

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	LIBRA-I : 小径孔を通過可能な内部調査用軽量長尺多関節アーム
Title(English)	LIBRA-I : A Lightweight Balanced Robot Arm for an Internal Investigation through a Narrow Hole
著者(和文)	後藤 優斗, 遠藤 玄, 汪 振宇, 高橋 秀治, 木倉 宏成
Authors(English)	Yuto Goto, Gen Endo, Zhenyu Wang, Hideharu Takahashi, Hiroshige Kikura
出典(和文)	日本ロボット学会誌, Vol. 42, No. 2, pp. 168-176
Citation(English)	Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 42, No. 2, pp. 168-176
発行日 / Pub. date	2024, 3
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

LIBRA-I : 小径孔を通過可能な内部調査用軽量長尺多関節アーム

後藤 優斗* 遠藤 玄* 汪 振宇*
高橋 秀治* 木倉 宏成*

LIBRA-I :

A Lightweight Balanced Robot Arm for an Internal Investigation through a Narrow Hole

Yuto Goto*, Gen Endo*, Zhenyu Wang*, Hideharu Takahashi* and Hiroshige Kikura*

There is a need for technology to investigate the large space beyond a narrow hole. An example is the exploration of the Main Stream Isolation Valve (MSIV) room at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. The authors designed and fabricated a prototype long articulated arm, LIBRA-I, for this exploration. The design requirements were that the robot should be able to pass vertically through a narrow access hole, transport a measurement device horizontally at right angles to the hole axis, be simple, lightweight, compact, and have low power consumption. To meet these requirements, a robot configuration combining a horizontally extending arm and a 2-degree-of-freedom (DoF) joint, and a variable mass 2-DoF counterweight were adopted. As a result, LIBRA-I has a horizontal reach of 4[m], a passable hole diameter of 300[mm], a mass of 11[kg] for the arm, and 5-DoF. As a motion experiment, LIBRA-I successfully performed a horizontal extension motion from a vertically suspended condition. 3D models of the environment was successfully created by capturing video using a camera on the tip of LIBRA-I. We also measured the power consumption in static and confirmed that it was extremely low, ranging from 15.8[W] to 23.5[W].

Key Words: Long reach articulated manipulator, Reactor decommissioning technology, Counterweight, Link mechanism, Differential mechanism

1. はじめに

1.1 背景

廃止作業中の原子力発電所などで、小径孔を通過した先に広がる大空間内を調査する技術が求められている。その具体的な事例として、福島第一原子力発電所の主蒸気隔離弁 (Main Stream Isolation Valve, MSIV) 室の探査が挙げられる。東京電力は MSIV 室の扉付近から水の流れが確認されたことを受けて、その調査を行っている。MSIV 室内は放射線濃度が高く、また未知の危険があることから、人が立ち入ることができない。MSIV 室の上には人が立ち入ることができる部屋があり、そこから内径 300[mm] 程度の孔をあけることが可能な見込みである。東京電力は、これまでに MSIV 室上の部屋の床面に開けた孔からパンチルトカメラを吊り下げることで、鉛直下方の周囲環境を撮影したが、詳細な調査には至っていない (Fig.1)。そのため、カメラなどの計測機器を、障害物を回避しながら水平方向に広範囲に移動させ、詳細な調査を行うことのできるロボットが求められている。また将来的にはロボットを用いて MSIV 室内での長期間の定点観測や手先での止水作業を行うことも期待されている。

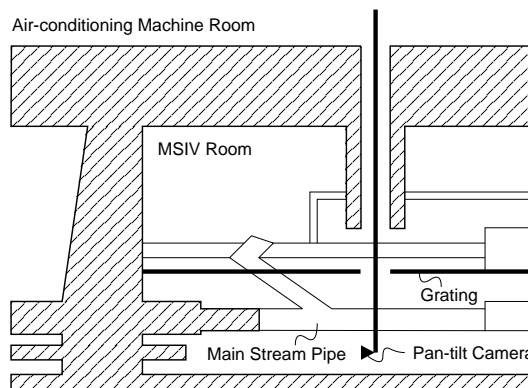


Fig. 1 Sectional view of MSIV room and investigation by Tokyo Electric Power Company

1.2 従来技術

小径孔や狭隘地を通過し調査や作業を行う技術は、これまでも開発されてきた。東芝エネルギーシステムズ株式会社は、福島第一原発2号機 PCV 内部調査装置として、直径 120[mm] の穴から水平に 13[m] のガイドパイプを通しさらに 5[m] 進展する内部調査装置を開発した [1]。NASA のジョンソン宇宙センターは、宇宙空間での狭い場所の作業装置として、「Tendrill」と呼ばれる直径 1[cm] の細長いマニピュレータを開発した [2]。これらはいずれも、基本的にはアクセス口の軸線方向にしか計測機器を進められず、先端の一部のみ向きを変えられるような

原稿受付

*東京工業大学

*Tokyo Institute of Technology

■ 本論文は××性 (××××分野) で評価されました。

ものである。そのため、アクセス口となる鉛直方向の孔と直角に、水平方向に広範囲に計測機器を移動させることが求められている MSIV 室の調査に適用することは困難である。

東北大学は災害現場などでがれきの隙間を縫って進める直径 70 [mm]、長さ 10[m] の能動スコープカメラを開発した [3]。清水建設・ハイボット・東京工業大学は、がれきの隙間から進入して内部を調査するヘビ型ロボット「ACM-R4.3」を開発し、東京電力福島第一原子力発電所の屋上の調査に投入した [4]。これらのロボットは環境と接触することによって移動するため、望み通りの進行方向に進めるとは限らず、スタックし移動不能となる可能性がある。確実な調査を遂行するためには、状況が不明な環境との接触に頼らず、空中に吊り下げられた形態で、計測機器を所望の場所まで搬送する技術が望ましい。

CEA LIST は全長 8.2[m]、直径 160[mm]、5 節からなる、アーム部質量 150[kg] の多関節マニピュレータを開発した [5]。各節は $\pm 45[\text{deg}]$ の可動域を持つピッチ軸と $\pm 90[\text{deg}]$ の可動域を持つヨー軸からなる 2 自由度関節を有しており、全 10 自由度の構成である。このロボットであれば、アクセス口の孔の軸線方向から大きく角度を変えて先端部を搬送でき、環境との接触によって移動することもない。ただし、アクチュエータの小トルク化・小型化のためにピッチ関節に導入されている、四節リンク機構とバネによる自重補償機構により、各関節の可動域は制限されている。また長尺のアームを支えるための大きな基台が必要となっており、搬入は容易ではない。

