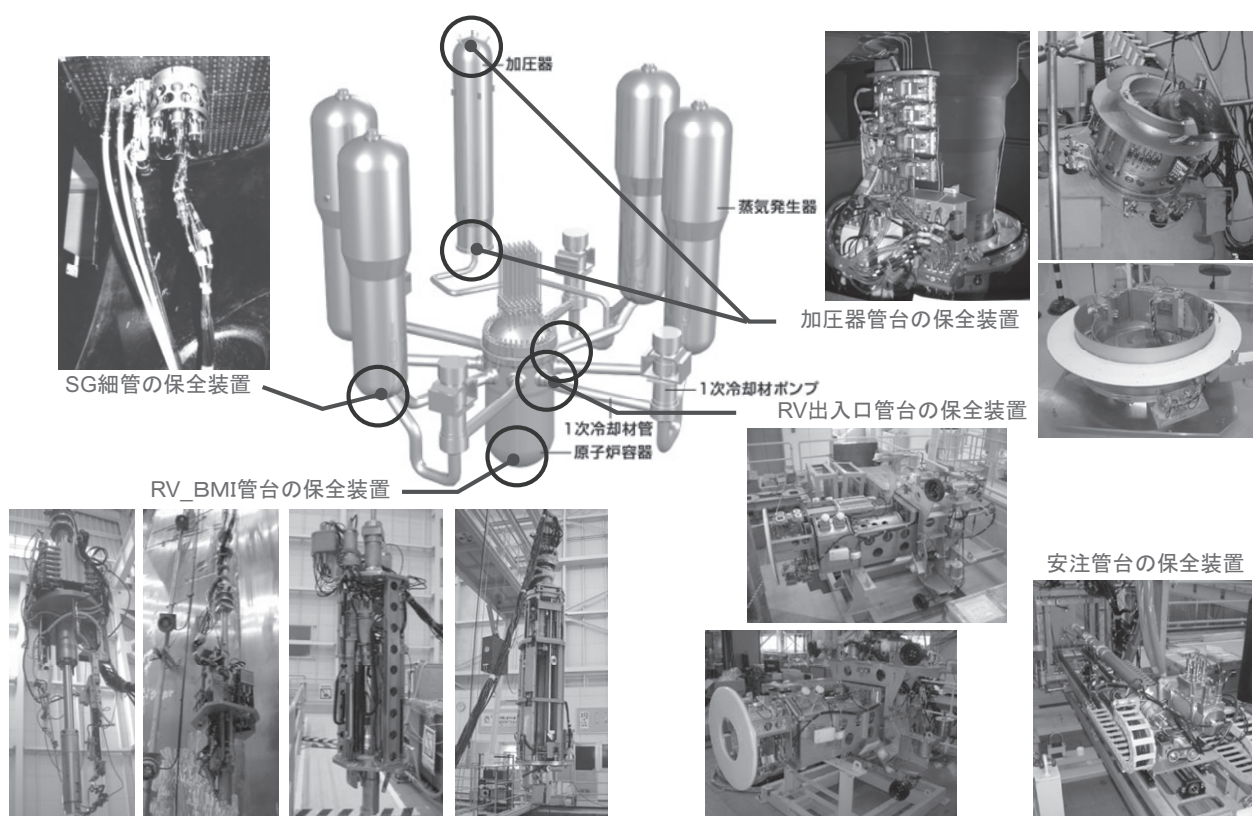


図 従来の原子力発電所保全作業用の遠隔装置例

上図に示すように、原子力発電所の保全作業は、作業の対象だけでなく、作業工法や作業が行われる環境によっても様々であり、それぞれに応じた専用の装置や工具が用いられている。しかし、その都度設計が異なるため多くの開発・設計時間と、信頼性の確保に多大な労力を要することが課題である。一方、非常時の原子力発電施設では何が起きているか分からない状況が多々発生する。目標とする作業を実現するために、どういった機能が必要か、すなわち保全装置への要求仕様を事前に1つに設定しにくいことも課題であり、対象の状況にあわせて仕様を柔軟に変更できるフレキシビリティに富んだシステムであることが重要である。

