

東京電力福島第一原子力発電所向けの 高所調査用ロボットシステムの開発

Development of High-Access Survey Robot for TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

杉 浦 恒*
Hisashi SUGIURA
石 崎 隆 介*
Ryusuke ISHIZAKI

福 島 崇 文* 黒 田 貢 秀*
Takafumi FUKUSHIMA Mitsuhide KURODA
松 本 隆 志*
Takashi MATSUMOTO

要 旨

東京電力福島第一原子力発電所の原子炉建屋内において現場からの要求が高い、フロア高所における画像取得や放射線量、温湿度の計測を行う高所調査用ロボットシステムを開発した。

本ロボットシステムは遠隔操作用に改造したクローラ型の高所作業台車に11軸のアームを搭載しており、7 mの高さまで到達できる。またフロア高所で狭隘部奥にアーム先端を挿入することが可能である。現場からもたらされる情報をもとに要件を決めてメカニカルシステム、電装システムを開発し、さらに遠隔操作の負担を軽減するための操作インターフェースの開発を行った。またミッションを想定した耐久試験や現場に近い環境である浜岡原子力発電所での実証実験による機能確認を行った。

本ロボットは原子炉建屋2号機において2013年6月18日と7月23日の2回、3号機において2014年5月13日の合計3回のミッションを行い、それまでわからなかった原子炉建屋上部の放射線量計測や、原子炉格納容器付近の画像を取得した。さらに今後の様々な廃炉作業に貢献する原子炉建屋内部の形状データを取得した。

ABSTRACT

A high-access survey robot system was developed to acquire images, doses of radiation, temperature, and humidity in locations high above the floor inside the reactor building at Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, where there is a high level of on-site demand for this capability.

This robot system has a crawler-type high-place work cart modified for remote operation and is equipped with an arm having 11 joints that can reach to a height of seven meters. It is also able to insert the arm tip deep into narrow spaces at locations high above the floor. The mechanical and electrical systems were developed according to requirements formulated using information brought from the site. An operating interface was also developed to reduce the burden of remote operation. Functionality assessments were carried out by endurance testing with a mock-up as well as by proving tests conducted in a reactor building at Hamaoka Nuclear Power Station, a physical environment that closely resembles the one in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.

This robot performed missions twice in Unit 2 Reactor Building, on June 18 and July 23, 2013, and once in Unit 3 Reactor Building, on May 13, 2014, for a total of three missions. It acquired doses of radiation, which had not been available before then, from the upper areas inside the reactor building, as well as images from the vicinity of the primary containment vessel. It also acquired data on the geometry inside the reactor building that will contribute to various upcoming tasks involved in decommissioning of the reactor.

1. ま え が き

2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所(以降1Fと呼ぶ)の事故以来、株式会社本田技術研究所(以後、Hondaと記述する)には現場へのロボット投入の期待の声が多く寄せられた。また社内にお

*基礎技術研究センター

いても何とか現在の状況の改善に貢献できないかとの強い思いがあった。

このような背景から同年6月より独立行政法人産業技術総合研究所(産総研)と東京電力株式会社(東電)との三者で現場におけるロボット技術の適用先の調査を始めた。

当時は、まだ原子炉建屋内部の状況がほとんど判明して

いなかったため、まず内部の状況調査が必要であった。最も初期に内部の調査を行ったのは全長が1 m前後の小型ロボットである。例えば Packbot⁽¹⁾は原子炉建屋1階の調査や他のロボットの先導を行った。Quince⁽²⁾は階段を登って2階や3階、その上のオペレーティングフロアの調査を行った。Survey Runner⁽³⁾は地下階の調査を行った。その結果、原子炉建屋の床面から1-1.5 m程度の高さの様子や放射線量がわかった。

しかしこれらの小型ロボットでは、原子炉建屋の雰囲気線量の寄与割合が高いと推定されている1階の天井付近(フロア高所)の調査は困難である。原子炉建屋内のフロア高所には配管やダクト、ケーブルラック等が複雑に配置されており、調査をより困難にしている。

そこで我々は、高さ7 mまで到達することができ、また狭隘部奥へアプローチし、線量、温湿度計測や画像を取得できる高所調査用ロボットを開発した。Fig. 1に高所調査用ロボットを示す。左が移動姿勢、右が高所を調査する場合の調査姿勢である。

本ロボットは高所作業台車と調査用アームから構成され、それぞれ産総研と Honda が開発を担当した。

以下、本論文では高所調査用ロボットのうち Honda が開発した調査用アームを中心に、1Fの現場に直接立ち入ることができない状況の中で、どのようにして現場からもたらされる情報をもとに要件を決め、原子炉建屋で確実に動作するロボットを開発し、実際のミッションにおいて使われたかについて述べる。



Fig. 1 High-Aaccess Survey Robot
The driving posture (left) and higher posture (right)

2. 現場の状況

2.1. 調査場所

1Fには1-6号機の原子炉があり、このうち被害を免れた5、6号機を除く1-4号機の原子炉建屋内部の調査が事故以来進められている。この調査は今後の廃炉作業の計画立案や効率的な推進に極めて重要である。これらの原子炉建屋の1階が本ロボットの調査予定場所である。

1Fと同型の沸騰水型 (Boiling-Water Reactor: BWR) の原子炉建屋の断面図および上面図をそれぞれ Fig. 2 と Fig. 3 に示す。中央に原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel: PCV) があり、その周辺にはさまざまな設備が取り付けられている。本ロボットは1階の特に Fig. 3 に示す移動式炉心内計測装置 (Traversing Incore Probe: TIP) 室上部、パーソナルエアロック室 (Personal Access Lock Room) 上部、キャットウォークのPCV付近の調査を行う。いずれの場所も狭い上にパイプが何本も設置されており、アクセスが困難な場所である。

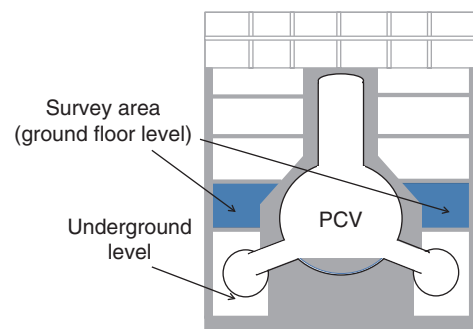


Fig. 2 Cross-section view of BWR reactor building

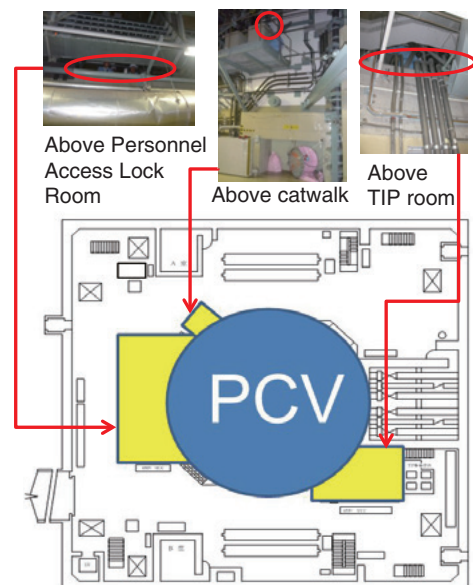


Fig. 3 Top view of BWR reactor building of ground floor
The survey target areas are filled with yellow. (Images provided by Chubu Electric Power Co., Inc.)