JET-EFDA は、国際熱核融合炉を維持メンテナンスするために、全長 8[m] の水平多関節アーム「Octant1」を開発した [6]。このアームの全質量は 7000[kg] 程度と見積られ、非常に大きい。IRID は、福島第一原子力発電所 2 号機原子炉格納容器の内部詳細調査のために、水平多関節アームの開発を行っている [7]。このロボットアームの質量も 4600[kg] と非常に大きい。可搬性の低い重厚長大なアームでは、搬入経路を確保することや、施設の耐荷重などを考慮する必要があり、その結果、調査実施までに多くの期間を要する。もし軽量で可搬性に優れた長尺アームが開発できれば、準備期間の短い迅速な調査が可能となる。

筆者らの研究グループでは、ワイヤ干渉駆動型多関節ロボットアーム「Super Dragon」を開発した [8]。Super Dragon はアーム部の質量が 50[kg] と軽量であり、十分な自由度と可動域を持つ。しかし、多くの受動プーリを用いてワイヤが接触しないように経路を独立させなくてはならず、結果として機構が非常に複雑になってしまうことが大きな課題であった。これを解決するために、同研究グループでは、摩擦係数が少ない化学繊維ロープを用いて、あえてロープを束ねることで機構の簡素化を狙った、バンドルドワイヤドライブによるロボットアームを開発した [9]。しかし、筆者らによる実験により、摩擦によるワイヤの張力低下やそれによる制御性の悪化などに課題があることが明らかになった。また基部にアクチュエータを配置しワイヤを用いて駆動するロボットアームは、基部とアームの分割や、アーム自体の分割が困難であり、これが搬入の妨げになることも課題であった。

1.3 設計要件

以上を考慮し、筆者らは MSIV 室の調査を目的としたロボットを開発するために、次のような設計要件を設定した。

- 小径孔を鉛直に通過できる。
- 孔の軸線方向と直角に、水平に計測機器を搬送できる。
- スタックを回避するため、環境との接触は行わず、計測機

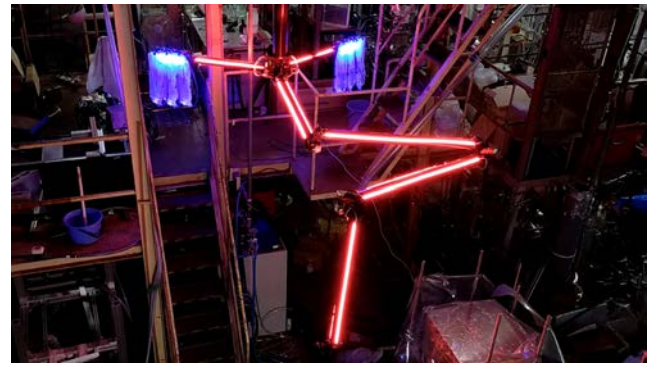


Fig. 2 Prototyped long articulated arm "LIBRA-I"

器を孔から懸架し、空中で移動させる。

- 障害物を回避できるだけの十分な自由度を持ちつつ、多数のプーリなど複雑な機構を有さない。
- 現場への搬入や設置が容易な構造であり、十分に軽量である。
- 将来的に長期間の定点観測に対応するため、搬送する機器の静止時には消費電力を可能な限り小さく抑える。

本論文では、上記を満たすロボットの実現可能性を検証するために、水平搬送距離 4.0[m]、アーム部質量 11[kg]、5 自由度の軽量バランス型ロボットアーム「LIBRA-I」(Fig.2)を提案するとともに、これを設計試作し、基本的動作を実現することを目指す。

2. LIBRA-I の提案

2.1 目標仕様と目標タスク

試作機である LIBRA-I の目標仕様は、以下のように設定した。なお、目標タスクは計測機器を所望の場所に搬送することである。

- 水平搬送距離：4.0[m]
- 通過可能孔径：300[mm]
- ペイロード：500[g] 程度

2.2 基本コンセプト

これまでに述べた設計要件と目標仕様を達成するため、LIBRA-I の基本コンセプトを、以下のように設定した。

- 静止時の消費電力を抑え、将来的に手先作業を可能にするため、マルチコプター等ではなく、長尺多関節アームを基本形状とする。
- アームの能動関節にはアクチュエータを直接取り付ける。
- 能動関節の駆動トルクを低く抑えることで、アクチュエータについて軽量かつコンパクトなものを選定することを可能とし、これによって全体を軽量かつコンパクトにする。

なお、能動関節の駆動トルクを低く抑えることについては、次のような方針によって実現することにした。

- 水平搬送は、重力が関節駆動トルクに影響しにくい機構(後述する「水平展開アーム」)によって行う。
- 質量可変カウンタウェイトを用いて、水平方向に搬送する際の姿勢保持のための関節駆動トルクを補償する。

2.3 アクセス手順

上記の基本コンセプトに基づいて筆者らが考案した、MSIV 室へのロボットによるアクセス手順について、Fig.3 を用いて説明する。それにあたって、まずロボットの大きな構成について説明しておく。ロボットはおもに「アーム (Arm)」「吊り下げパイプ (Suspending Pipe)」「パイプ駆動ユニット (Pipe