昨今、保全作業の難易度はますます上がっている。原子力発電所の稼動中の定期的な検査により新たな劣化が見つかり補修が必要となった部分、海外を含む他の原子力発電所で発見された劣化部位と同等の構造をもつ部分、原子力発電施設稼動以降の最新の工学的見地により改良が望まれる部分など、もともと定期的な保全作業が想定されていない部位は、アクセスが難しく、保全作業内容も複雑化する傾向にある。特に複雑な保全作業に適用している遠隔装置を例示する。

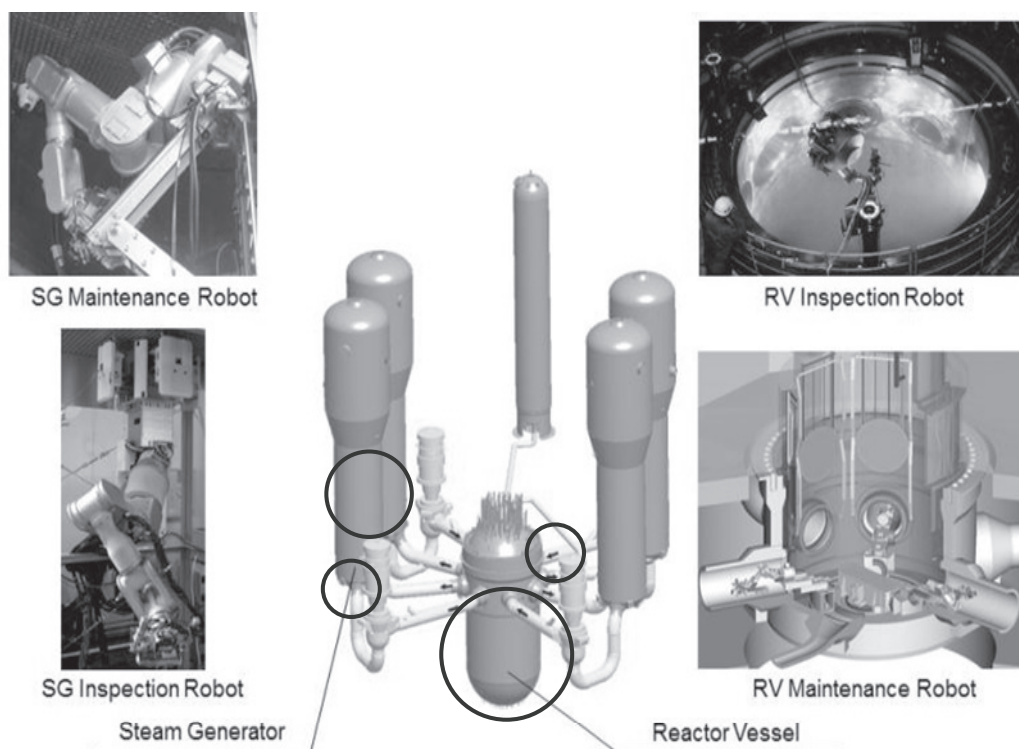


図 複雑な保全作業にマニピュレータを用いた例

これらの作業内容は、プラント機器の切削除去、溶接、切削仕上げ、検査と多岐にわたり、通常なら工場で作業するような複雑かつ繊細な保全作業を、カメラなどで周辺状況を確認しながら遠隔で実施する必要がある。よって、人と同等の器用さ、繊細さ、力強さを有し、放射線環境でも使用できるマニピュレータと、これを動かす高度な遠隔制御の実現が課題であり、非常時の原子力発電施設においては、これらの課題はさらに顕著である。

本論文では、以上の課題を解決する設計手法として、マニピュレータをコアとし、全体ロボットの仕様をフレキシブルに構築可能なモジュール型遠隔操作ロボットを発想し、福島第一原子力発電所の収束支援を目的に設計・開発した移動マニピュレータ“Super Giraffe”（右写真）を例に、モジュール型ロボットのシステム設計と、システム構築に必要な各種技術の開発について論じる。