2.2. 現場のロボットへの要望と状況

2.2.1. ロボットへの要望

現場で求められるロボットは以下の通りであった。

- (1) 高所狭隘部において、放射線量、温湿度、画像の取得ができること。
- (2) できるだけ早く投入できること。
- (3) 一度のミッションでできるだけ多くの調査を行えること。
- (4) 操作性が高いこと。
- (5) 防護服や手袋を重ねて装着しても操作できること。
- (6) 小雨が降っていてもミッションを実施できること。
- (7) 原子炉建屋内から確実に帰還すること。
- (8) 原子炉建屋内の施設を破損しないこと。
- (9) ロボットの耐用回数は最低 16 ミッションであること。

2.2.2. 現場の状況

またロボットが移動を開始する原子炉建屋前および建屋内の状況は以下の通りである。

- (1) 原子炉建屋前および建屋内は放射線量が高い場所が存在し、人が長時間とどまることができない。
- (2) 原子炉建屋前は、養生鉄板による段差や、砂利などによる凸凹がある。
- (3) 原子炉建屋内は、場所によっては施設が損傷を受けていることもあり、現場の状況を反映した正確な図面がない。
- (4) 原子炉建屋内では水滴の落下や水溜りがある。
- (5) 原子炉建屋内の通路上部には仮設の配管や作業用ステージ、ダクトが Fig. 4 の赤矢印で示す 2 m 程度の高さに設置されており通路脇の床にも作業用の機材などが置かれている。
- (6) 調査場所はフロア高所にあり、かつ配管等の障害物のために狭く入り組んでおり調査が特に困難である。
- (7) 原子炉建屋内には放射性物質が浮遊している。

これらの現場の要望および状況をメカニカルシステム、電装、操作用インタフェースの各領域で要件にして、ロボットシステムの設計、開発を行った。



Fig. 4 Inside reactor building (Image provided by TEPCO)

Table 1 Specification of high-access survey robot

Entire robot	Length	1.8 m
	Width	0.8 m
	Minimum height	1.8 m (when driving)
	Maximum height	7.0 m
	Weight	1.1 t
	Operating time	5 hours
High place work cart	Maximum velocity	2 km/h
	Maximum incline	15 degrees (back and forth) 20 degrees (right and left)
	Maximum bumping height	60 mm
Survey arm robot	Length	1.7 m
	DOF	11 (except parallel link)

3. 高所調査用ロボット

3.1. システム概要

本ロボットは遠隔操作できるよう改造した高所作業台車に 11 自由度の調査用アームが取り付けられたものである。

Table 1 に主要スペックを示す。

これらのスペックは 2.2.2. 項の現場の通路の状況から長さ、幅、高さを決定した。

次にロボットに搭載したセンサを Fig. 5 に示す。データ取得用として手先にはカメラ、線量計、温湿度計などが、狭隘部通過のために、台車に取り付けられた台車周囲を映すカメラや、台車上部の障害物を確認するカメラ、台車および手先に取り付けられた Laser Range Finder (LRF) などを搭載している。

3.2. 運用方法

ロボットは Fig. 6 に示すように、免震重要棟 (Important anti-seismic building) の遠隔操作装置 (Operation PC) から有線 LAN を通じて操作される。

LAN は原子炉建屋前のスイッチングハブまで引かれている。ロボットは保管場所 (Robot warehouse) からトラックによって原子炉建屋 (Reactor building) 前まで運ばれ、

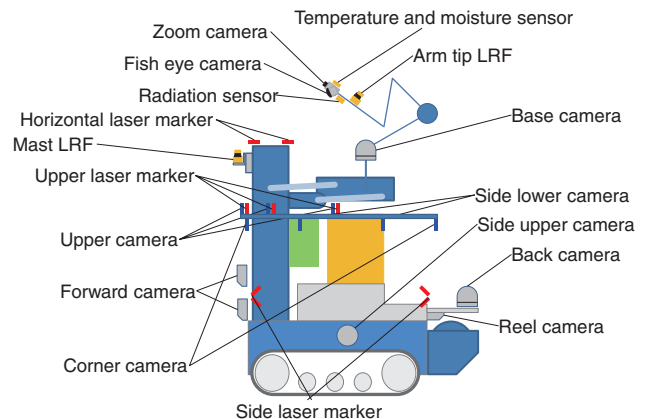


Fig. 5 Robot sensors

スイッチングハブにロボットに搭載された有線の光ケーブルが接続される。そこから原子炉建屋の調査場所への往復および調査は遠隔操作装置によって行われる。調査が終わり、ロボットが原子炉建屋外に出ると、LANから切り離され、再びトラックにて保管場所に運ばれる。なお緊急の場合を除き、通信は全て有線接続で行われる。これは無線の通信切断リスクを避けて確実に帰還するためである。

調査場所においては、ロボットはマスト (Mast) を上昇させ、調査用アームを動かして調査箇所のデータを取得する。データはリアルタイムで遠隔操作装置に送られる。

作業時間は5時間以内を想定している。

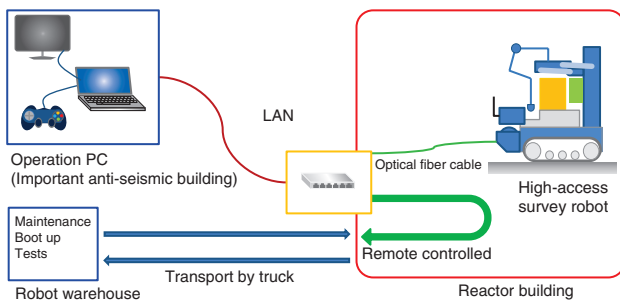


Fig. 6 Use case of robot

4. 高所作業台車

できるだけ早く投入することを目指して、市販の高所作業車をベースに開発した。高所作業台車は元々低重心であるがさらに下部の重量を増し、台車の幅が狭くても十分な安定性を確保している。最大走行速度は2 km/h、最大踏破段差60 mmである。また、前後に各2台、台車周囲下向きに8台、左右側面上向きに2台のカメラを搭載し、車幅を示すレーザマーカ、LEDライトを使用し、照明のない建屋内の狭隘通路の走行を可能としている。