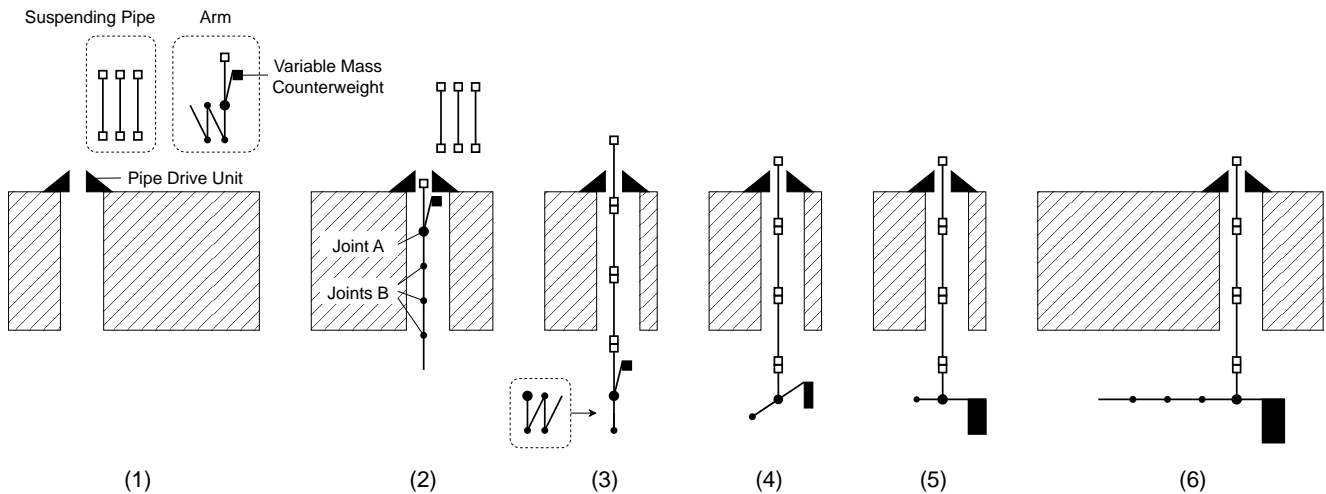


Fig. 3 Proposed procedure for accessing a large space through a narrow hole using a long articulated arm robot

Drive Unit)」の3つから構成される。アームは剛体リンクを複数の回転関節 (Joint A および Joints B) で接続したシリアルリンク系で構成される。先端にはカメラなどの計測機器が搭載されており、他端には質量可変カウンタウエイトが接続されている。カウンタウエイト側の直近の関節 (Joint A) には吊り下げパイプが接続される。吊り下げパイプはアクセス口の上にあるパイプ駆動ユニットによって上下・回転方向に駆動される。

アクセス手順を説明する。まずロボットは吊り下げパイプ、アーム、パイプ駆動ユニットの3つに分けて搬入され、最初にパイプ駆動ユニットが設置される (Fig.3 (1))。次に、アームがアクセス口へ通される。このときアームを構成する Joint A と Joints B は直線状とする (Fig.3 (2))。その後、吊り下げパイプを連結しながら、全体を降下させていく。また Joints B を動作させアームを折りたたんだ状態にする (Fig.3 (3))。大空間内への降下が完了したら Joint A を動作させ、アームを水平状態にする。このとき質量可変カウンタウエイトを用いて Joint A のトルクを補償する (Fig.3 (4) (5))。そしてカウンタウエイトの質量を調整しバランスを保ちながらアームを展開していく (Fig.3 (6))。このアクセス手順によりロボットは狭いアクセス口を降下したのちに、大空間内を探索することができる。

本論文では上記アクセス手順におけるアームの動作のみを扱う。すなわちパイプ駆動ユニットおよび吊り下げパイプの連結機能を除いた Fig.3 (3) から (6) までの動作を実証できるものを設計試作する。

2.4 詳細な構成

LIBRA-I の構成を Fig.4 に、3D モデルを Fig.5 に示し、提案する機構を説明する。以降、Fig.4 に示す座標系における X 軸と平行な軸周りの回転をロールと呼び、同様に Y 軸とピッチ、Z 軸とヨーを対応させて呼称する。

LIBRA-I は「水平展開アーム (Horizontally Extending Arm)」「2自由度関節 (2-Degree of Freedom (DoF) Joint)」「バランス用 V 字アーム (Balancing V-shaped Arm)」「吊り下げパイプ (Suspending Pipe)」「質量可変 2 自由度カウンタウエイトシステム (Variable Mass 2-DoF Counterweight System)」から構成される。ここで、2 自由度関節は Fig.3 の Joint A に、水平展開アームを構成する関節は Joints B に対応し、水平展開アームの先端に計測機器が取り付けられる。J1 から J5 の関節

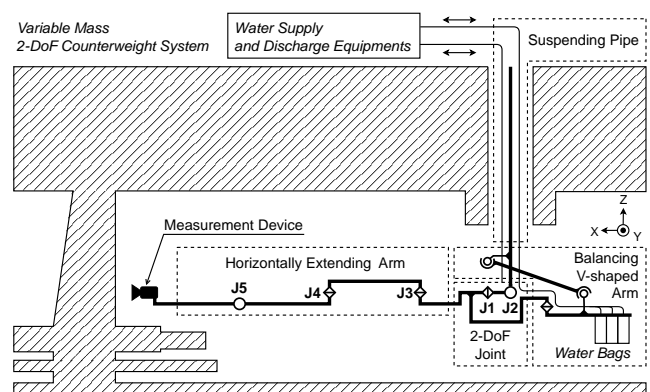


Fig. 4 Configuration of LIBRA-I and part names

は能動関節である。J1 (Roll) には $\pm 10[\text{deg}]$ 、J2 (Pitch) には $-10[\text{deg}]$ から $90[\text{deg}]$ の可動域が存在する。バランス用 V 字アームに取り付けられている水袋がカウンタウエイトとなり、中の水を出し入れすることにより質量可変とする。

以降は上記の構成に至った理由について、各部に着目して説明していく。

2.5 水平展開アーム

水平展開アームは J3・J4・J5 の3つの能動関節と、約 1[m] のリンクを4つ備えた、3自由度のアームである。対象とする調査活動では、ロボットは水平方向に広く動き回ることになる。ヨー関節を複数備えた水平展開アームは、このような状況で関節駆動トルクを小さくできるため、J3とJ4の関節はヨー関節としている。J5はヨー関節とピッチ関節の2つのパターンが考えられる。ヨー関節とすれば関節駆動トルクを小さくできるが、ピッチ関節としても先端の関節であるため、駆動トルクがあまり大きくならず、入り組んだ場所の探索が可能となるメリットもある。LIBRA-IではJ5はピッチ関節とした。

2.6 2自由度関節

2自由度関節はJ1 (Roll) とJ2 (Pitch) の自由度を持つ能動関節であり、水平展開アーム、バランス用 V 字アーム、吊り下げパイプを接続している。水平展開アームとバランス用 V 字アームのロールとピッチの姿勢が一致するような関節である。

2自由度関節の必要性和効果については、2点が挙げられる。第一に、J2の $0[\text{deg}]$ から $90[\text{deg}]$ の可動域は、Fig.3 (3) から