本論文で取り扱うモジュール型システムの目的は、従来の保全装置が設計および信頼性の確保に多くの時間と労力がかかってしまっている現状の課題を解決することであるため、いわゆる“モジュラーロボット”ほど自由な再構成を期待しないかわりに、モジュール毎に独立並行して、単体性能レベルだけでなく、作業レベルでも機能試験による信頼性確保を行えるより“大きな”モジュール構成を選択した。最終第6章で論じるモジュール設計ロボットの概念を下図に示す。



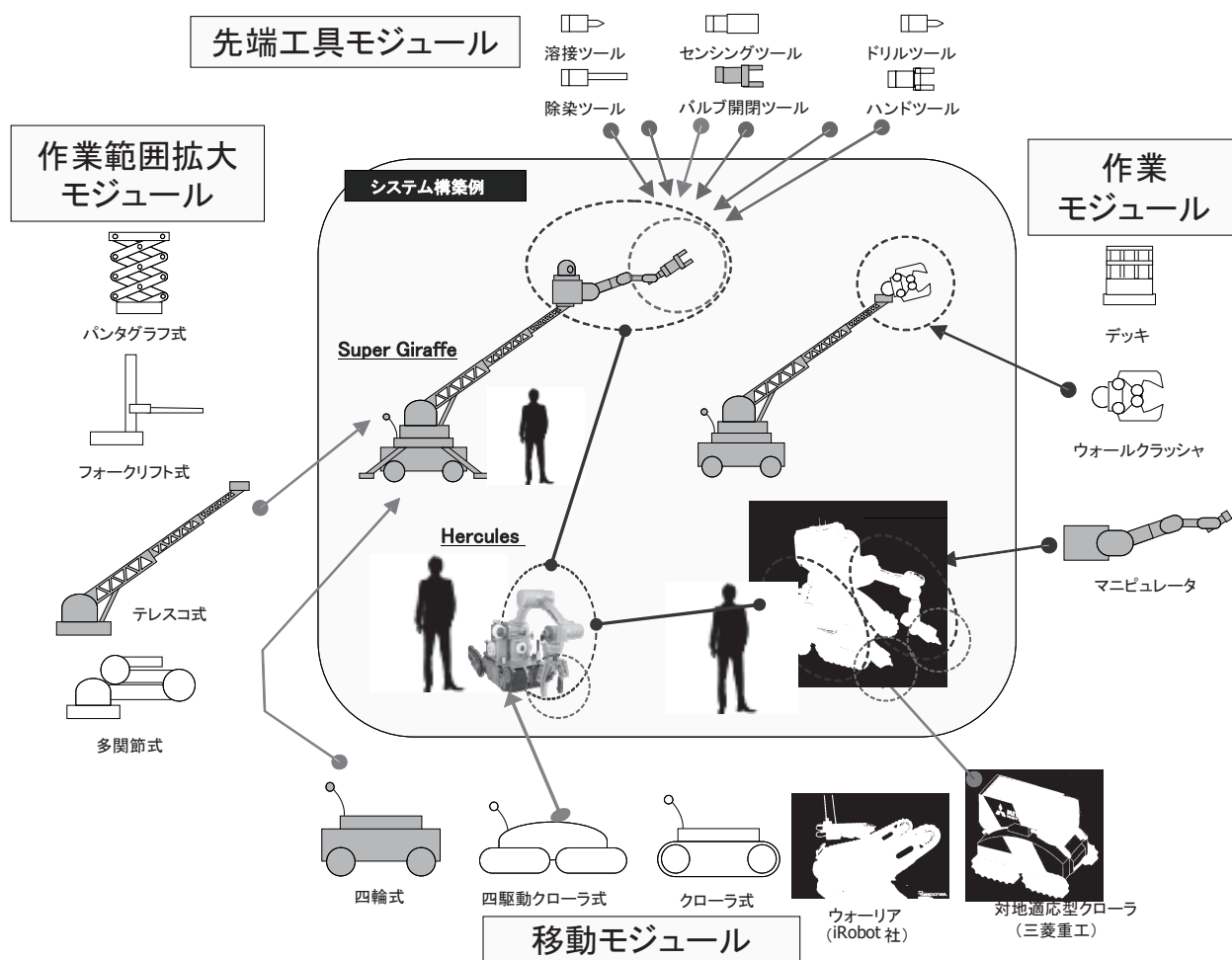


図 本論文で論じるモジュール設計ロボット

システムは、マニピュレータ、先端工具、作業範囲拡大、移動の4つのモジュールで構成し、“Super Giraffe”だけでなく、これらのモジュールの異なる組み合わせにより“MEISTeR”や“Hercules”など他ロボットも、従来の非モジュール型装置に比べて短期間で信頼性確保し、実工事に供することができた。

本論文では、マニピュレータシステムをモジュール型装置のコアモジュールと位置づけ、マニピュレータシステムに様々な種類の先端工具システムを組み合わせることで作業を行うことを基本コンセプトとする。さらに、コアモジュールとなるマニピュレータそのものも、作業に応じて機能を設計変更可能とすることで、多様な遠隔作業を実現する以下の設計法を展開する。