通信に使用する光ケーブルをリールから送り出すことで400 mの距離まで移動可能である。さらに移動中に光ケーブルに余長が生じてしまうと、ケーブル自身が絡みつくことや、ロボット本体や環境に引っかかりによる断線が発生する。これを避けるため、その張力を維持する制御を行っている。

5. 調査用アーム

小型で信頼性の高いアームシステムを短期間で開発するため、開発に当たってはこれまでに実績のあるASIMO⁽⁴⁾の技術を最大限に活用した。

5.1. メカニカルシステム

2.2.1. 項, 2.2.2. 項からメカニカルシステムに求められ

る主要要件は、以下の通りである。

要件1. 移動時に上部障害物に干渉しないこと。

要件2. マスト昇降時に高所障害物に干渉せず、調査対象の近くにアームを接近できること。

要件3. 狭隘部の奥までアーム先端を挿入できること。

要件4. 屋外移動時の降雨や建屋内で落下する水滴によって、壊れないこと。

要件5. 付着した放射性物質を除染可能なこと。

要件6. 長時間稼働が可能なこと。

以上の要件を元に開発を行った。

具体的には、それぞれ要件1, 2を満たすためにアーム移動機構 (Arm transfer mechanism)、要件3を満たすために多関節アーム、要件4, 5については防塵、防滴機能を開発した。

要件6を満たすためには、ASIMO開発で培ったフレーム構造と構成、モータと減速機の技術を活用し、消費電力低減を実現した。

アーム移動機構、多関節アーム、防塵、防滴機能について、詳細を次節より解説する。

5.1.1. アーム移動機構

要件1から本ロボットは移動時に全高を抑える必要があるが、ベースとなった高所作業車は全高が1.73 mもあるためアームをマスト上部に配置すると、全高が2 mを超え上部障害物に干渉する。したがって台車移動時はマスト周囲にアームを配置するのが望ましい。一方、調査時は要件2からマスト昇降時の水平投影面積 (Lift up area) を抑え、調査対象にアームを近づける必要があり、マスト上部にアームを配置するのが望ましい。

そこで、平行四辺形リンク機構 (Parallelogram link mechanism) を利用したアーム移動機構を設計した。Fig. 7に示すように台車移動時は、アームを下ろし、たたむことで全高を低くし、マスト昇降時にはアームをマストの上部に移動することにより、水平投影面積を小さくし、調査対象の近くに接近できる。

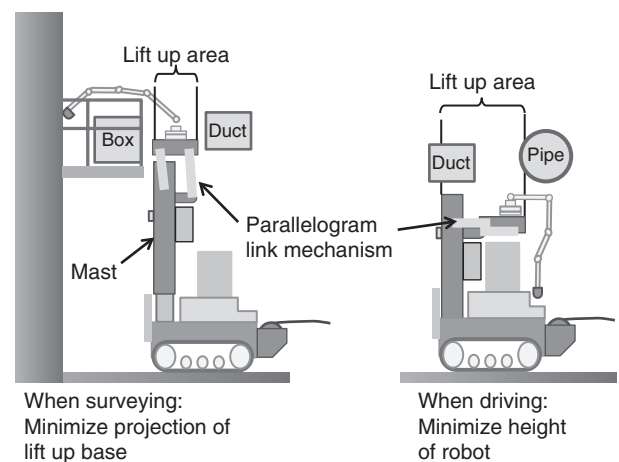


Fig. 7 Arm transfer mechanism

これにより、移動時は全高 1.8 m というコンパクトさを保ちつつ、調査時は 0.7 m 角の上部狭隘空間を通り抜けて、高さ 7.0 m までの到達が可能となった。

5.1.2. 多関節アーム

要件 3 から、障害物を避けながら調査対象に接近するためには多関節のアームが必要となる。一般的な冗長性を持った多関節アームは、手先の位置姿勢を決めるための基本 6 軸に冗長自由度として 1 軸を加えた 7 軸が多い。本アームは、狭隘部の奥まで障害物を回避してアーム先端を挿入するため、冗長自由度としてさらに 3 軸を加え、さらに手先に搭載したセンサやカメラの姿勢変更用として手先に 1 軸加えた合計 11 軸の多関節アームとした。

ロボットの軸構成 (Fig. 8) については、アーム制御の演算時間を短縮するために、根元 (Base) と肩 (Shoulder)、手首 (Wrist) をそれぞれ直交 3 軸とした。特に、肩部分に関しては、Z 軸の可動角を大きく取れることと直交 3 軸の成立性を考慮した結果、軸順を根元から Z、Y、X とした。

障害物を避け、調査対象に接近し確認するために、手先に挿入先と手先周りの状況や障害物を確認する LRF、手先方向を見るズームカメラと手先周りを見る魚眼カメラ、放射線量を計測する線量計、温湿度計および接触検知用に 6 軸力覚センサ (6 Axis Force Sensor: 6AF) を手首部と根元部に搭載している。また、根元部に、姿勢検出用に慣性センサ、昇降時と挿入時の周囲確認用に 2 台のドームカメラを搭載している。

また、2.2.1. 項の (8) より駆動系への電力切断時に施設を破壊しないように、根元 2 軸、肩 1 軸、肘 1 軸とアーム移動機構にブレーキを搭載し、姿勢を保持できるようにした。詳細については、5.3.2. 項で述べる。