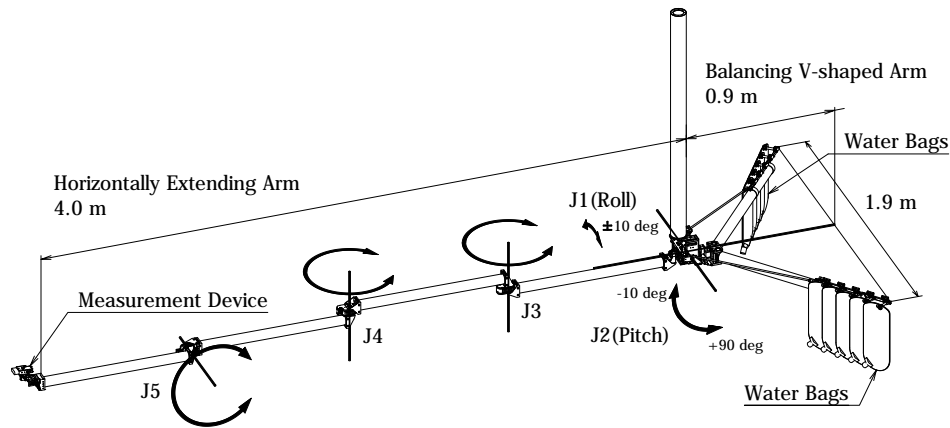


Fig. 5 3D model of LIBRA-I and dimensions of each part

(5) に対応する水平展開アームの持ち上げのために必要である。第二に、J1 と J2 の ± 10 [deg] の可動域については、水平展開アームの J3 と J4 の関節駆動トルクを低く抑える効果がある。

後者について詳細に説明する。もし水平展開アームが完全に水平であれば、J3 と J4 は重力の影響を受けず、アームが加減速を行うための動力学的なトルクを出力すればよい。しかし、軽量化のため各部の剛性が低くなっている場合、リンク部材や連結する関節機構のたわみなどの影響で完全には水平にならず、その結果、関節は重力の影響を受けることになり大きな駆動トルクが必要となると考えられる。これを考慮すると、水平展開アームには大きなトルクを出力するアクチュエータを搭載しなければならなくなり、ロボットを軽量かつコンパクトにすることが困難となる。そこで、J1 と J2 に自由度と可動域を設け、水平展開アームの姿勢の調整を可能とし、傾きを補正することで、J3 と J4 の関節駆動トルクを低く抑えることにしている。

また、カメラなどの計測機器を搬送する際に、水平展開アームのたわみやねじれによって、計測機器が所望の場所からずれて搬送されてしまうことが考えられる。2 自由度関節が存在することで、そのずれを解消することが容易となり、所望の場所に近づけやすくなるという副次的な効果も期待される。

2.7 質量可変 2 自由度カウンタウエイト

この節では質量可変 2 自由度カウンタウエイトについて、その効果に着目して説明する。

まず、2.3 で述べたように、カウンタウエイトがあることで 2 自由度関節の駆動トルクを補償できる。その結果、2 自由度関節やその周辺が簡素かつ軽量の設計となる効果が期待される。ここで、水平展開アームの重心が X 軸方向にまっすぐ移動する場合には、J1 (Roll) にはトルクは発生せず、J2 (Pitch) のみ補償すればよいので、カウンタウエイトは 1 自由度でよい。しかし、水平展開アームが左右の片方に展開した場合には、J1 もトルクを発生するため、補償が必要である。この際、V 字に配置された 2 つのカウンタウエイトの質量に差をつけることで、J1 の補償が可能となる (Fig.6)。

また、この 2 自由度のカウンタウエイトがあることで、吊り下げパイプの下端に負荷される曲げモーメントが低減されるという効果もある。もし吊り下げパイプの下端に大きな曲げモーメントが負荷されると、吊り下げパイプが大きく歪み、アクセス口と吊り下げパイプの間に大きな摩擦が生じる可能性がある。カウンタウエイトの搭載によって、これらの歪みや摩擦を低減

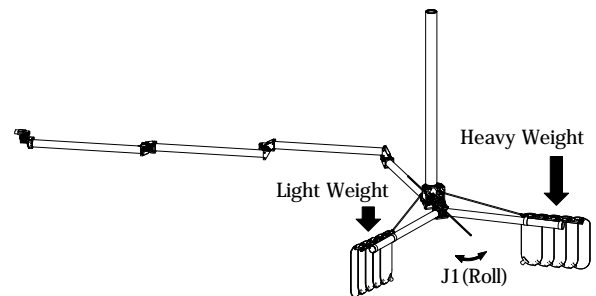


Fig. 6 How the variable mass 2-DoF counterweight works at J1

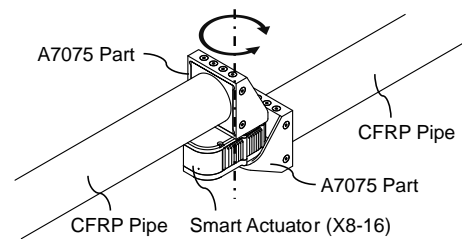


Fig. 7 Detail view of J3

できると期待される。カウンタウエイトを 2 自由度とすることで、水平展開アームが左右の片側に展開した場合にもこの効果を発揮させることができる。

3. 機構設計

本章では、LIBRA-I の機構設計について詳細に説明する。

3.1 水平展開アーム

水平展開アームの J3 周辺の詳細を Fig.7 に示す。能動関節には、スマートアクチュエータ (回転角センサ、トルクセンサ、減速機、電動モータ、モータドライバ、コンピュータなどが一体となった製品) の HEBI Robotics 社製 X-Series Actuators X8-16 を採用した。4 つの約 1[m] のリンクは、直径 60[mm]、肉厚 1[mm] の、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) 製の薄肉パイプとした。スマートアクチュエータと CFRP パイプは強度の高い A7075 製の部品によって接続されている。