まず、第2章（極限作業ロボットマニピュレータの取り組み）において、

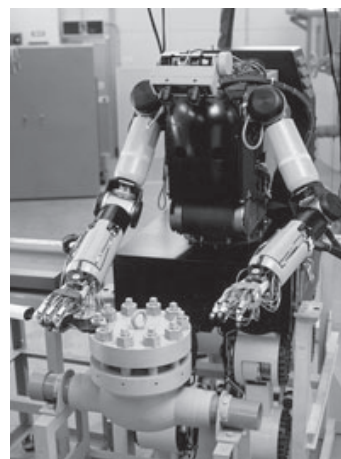
- ①コアモジュールとしての7自由度マニピュレータを設計開発し、冗長自由度制御を含む遠隔制御技術を実現することにより、保全作業のベースとなる汎用作業セットを準備した

次に、第3章（可搬式汎用知能アームの取り組み）において、

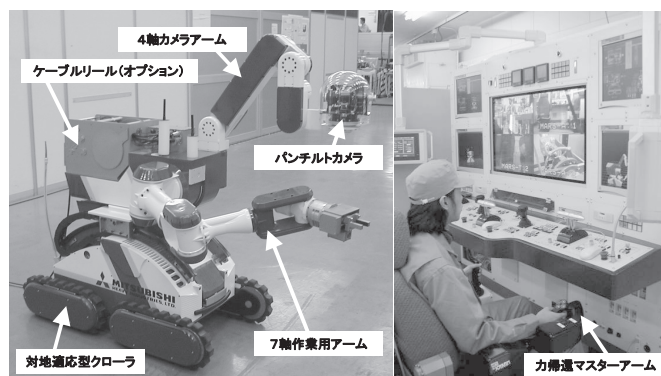
- ②マニピュレータの関節構造の設計コンセプトを統一することにより、マニピュレータの負荷の大小や、水中・放射線性など耐環境性への個別の要求仕様に対する設計対応を容易とした
- ③ビルトインモータの採用や、アクチュエータを構成するモータ、ギヤ、ブレーキおよび角度検出器などのロータ部を一体化するなどの軽量化設計により、移動ロボット等への搭載を容易とした。

- ④マニピュレータシステムを、メカ、サーボ、リアルタイム運動コントローラおよび操作・計画コントローラの4階層に分割し、分割部のインタフェースをシリアル通信技術などを利用して簡素化し公開する階層化オープンシステムの導入により、運用にあわせたマニピュレータの階層ごとの機能アップや、最新技術の導入を容易とした