5.1.3. 防塵、防滴機能

要件 4 より防滴機能が、要件 5 より除染容易な形状もしくは防塵機能が必要となる。

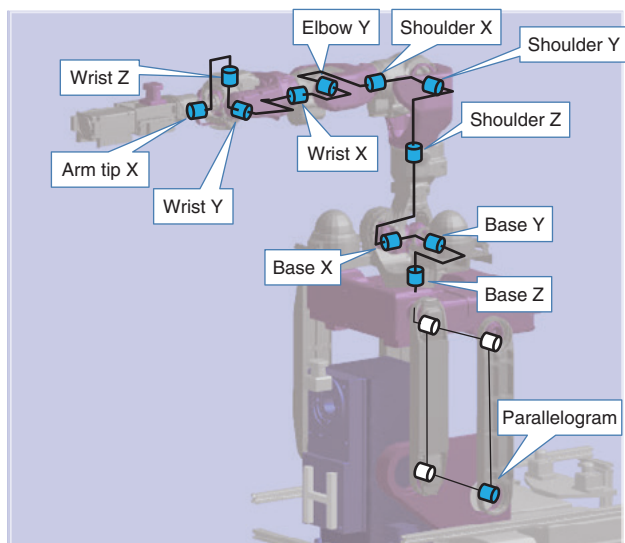


Fig. 8 Joint configuration of arm

多関節アームに対しては、全方向から水の侵入があり得ること、構成部品が多く複雑な形状により防滴とふき取りによる除染が難しいことから、Fig. 9 のようにアーム全体を覆うカバーを開発した。開発にあたっては、耐水圧 20,000 mmH₂O の防水フィルムを圧着した生地を使用し、さらに次のことを考慮した。

(1) 容易に交換できること 放射性物質が多量に付着した場合、カバーを交換することで除染を行う。その際の作業員の被ばく量を抑えるため短時間で交換できる必要がある。このためにカバーの引っかかりや損傷を避けるために、ロボットアームの角部に丸みを付けたり、樹脂カバーを取り付けることで、滑らかな形状とした。

(2) アームの動作を阻害しないこと 関節が多く、可動範囲が広い本アームにおいて、アーム形状に沿ったタイトなカバーは、伸びやねじりで発生する負荷が 6AF や駆動系にかかる。一方、ルーズなカバーでは、関節への噛み込みや、環境に引っ掛かりが発生することがある。いずれの場合においても、アーム動作へ影響を与えてしまうことや、カバー自身が損傷する恐れがある。そこで、試作とテストを繰り返した結果、防水生地に 130% の伸縮性を持たせ、Fig. 9 の赤矢印部分の 4 箇所ではカバーを固定することで、アームの動作を阻害しないカバーを実現した。

上記 (1) については、操作訓練の中で作業員が短時間で実施できることを確認した。上記 (2) の結果は 7 章の信頼性試験で述べる。

次に防滴構造について述べる。センサ、バッテリー、スイッチ、充電コネクタ等の電装部品とアーム移動機構に対しては、除染が容易な形状で覆うことで防滴機能を実現した。防滴構造については、例えば、バッテリー収納部は、上部からの水の侵入があり、かつ通気と通線が必要なのでラビリンス構造や排水構造を用いて防滴機能を実現した。

さらに屋外トラック輸送時の降雨対策として、ロボット全体を覆う防水カバーを用意した。



Fig. 9 Cover for arm
Four arrows indicate holding points

5.2. 電装システム

現場への早期投入の要請に応えるため、短期間での開発が必要であった。したがって電装システムにおいても ASIMO で使用実績のある信頼性の高いハードウェア、ファームウェアをベースに、11 軸の多関節アーム及びアーム移動機構を制御可能なシステムを構築し、その上で外界認識のためのセンサシステム、長時間稼働のための電源システム、基板の防塵、防滴性といった新規機能を開発した。

5.2.1. 制御システム

狭隘部にアームを挿入させる際に、誤操作等でアームが建屋内の施設と干渉し破損しないよう、環境との接触を許容するコンプライアンス制御が必要不可欠である。そのためにはリアルタイムでアームにかかる力や関節角度を取得し、関節を駆動する必要がある。よって、ASIMO で開発した分散制御システムを適用し、リアルタイムでアームの手首部と根元部にある 6AF、慣性センサ、関節のエンコーダのデータに元に、各モータドライバへ制御指令を送信した。

5.2.2. センサシステム

5.1.2. 項で示しているように、本ロボットは高所狭隘部にてさまざまな環境データを取得するために、多数の外界センサを有しており、そのセンサデータをリアルタイムで遠隔操作装置に送る必要がある。さらに、さらなる現場ニーズに応えるため、新たなセンサを追加できることが望ましい。よって、ハブによって拡張可能な USB や LAN インタフェイスを有するセンサを選定した。

また、線量計の選定では以下のような特別な条件があった。

- (1) 現場での実績のある線量計を使用すること。
- (2) リアルタイムでデータが取得できること。
- (3) 放射線源推定のための指向性を持たせることが可能であること。

上記 (1)、(2) を満たす線量計はデータ送信に赤外線を使用する。しかし手先に配置した赤外線受光部は LRF 等光学機器の影響を受けやすいため、遮蔽を施した。

一方、上記 (3) を満たすため、通常は線量計を遮蔽せず空間線量を測定可能とし、放射線源推定が必要な場合には計測面以外の 5 面を遮蔽可能な鉛製カバーを取り付けることで指向性を持たせた。これに加えて手先の姿勢を変化させることで放射線源の推定を可能とした。

5.2.3. 電源システム

3.2. 節より本ロボットは 5 時間稼働する必要があるため、ASIMO で開発したバッテリーを複数搭載した。

また、ミッション終了後のバッテリー充電において、作業員の被ばく量を低減するために、複数のバッテリーをオンボード充電できるシステムを新たに開発した。

本システムは過充電保護のため、定電圧定電流方式を

用いており、満充電近傍の定電圧充電領域では単位時間当たりの充電量が少なくなる。ところが次のミッションまでに十分な時間がない場合、効率の良い充電が求められる。よって、各バッテリーを個別に満充電にするのではなく、全バッテリーを充電効率の良い定電流領域で早期に充電できるように、充電するバッテリーを一定時間ごとに切り替えることとした。

5.2.4. 基板の冷却及び防塵、防滴設計

屋外や漏水の可能性のある建屋内での稼働において、電装品の防滴性を確保する必要がある。一方システム全体で数百ワットもの発熱があるため、防滴性と冷却性能を両立させる必要がある。その際、下記の制約が存在する。

- (1) 外気への放熱及びケーブルのレイアウト性から、電装品はアームリンク各所へ分散配置することが望ましいが、本ロボットは 5.1.3. 項に示す防滴カバーで覆われているため、アーム部から外気への放熱は困難であること。
- (2) 外気による冷却を用いると、放射性物質を内部に取り込んでしまい、ふき取り等による除染が困難であるため、外気を基板に吹き付けるような冷却はできないこと。
- (3) アームの動作を妨げず、マスト昇降時の水平投影面積が小さくなるようなサイズであること。