3.2 2 自由度関節

2 自由度関節の内部の詳細図を Fig.8 に示す。水平展開アーム

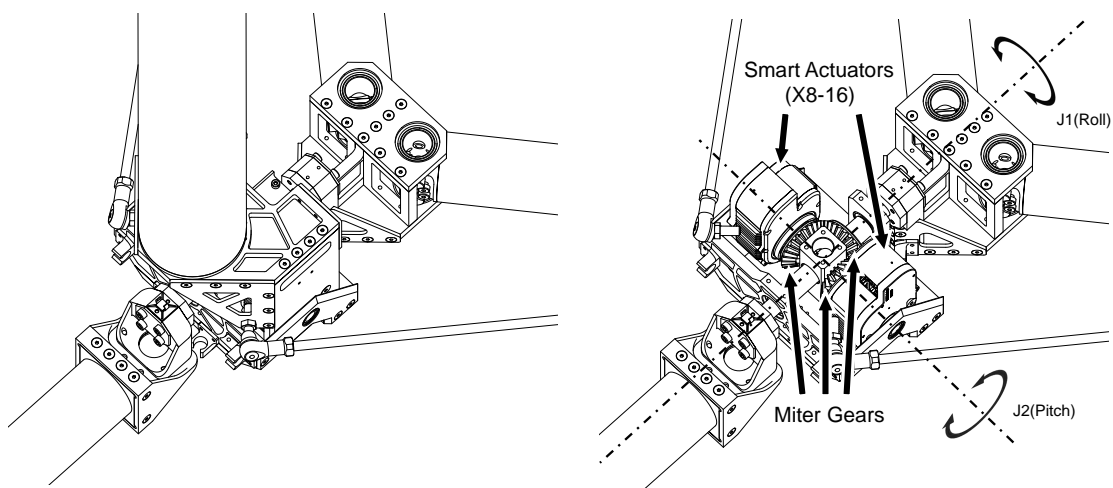


Fig. 8 Detail view of 2-DoF Joint

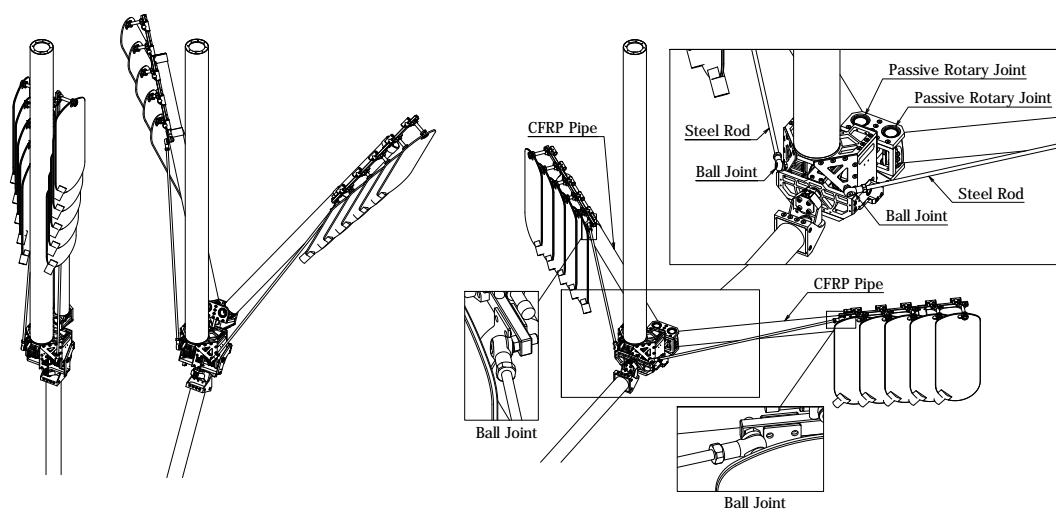


Fig. 9 Mechanism configuration of Balancing V-shaped Arm that opens and closes passively by link mechanism

ムとバランス用 V 字アームは同じ 1 本の軸に固定することで、2つのアームのロールとピッチの姿勢が一致するような機構とした。構造の大部分の材質は A2017 である。水平展開アームと同様の Hebi Robotics 社製スマートアクチュエータが 2 個搭載されており、3 個のマイタギアによる差動歯車装置を用いた機構となっている。

3.3 バランス用 V 字アーム

バランス用 V 字アームは、カウンタウェイトとなる水袋を取り付けるための、主に CFRP パイプでできたアームである。アクセス口を鉛直に通るとき (Fig.3 (2) (3)) には直線状の格納姿勢となっているが、アームが水平となるときには受動的に V 字展開する機構を備えている。V 字の根元に配置された受動回転関節と、両端にボールジョイントのついた鋼材のロッドにより、この動作を実現している。水袋は複数あるが、それらをずらして配置することで、直線状の格納姿勢でもコンパクトにまとまるようにしている (Fig.9)。

3.4 吊り下げパイプ

吊り下げパイプは、下部の機構を吊り下げているパイプであり、主に下部の機構の重量による引張力が負荷される。材質は CFRP を主としている。

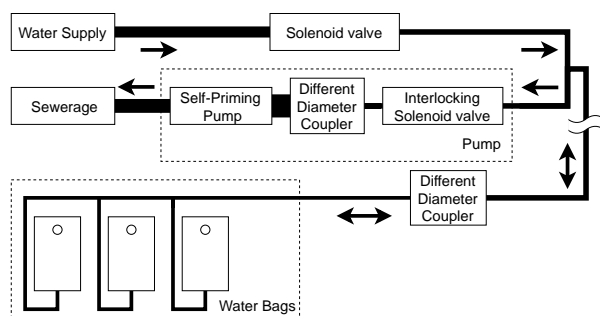


Fig. 10 Configuration for 1-DoF of the counterweight system that adjusts the volume of water in water bags

3.5 質量可変 2 自由度カウンタウェイトシステム

質量可変 2 自由度カウンタウェイトシステムは、質量可変カウンタウェイトとなる水袋と、その給水・排水を行う装置群で構成されるシステムである。Fig.10 にこのシステムの 1 自由度分の詳細図を示す。水袋には、1 袋あたり容量 3[L] の密閉されたプラスチック製の袋を、1 自由度あたり 3 袋から 5 袋程度、合計 6 袋から 10 袋程度使用する (後述する動作実験では合計 6 袋使用)。質量を増やすときは電磁弁を開き、上水道から水袋に水を供給する。質量を減らすときは、自吸式ポンプで吸出し、