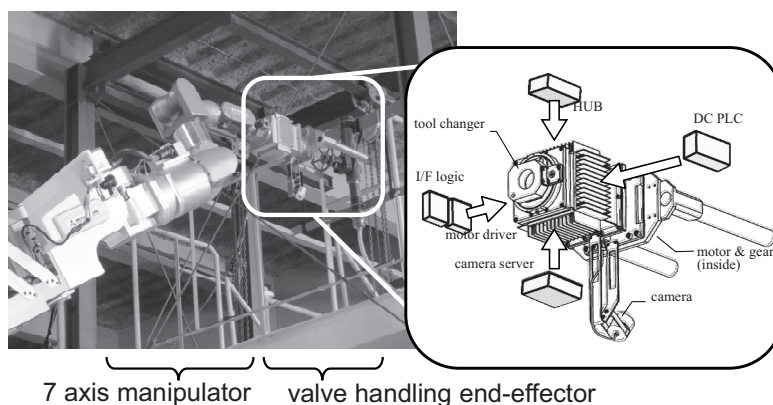
- ⑤先端工具モジュールのマニピュレータモジュールシステムへの組み込み方法を多様化し、作業にあわせた先端工具モジュールの交換を容易とした。



第4章（原子力防災支援システム“Mars”の取り組み）において、上記②の統一設計および③の軽量化を適用して実現した移動マニピュレータの設計法を論じ、「非常脱出機能アップ」「メンテナンス時の被ばく低減・電源や無線などのバリエーションやシステムのロバスト性向上」「完成度や経験値の蓄積」などの課題を抽出した。



第5章（直流 PLC(Power Line Communication 電力線通信) 技術開発の取り組み）において、上記⑤の先端工具モジュールの交換容易性に関し、先端工具モジュールの外部配線がマニピュレータの作業性を損なうとの知見も加え、配線を極力減らしてマニピュレータにすべて内蔵するとともに、先



端工具モジュールとマニピュレータとの I/F を共通化して先端工具モジュールの互換性を維持するための省配線化技術を開発し、その設計法と将来の方向性を論じた。

本論文のまとめとなる最終第 6 章において、“Super Giraffe” を例にモジュール設計法を具体的に論じ、上記④で得られたオープンシステム設計法をシステム全体に拡張することによって、モジュールの独立性と連携性が維持され、結果として上述の課題が解決されることを示した。さらに、福島原子力発電所の収束支援へのロボット技術者の参画を阻む見えないバリアの技術的中身が、「福島の特異さ」だけでなく、「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」であることを明らかにし、設計技術によってバリアを解決するアイデアを提示した。

本論文で提案したシステム設計手法は、原子力発電施設向けロボットとしては一定の成果をあげつつあるが、今後これらによる効果を定量化し、体系的・学問的に一般化することにより、より多くの産業分野へ寄与できるように努力したい。

論文審査の結果の要旨

本論文は原子力発電施設の保全作業に必要とされる多種多様な作業を遠隔化するための高信頼ロボット開発を、短期間で実現する設計法と実検検証に係るものである。

第1章では、開発の背景とシステムのコンセプトを俯瞰し、設計開発方針を明確化している。

第2章では、システムのコアとなる7自由度マニピュレータで遠隔繊細作業の可能性と限界を明確にした。

第3章では、機能の階層化とオープンシステムアーキテクチャーを導入、関節構造の設計概念を統一することで、コアマニピュレータの軽量化と機能拡張を実現した。このマニピュレータは原子力以外も含め汎用ロボットとして実運用に供され、その設計の有効性が示されている。

第4章では、コアマニピュレータの耐放射線モジュールの開発と種々の移動装置モジュールへの搭載を考慮することで、原子力災害ロボットが実現できることを論じている。

第5章では、モジュールの具体的結合方式を提言し、配線処理にロボット用パワーラインコミュニケーション（PLC）を設計開発、実用に供し得る省配線化を実現した。

第6章では、提言した設計法を用いることで、福島第1原子力発電所対応ロボットが設計できること示し、多様な機能と高信頼性を要求される原子力ロボット設計として有効であると結論づけている。

以上、本論文は、原子力発電施設における遠隔操作システムに長期視野での設計コンセプトを提言し、それを実現しており、高い先進性（学会賞4件）と実用性を有する論文であるといえ、学位論文としての条件を備えていると評価できる。従って、学位を授与することを妥当なものと判断する。