上記 (1)-(3) を満たすために、基板 (Printed Circuit Board: PCB) を集中配置でき、マスト後面に配置可能なサイズ 200 × 280 × 300 mm の小型筐体を開発した。Fig. 10 に示すように筐体は中空状で、基板を格納する筐体内部から隔離された中空部にヒートシンクを配置した。熱シミュレーションを用いて、筐体内部の熱量をヒートシンクに移動させ、各基板のデバイス温度が定格範囲内になるような基板レイアウトを行い、外部に取り付けたファンでヒートシンクを冷却する構造にした。

5.3. 高信頼性設計

2.2.1. 項より本ロボットは特に下記が要求される。

- (1) 原子炉建屋内の施設を破損してはならない。
 - (2) スタックせずに確実に帰還しなくてはならない。
- 上記 (1) に関しては、調査用アームが狭隘部に挿入されている状態でアームを制御するハードウェアに異常が発生し

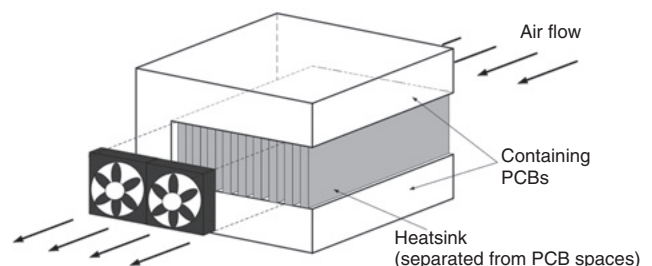


Fig. 10 Enclosure for electric devices

た場合、ASIMO で用いているフェイルセーフにより、異常内容に応じてアームが動かないように姿勢を保持することや、駆動電源を遮断する処理がはたらくことで、施設や自身の破損を防ぐ。

(2)に関しては、ロボットが万が一スタックしてしまった場合、原子炉建屋内は線量が高いことから作業員による回収は困難である。また、本ロボットは比較的大型であるため、帰還できないと今後の廃炉作業の妨げとなってしまう。したがって、帰還できない状況に陥る要因を分析し、トラブルからの復帰手段や、万が一システムが復帰できない場合の緊急回避手段を複数用意し、システムに組み込むことで信頼性を高めた。以降に代表的な機能を示す。

5.3.1. 遠隔リブート機能

制御ソフトウェアのデッドロックや CPU 等のハングアップなどシステムトラブルが生じてても、帰還できるようにするため、遠隔操作装置よりアームシステムを復旧させるリブート装置を開発した。

さらに Fig. 11 に示すように、Hub1, Hub2 間はマスト内を通過する接続であり、昇降によりケーブルが断線する可能性があるため、台車コントローラ経由でリブート指令を送信できるように別系統の通信ラインを設け、リブート手段を二重系とすることで信頼性を向上させた。

5.3.2. 関節ブレーキ機能

フロア高所での調査中にアームシステムに異常が発生した場合、前項に示すようにシステムをリブートすることが考えられる。その際、アームの駆動電源も切断されるので、姿勢によってはアームの自重で関節が動いてしまい、原子炉建屋内部の施設と干渉してしまう可能性がある。よって、駆動電力が供給されない状態で自重によって大きく姿勢が変化してしまう関節に対し、無励時作動型ブレーキを搭載することで、姿勢を保持できるようにした。

また万が一、遠隔リブート機能を使用してもアームシステムが復帰できないような致命的な異常が発生した場合、アームの姿勢を保持したまま台車を操縦し帰還する必要があるが、ブレーキで関節を保持していることで建屋内の施設に引っかかってしまうことが考えられる。そのことも考

慮し、アームシステムからだけでなく、遠隔から台車システムを介して各関節のブレーキを解除できる二重系システムとした。

5.3.3. レスキューロボットとの無線通信機能

本ロボットは、光ケーブルを送り出しながら移動するため、コーナ等による屈曲を繰り返すことで光強度が減衰することや、鋭利なものにケーブルを引っかけて断線し通信不能になる可能性がある。よって、通信手段を有線と無線の二重系とし、光ケーブルによる通信不能時には、無線機を搭載したレスキューロボットを現場に向かわせ無線による通信復帰を可能とした。

無線に関しても、アームシステムと台車システム間の有線 LAN 接続が断線することや、無線機故障を考慮し、無線機をアームおよび台車部それぞれに設けた。ロボット側の無線機はアーム側と台車側で異なる Service Set Identifier (SSID) とし、レスキューロボットが SSID を切り替えることで二重系を実現した。

6. 操作用インタフェース

本ロボットは人が長時間立ち入ることができない環境で使用されるため事前の訓練が十分に行えず、また現場で想定外の状況に対応することが求められる。さらに高所の配管やダクト等で構成された狭隘部にアームを挿入するという行為は、環境に接触した場合に破壊しかねないため、慎重な操作が必要である。そのため操作性が高い、Graphical User Interface (GUI) を開発した。また、操作者の被ばくを抑えるよう、免震重要棟より遠隔で操作を行うが、例えば、Fig. 6 の免震重要棟と原子炉建屋前のスイッチングハブ間の有線 LAN による通信が切れてしまった場合に、操作装置を原子炉建屋付近で操作する必要がある。このとき防護服や手袋を重ねて装着して操作しなければならない。この状況でも操作を可能とするため、キーボードを使用せず、アーム操作にはマウスを、台車操作にはゲームパッドを使用することとした。この形態により、操作の切り分けで動作対象を分けることで操作ミスを防止している。

本 GUI は、実際の操作者から使用時の操作感などのフィードバックを得ることで直感的にわかる、疲れにくい、ミスしにくいインタフェースとなるよう機能追加や改善を行った。本 GUI について、Fig. 12 にアームの操作画面を示す。アームの操作画面では、アームの姿勢を示すアニメーションを画面中央に、カメラ表示は画面左に、アームの操作を行うボタン類を画面右に配置した。

また、アームおよび台車の状態を一目でわかるようにアイコン化し画面下段に配置した。

6.1. 操作者への環境の提示方法

本ロボットは、遠隔での操作による狭隘部での調査を目

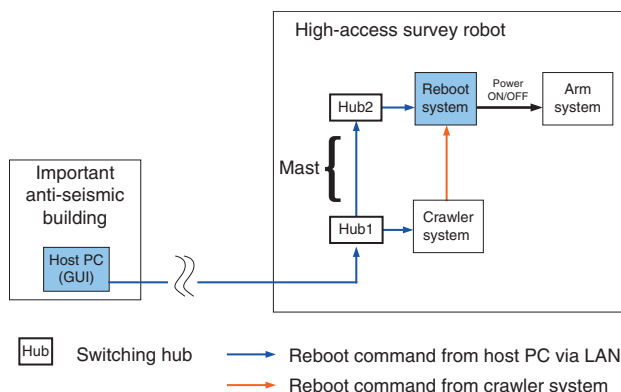


Fig. 11 Remote rebooting system

的としているため、周囲の環境を操作者に伝える際にはカメラを使用し環境を撮影して画像を提示するという方法をとっているが、カメラ画像では奥行き情報が欠落してしまうためアームと環境との位置関係が判断できずアーム動作の際に環境との接触の可能性がある。