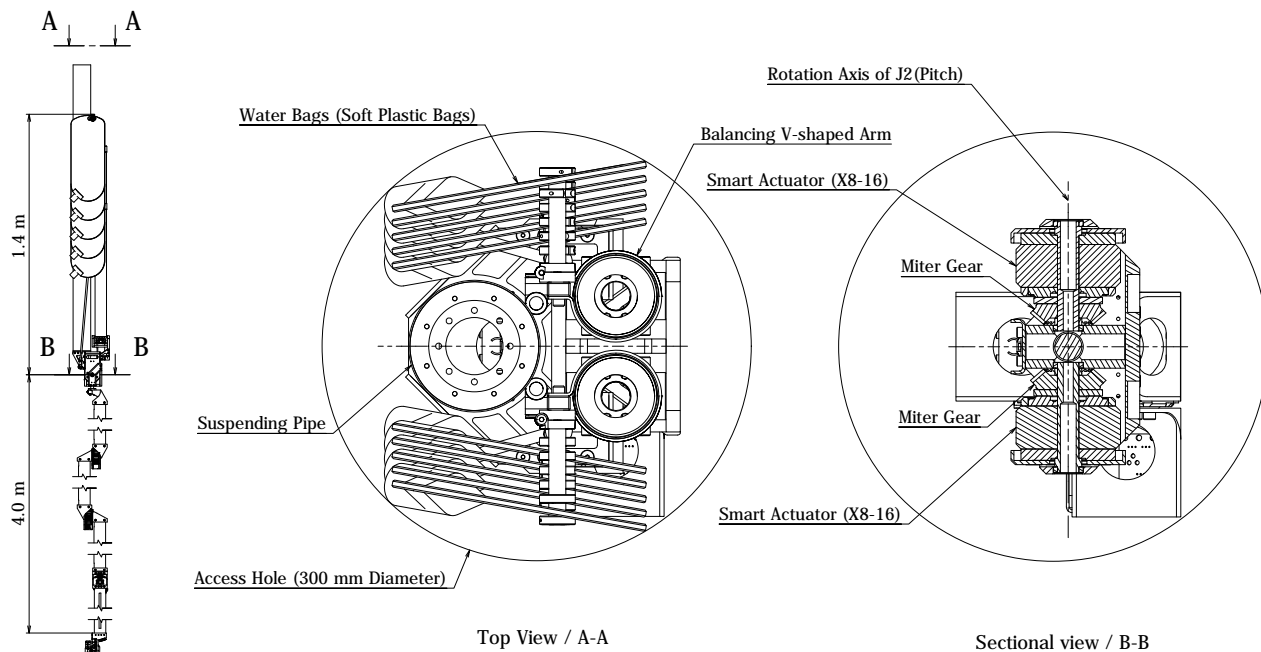


Fig. 11 Top and sectional view of LIBRA-I in hole passing condition

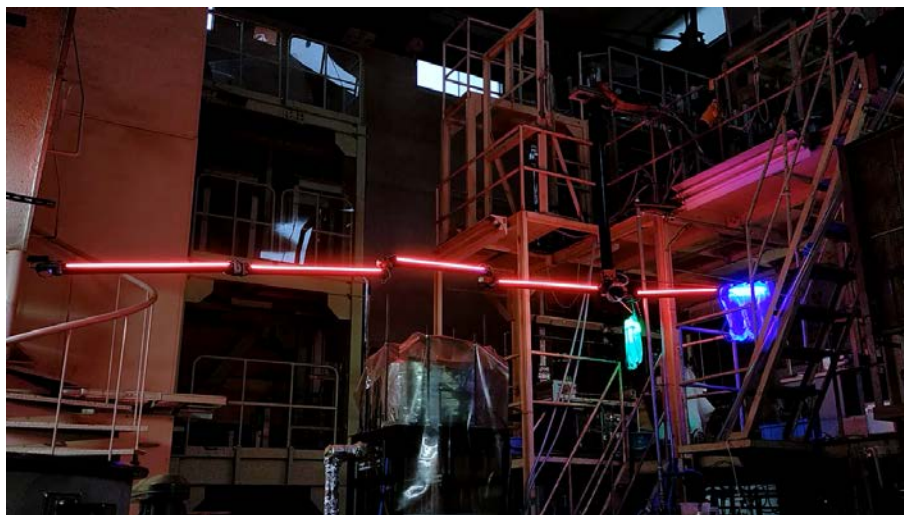


Fig. 12 LIBRA-I at maximum horizontal extension

下水道に排出する。上水道から水を水袋に入れるとき、水がポンプを通過して下水道に流れてしまうことがないように、ポンプと連動する電磁弁が存在する。この連動電磁弁は、ポンプ本体が動いているとき開いており、動かないときは閉じるように、電気的に連動している。電磁弁やポンプはアクセス口の上部に設置し、長いチューブをロボットの内部に通して、水袋に接続する。水袋の下部の一部に硬い部材があり、そこにチューブを取り付けることで、水袋の給排水口を常に確保している。水の量の調整は 2 自由度関節の出力トルクをもとにバンバン制御で行っている。

3.6 小径孔を通過可能とする配置

LIBRA-I は、目標仕様の 1 つである通過可能孔径 300[mm] を達成できるように機構が配置されている。Fig.11 に示すように、Fig.3 (2) の直線状の格納姿勢において、直径 300[mm] の円の中に全ての機構を収めることができている。

Table 1 Specification of LIBRA-I

Horizontal Reach	4.0[m]
Passable Hole Diameter	300[mm]
Mass of Arm	11[kg]
Payload	450[g]
Degree of Freedom	5
Range of motion of J1	± 10 [deg]
Range of motion of J2	$-10 \sim 90$ [deg]
Range of motion of J3, J4, and J5	± 170 [deg]
Power Voltage of a Smart Actuator	DC 24[V]
Rated Continuous Current of a Smart Actuator	0.8[A]
Gear Ratio of a Smart Actuator	1462:1

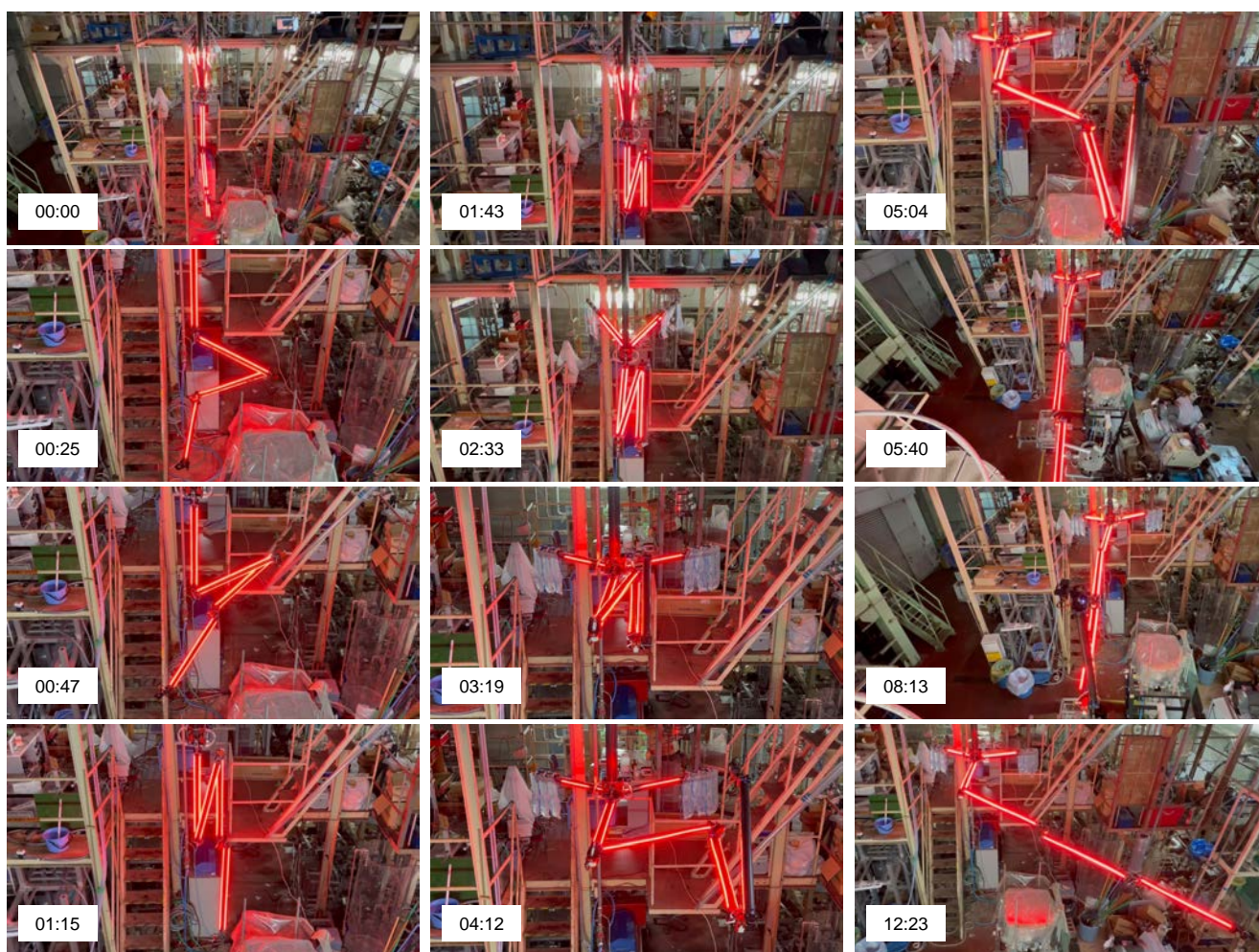
4. 動作実験

4.1 外観・仕様

試作した LIBRA-I の外観を Fig.12 と Fig.13 に、諸元を



Fig. 13 Photographs of various parts of LIBRA-I



*The numbers represent the time (mm:ss).

Fig. 14 Actual image of the experiment

Table 1 に示す。水平搬送距離 4.0[m], 全 5 自由度の冗長自由度を持ちながら, アーム部 (水平展開アーム・2 自由度関節・V 字展開アーム) の設計質量はわずか 11[kg] と著しく軽量に構成できていることがわかる。Fig.12 に示すように, 実験時の視認性を上げるため, リンク側面には赤色の LED テープを貼り付けている。また, 質量可変カウンタウェイトである水袋については, 給水時に緑, 排水時に青の LED が点灯するようにしている。

4.2 アーム動作

試作した LIBRA-I を用いて東京工業大学のモックアップ実験施設で動作実験を行った。運搬は主に台車を用いて人力で行い, 実験施設の上部に運ぶ際のみクレーンを用いた。吊り下げパイプは実験施設の上部に固定して, アーム機構の動作を確認した。実験の様子を Fig.14 に示す。実験ではアームが鉛直になり下がった状態 (00:00) から, 全関節の角度が 0[deg] となる水平に展開した状態 (08:13) に遷移させることに成功した。また Fig.6 のような J3 が 60[deg], それ以外の関節が 0[deg] となる,



Fig. 15 Video captured by the camera attached to LIBRA-I

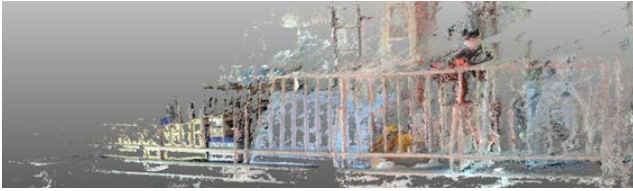


Fig. 16 3D model reconstructed by MVS(COLMAP_ROB)

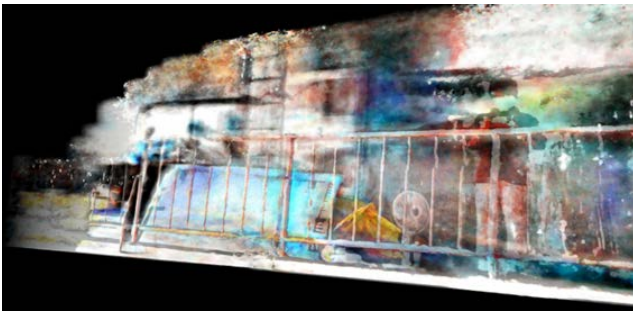


Fig. 17 3D model reconstructed by NVS(instant-ngp)

横方向に伸びた姿勢なども可能であることを確認した (12:23). また, Fig.14 には掲載していないが, 水平展開状態で J1 と J2 を $-10[\text{deg}]$ から $10[\text{deg}]$ の範囲において自由に動かせることも確認した. 展開した状態から再びアームを折りたたんで鉛直に吊り下がった状態に戻す, Fig.14 の逆の動作も成功した. 01:43 の姿勢から水平に展開して再びその姿勢に戻るまでの所要時間は約 17 分間であった.