アーム操作画面では、カメラ画像は周囲の物体の有無や属性を確認するためにとどめ、環境との位置関係の把握にはアームの手先に搭載しているライン型の2次元スキャナであるLRFを使用し、手先を回転させることで3次元のスキャンデータを取得しポイントクラウドとして提示する。ポイントクラウドとは、スキャンした際のLRFの位置、姿勢と距離データから、3次元位置を算出し点群としたものである。この情報を画面中央アニメーション画面内に重ねて提示することで、アームとの位置関係をいろいろな角度から確認することが可能となる。Fig. 13 (a)-(f)に操作者へのスキャン後の環境の提示画像を示す。

Fig. 13 (a) は、参考のためにロボットの外部から撮影した写真である。ここで操作者が確認したいのは、アームと赤い楕円で囲まれた2本の棒との位置関係である。しかしロボットに搭載されたカメラ画像では、環境とロボットの位置関係は把握できない。そこで、Fig. 13 (b), (c), (d), (e)

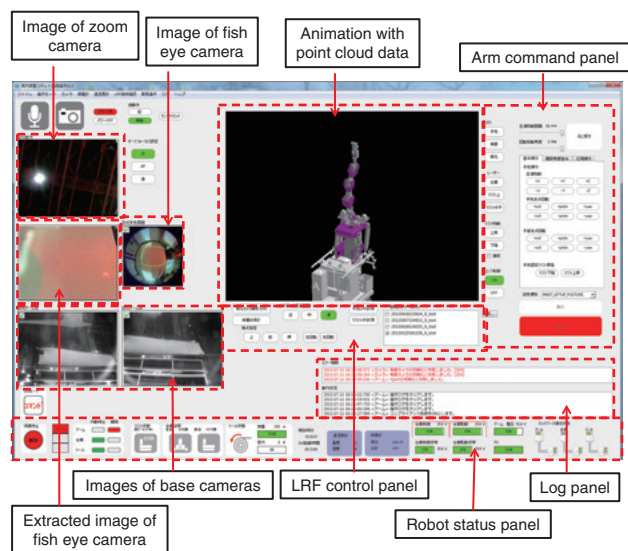


Fig. 12 GUI tab for survey arm

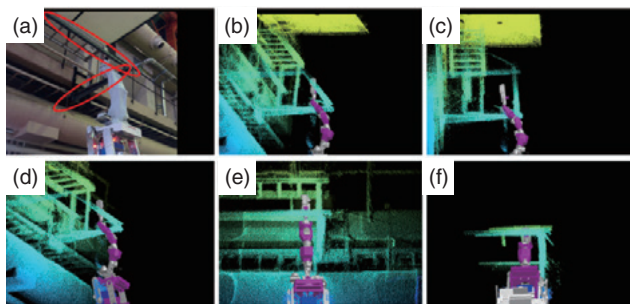


Fig. 13 Check minimal distances between robot and environment utilizing point cloud data

に示すようにポイントクラウドとロボットが描かれたアニメーションの視点を変える。Fig. 13 (c) と Fig. 13 (d) から2本の棒との距離がわかる。また Fig. 13 (e) のように確認したい領域でポイントクラウドが画面奥行き方向に重なってしまいうまく確認できなくなる場合について、GUIのボタン操作でロボットから遠いポイントクラウドの表示を消す事ができ、奥行き方向の重なりを無くすことで、Fig. 13 (f) のような表示を提示でき確認を容易に行うことができる。

6.2. アーム動作シミュレーション表示

アームの操作は、Fig. 12の画面中央のアニメーションを確認しながら、手先の位置、姿勢移動量を指示する。通常 Fig. 14の左側のようにアームが表示されているが、希望の移動量をGUI上にセットすると右側のように中間姿勢が重ねて表示される。このように、指定した動作を実行する前に、アームがどのように動くかGUI内部でシミュレーションを行い、移動途中の姿勢も含めて表示することで、6.1.節で述べたポイントクラウドで示された環境との接触の有無を事前に操作者が確認でき狭隘部での操作も安心して行うことができる。

6.3. アームとマストの同期動作

アームを狭隘部へ挿入する場合、環境に接触させないようにするため、アームの操作に連動してマストを昇降させる操作が必要になる。例えば、Fig. 15 (a) に示すような狭隘部の横方向へ進入する場合、マストを上昇させながらアームを狭隘部に挿入することで奥までアクセスできる。ところが、本ロボットのマスト昇降機能は台車の油圧昇降

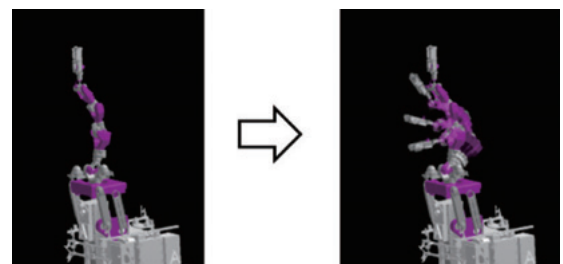


Fig. 14 Preview of arm movement

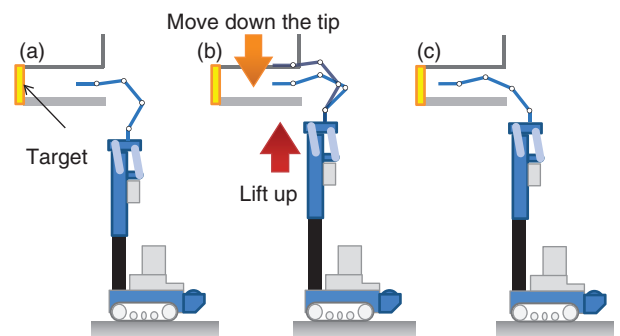


Fig. 15 Synchronization mast and arm movement

機を流用しているため、正確な移動量指示や同期動作ができない。そこで、Fig. 15 (b) に示すようにマストを単位時間上昇させ、その上昇量を計測し、上昇によるアームの移動量を打ち消すようにアームを動作させる。この操作を何度か行った後、Fig. 15 (c) に示すようにアームを挿入する動作を行う。その際環境との接触の可能性があるので1回の操作の上昇量を10 mm 程度となるよう制限している。上昇量を制限しているため何度も操作を行う必要があるが、一度の操作でマスト上昇とアームの打消し動作を行えるようにし、環境との接触を回避しながら操作者の負荷を軽減している。

7. 信頼性試験

現場環境および、運用回数より信頼性要件を定めた。2.2. 節の運用回数に対し5倍の安全率とし80回の運用を耐久要件とした。なお、1回あたりの運用時間は5時間である。信頼性試験は、耐久試験および環境試験からなる。その要件をTable 2に示す。

なお、耐放射線性に関しては、「汎用重機やロボットにおける耐放射線性評価と管理方法の基本的な考え方」⁽⁵⁾に沿って累積20 Svを越えたらロボットの使用を中止することとしたため、実際の試験は行っていない。

7.1. 耐久試験

7.1.1. 電装機能耐久試験

本ロボット用に新規開発した機能に関して、各ミッションで使用される回数を想定し、各機能に関して耐久試験を実施した。例えば、ブレーキ機能に関しては、複数のブレーキを同時に制御した際に発生するサージ電圧によりブレーキ動作を制御するスイッチング素子が故障しないこと等を確認した。

7.1.2. 動作耐久試験

アームの関節を可動範囲限界まで繰り返し動作させて、構造的な耐久性能を確認するとともに、ケーブルの引っ張りや屈曲による断線がないことや、防滴カバーが破れず伸縮性に問題がないことを確認した。

7.2. 環境試験

7.2.1. 温度サイクル試験

5.2.4. 項で述べた小型筐体に電装品を格納し、0-40℃、8時間のサイクルで30サイクル温度スweep試験を実施した。試験中および試験後において、アクチュエータ駆動および全電装機能に問題がないことを確認した。

7.2.2. 温湿度試験

冬季の運用を考慮し、-10℃でシステムが起動することを求められる。よって、温湿度試験装置にロボットを入れ、Table 2に示す試験パターンを1サイクル行い、外界セン

Table 2 Test conditions

Test		Condition	
Endurance test	Electrical function	-Brake control, LED control and rebooting -Charge and discharge of battery	
	Mechanical function	-Repetitive movement to all working range -Arm : 40 h -Parallelogram link mechanism : 400 cycle	
Environmental test	Heat cycle test	-0 to 40°C -30 cycle (8 h/cycle)	Transition (a) 0 to 40°C : 2 h (b) 40°C constant : 2 h (c) 40 to 0°C : 2 h (d) 0°C constant : 2 h
	Hygrothermal test	-Temperature: -10 to 40°C -Humidity: Less than 90% -1 cycle	Transition (a) 5°C, 80% (b) 20°C, 31% (c) 0°C (Humidity uncontrollable) (d) 30°C, 80% (e) -10°C (Humidity uncontrollable) - Waiting for heating up of arm system (40 min) - Reboot arm system (f) 40°C, 90%
	Vibration test	-Acceleration : Less than 5 G -Vibration : 10 to 500 Hz -11 min log sweeping -30 h	
	Rainfall test	-10 mm/h, 25 min (without wind) -10 mm/h, 10 min (with wind)	

サデータ取得、アーム制御、台車制御が正常であることを確認した。

7.2.3. 振動試験

原子炉建屋内走行時やトラックによる運搬を想定し、振動要件を決定した。原子炉建屋内での走行状態は、原子炉建屋内部で稼働している他ロボットが取得した走行データから、トラック運搬状態は実際に搬送するトラックから取得したデータをもとにし、振動条件を5 Gと定めた。その条件下で、電装システム単体やロボットアームに対して振動試験を行い、ねじ緩み等の機構不具合が発生せず、システム全体の動作に問題がないことを確認した。

7.2.4. 防滴試験

原子炉建屋付近で作業員によってトラックからロボットを降ろした後は、遠隔操作による自走で原子炉建屋に入る。その間に雨の影響を受けることが考えられるため、作業と自走の時間を考慮し雨量5 mm/h、20分と定め、降雨試験を行った。防滴が必要な箇所に対して試験前に水没シールを貼付し、試験後に全ての箇所です水の侵入がないことを確認した。

8. 実証実験

ロボットシステムを実環境に似た場所で実際のミッションと同様の動作をさせ、システムの機能確認、追加機能、改善点の抽出した。

実証試験は1Fの1-4号機とほぼ同年代に建設され物理的な形状が似ており、2009年に営業運転を終了した中部電力浜岡原子力発電所の2号機を使用した。

実証実験の様子をFig. 16に示す。それぞれ左上の写真はパーソナルエアロック室、右上の写真はキャットウォーク上の貫通部、下の2枚の写真はTIP室上の調査

を行っている。

この実証実験では以下のアームに関する問題点がいくつか明らかになった。

例えば TIP 室前は、スペースが限られており、アームを Fig. 7 の移動姿勢から調査姿勢に遷移する際、施設と干渉してしまうことがわかった。そこで移動姿勢から調査姿勢に至るまでの中間姿勢を細かく取ることで、姿勢遷移に必要なスペースを小さくした。

また操作には当初想定していたよりも時間がかかることがわかった。そのためアーム挿入時に使用したコマンドを逆にたどって送信する「アンドゥコマンド」を使ってアームを狭隘部から戻したり、LRF のスキャン時の手先の回転速度を速めてスキャンにかかる時間を節約したりすることで、全体のミッション時間を抑えた。

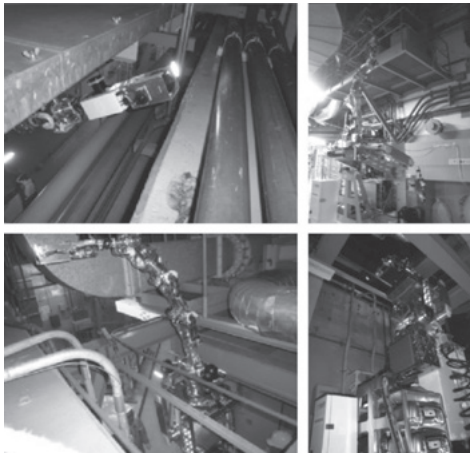


Fig. 16 Experiments in Hamaoka Nuclear Power Station (Images provided by Chubu Electric Power Co., Inc.)

9. ミッション

1F でのミッションはそれぞれ 2 号機で 2 回、3 号機で 1 回行われた。

9.1. 2 号機でのミッション概要

2 号機でのミッションは 2 ステップから成る。Fig. 17 に、それぞれ今回のミッションでロボットが調査を行ったエリアおよび調査時のロボットの姿勢を示す。

第 1 ステップでは、ロボットは原子炉建屋 1 階の上部西側を全体的に調査し、放射線量や計測や映像の撮影を行った。

第 2 ステップでは、南西側の PCV の貫通部付近を撮影するために狭隘部にアームを挿入した。

9.2. 2 号機でのミッション結果

その結果、従来計測できなかったフロア高所の線量は低

い場所と大きく変わらず 7-18 mSv/h であることがわかった。また、調査を行った場所の天井付近では施設の損傷は見つからなかった。

次に 2013 年 7 月 23 日に行われた第 2 ステップにおいて取得した画像を Fig. 18⁽⁷⁾ と Fig. 19⁽⁷⁾ に示す。

調査結果の画像からはパーソナルエアロック室上部の施設の損傷は見つからなかった。PCV の壁面を詳細に見ることはできなかったが、PCV 上部には多くの配管やダクト、

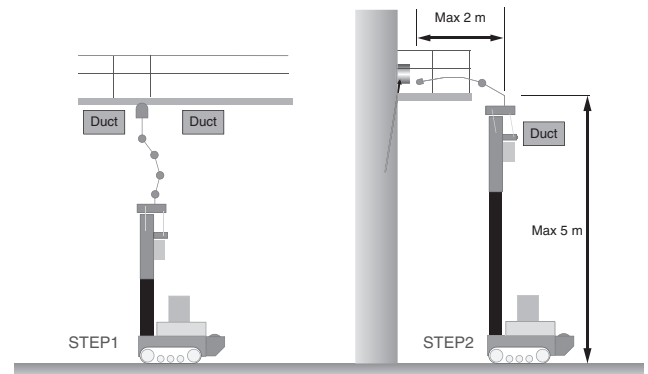


Fig. 17 Robot postures when robot surveying in missions
The left shows the step 1 and the right shows the step 2.

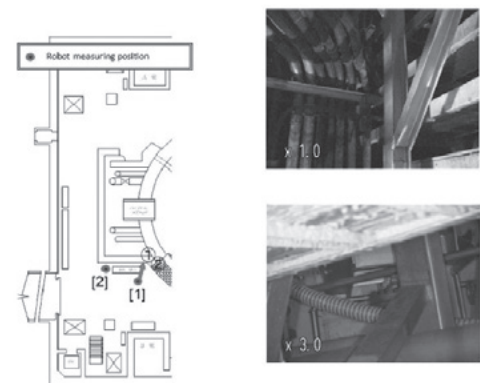


Fig. 18 Result of mission 2 (Provided by TEPCO)
The pictures show the images of ① and ② from [1], respectively.

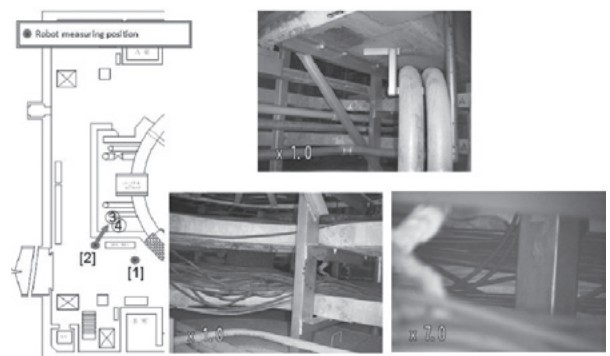


Fig. 19 Result of mission 2 (Provided by TEPCO)
The top and bottom left pictures show the images of ③ and ④ from [2], respectively. The bottom right picture enlarges of the image of the bottom left.

ケーブル類があり、狭隘な状況であることが確認できた。

9.3. 3号機でのミッション

3号機でのミッションは2014年5月13日に行われた。PCV内部調査に向けて、調査で使用する高さ2.4 mにあるPCV貫通部周辺の雰囲気線量や作業干渉物形状等を計測した。現場線量は測定点において最高98.3 mSv/hであった。

10. まとめ

東京電力福島第一原子力発電所の事故対応作業に貢献するため高所狭隘部の調査を行う高信頼の高所調査用ロボットシステムを開発した。

限られた開発時間の中で、福島第一原子力発電所の原子炉建屋という、人が長時間立ち入ることができない場所での調査を実現するため、既存のシステムを活用しながら、現場で実際に使えるシステムを開発した。

そのために現場の状況を綿密に調査し、また現場におけるロボットへの要望を得て、要件に基づいて開発を行った。次に信頼性試験を通して要件を確認し、さらに現場と似た環境でのテストを行い、システム全体の問題点を洗い出し、対策を行った。

実施した3回のミッションでは、今までわからなかった原子炉建屋1階フロア高所の映像や線量データを得ることができた。

また操縦に使用するポイントクラウドから建屋内の3次元データが取得できることも確認できた。このデータは今後の様々な廃炉作業にも活用される予定である。

本ロボットは引き続き東京電力福島第一原子力発電所において線量調査や建屋内の3次元データ取得に使用される予定である。

謝 辞

本開発にあたり、実証実験場所を提供いただいた中部電力株式会社浜岡原子力発電所の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) <http://www.irobot.com/en/us/robots/defense/packbot.aspx/>
- (2) Nagatani, K., Kiribayashi, S., Okada, Y., Otake, K., Yoshida, K., Tadokoro, S., Nishimura, T., Yoshida, T., Koyanagi, E., Fukushima, M., Kawatsuma, S.: Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plants using mobile rescue robots, Journal of Field Robotics, Vol. 30,

Issue 1(2013)

- (3) http://www.topy.co.jp/files/default/News_Release_survey_runner_F_1_.pdf/, 2012/3
- (4) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型ASIMOの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.38-44
- (5) <http://roboticstaskforce.wordpress.com/2011/05/20110427-rcpt-radiation.pdf/>
- (6) 横井一仁, 加藤普, 山野辺夏樹, 尹祐根, 森川泰, 尾暮拓也, 重見聡史, 松本隆志: 高所調査用ロボットシステムの開発, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演概要集(2013)
- (7) http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2013/images/handouts_130724_06-j.pdf

■ 著 者 ■



杉 浦 恒



福 島 崇 文



黒 田 貢 秀



石 崎 隆 介



松 本 隆 志