4.3 先端のカメラによる撮影と 3D モデルの生成

動作実験の際, 計測機器として模型用サーボモーターにより撮影方向を能動的に変化できるようにした Web カメラを先端に取り付けて撮影を行った. この計測機器の質量は約 $450[\text{g}]$ であり, LIBRA-I の設計上のペイロードと同程度である. 撮影した動画 (Fig.15) から 3D モデルを生成することにも成功した. 生成したモデルを Fig.16 と Fig.17 に示す. 生成方法は以下の通りである.

1. 動画から 223 枚の画像 (解像度 $1280 \times 720 \text{ px}$) をランダムに抽出した.
2. Structure from Motion (SfM) [10] によりスパース再構成を行い, カメラ軌跡の推定とスパースモデルの作成を行った.
3. さらに密なモデルにするための再構成を行った.

2. については, 3 次元モデリングソフトウェア COLMAP を用いた. 3. では 2 通りの手法を用いた. 1 つ目は Multi-View Stereo (MVS) [11] であり, COLMAP_ROB というソフトウェアを用いて行った. 2 つ目は深層学習を用いた構成手法の Novel

Table 2 Target joint position and power consumption in static

Time (mm:ss)	Target Position[deg]					Power consumption[W]
	J1	J2	J3	J4	J5	
00:00	0	90	0	0	-165	15.8
01:43	0	90	165	-165	-165	23.5
03:19	0	0	165	-165	-165	17.2
05:40	0	0	0	0	-90	16.0
08:13	0	0	0	0	0	17.0
12:23	0	0	60	0	0	17.0

View Synthesis (NVS) [12] であり, ソフトウェア instant-ngp を用いて行った. 両者とも 3D データの再構成に成功していることがわかる. NVS は MVS に比して極めて計算速度が速く, またより詳細に再構成できたが, 一方で霧のようなノイズも見られる. 両手法の詳細な比較については別報を参照されたい [13].

4.4 消費電力の測定

ロボットが静止している時の消費電力の測定も行った. 測定はスマートアクチュエータ 5 台と先端のカメラを駆動する模型用サーボモーター 3 台に接続されている電源線の電圧と電流を計測することにより行った. 電圧計測はアナログ電圧入力可能なデータロガーを用いて, 電流計測は電流プローブおよび電流プローブ増幅器をデータロガーに接続して行った. 結果を Table 2 に示す. 測定した姿勢の中で, 最小値は $15.8[\text{W}]$, 最大値は $23.5[\text{W}]$ であり, 極めて低い消費電力に抑えられていることがわかる. 01:43 の姿勢では, 重力に抗ってアームの姿勢を保持するために, 特に J3 の関節駆動トルクが大きくなったため, 消費電力が大きくなった. 0:00 の直線状の姿勢では, 先端の J5 のみが重力に抗ってトルクを発生しているため, 消費電力が小さくなった. 08:13 の水平展開の姿勢では, カウンタウェイトの効果により 0:00 と大きく変わらない消費電力となっている. ただし, カウンタウェイトでバランスしきれなかったトルクを受け持つために 2 自由度関節の駆動トルクがわずかに発生し, J5 についても重力に抗うトルクが増加した影響で, 消費電力は 0:00 より大きくなった.

5. おわりに

5.1 本論文で達成した事項

本論文では福島第一原発の MSIV 室の探査を目標として設計試作した長尺多関節アーム LIBRA-I の開発について議論した. 水平展開アームと 2 自由度関節を組み合わせたロボット構成と, 質量可変カウンタウェイトの採用によって, 小径孔を鉛直に通過でき, 孔の軸線方向と直角に計測機器を搬送できる, 軽量で細径なロボットアームが設計できることを示した. 実際に試作し動作実験を行うことで, 提案したアームの機構が実現可能であることを示した. 本論文で達成した事項を以下にまとめる.

- 水平搬送距離 $4[\text{m}]$, 通過可能孔径 $300[\text{mm}]$, アーム部の設計質量 $11[\text{kg}]$, 全 5 自由度となるロボットアームを設計試作した.
- 鉛直方向に吊り下がった状態から水平展開する動作を行わせることができた.
- 目標タスクである計測機器の搬送を達成し, カメラによる撮影により周囲環境の 3D モデルを作成することに成功した.
- 静止時の消費電力が十分に低いことを確かめた.

5.2 今後の課題

今後の課題は以下の通りである.

1. 耐放射線性能の確保

2. 直径 300[mm] の小径孔を通過可能であることを実証する実験の実施
3. ベイロードの向上
4. 水平展開アームのリンク部材のたわみの変動に応じて 2 自由度関節の目標角度を決定する制御の実装とその実証実験
5. パイプ駆動ユニットと吊り下げパイプの連結機能の詳細検討
 1. については、実際の調査に向けて、特にスマートアクチュエーターの耐放射線性能を検討し、必要であれば対策を施す。
 2. についても本論文では実証実験を行っていないため、アクセス口を模したパイプなどを使った動作実験を行うことで、問題なく動作が可能か確かめる必要がある。現状では特に 2 自由度関節周りのチューブや水袋が孔の通過時に引っ掛かる可能性がある。もしこれが起こる場合、チューブ配置の改善や孔通過時に水袋が広がらないようにする機構の追加などの対策が必要となる。
 3. については、LIBRA-I の設計上の仕様 450[g] は、今後さらに重い計測機器を使用する場合や、手先作業を行おうとする場合には不足する可能性があることから、水平展開アームの関節を両持ち構造にするなどの検討が必要である。
 4. に関して、本論文では水平展開アームが水平状態で動作する際、2 自由度関節の目標角度に 0[deg] の一定値を与えて位置制御を行っていた。今後はリンク部材のたわみの変動に応じてロールとピッチの目標角度を決定する制御を実装し、有効性を検証していく。
 5. は LIBRA-I では検討していない項目であるが、MSIV 室の調査には必要と考えられる機能であるため、今後検討を進めていく。

謝辞 実験実施の際には、守家岳志様、安井和哉様をはじめとする、東京工業大学大学院機械系木倉研究室の学生・スタッフの方々にご多大なるご支援を頂きました。謹んで感謝申し上げます。本研究は TEPCO 廃炉フロンティア技術創成協働研究拠点の活動の一部として実施されました。

参考文献

- [1] 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉格納容器内部調査装置を開発, <https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2017/12/news-20171222-01.html>.
- [2] J. S. Mehling, M. A. Diftler, M. Chu and M. Valvo: "A Minimally Invasive Tendril Robot for In-Space Inspection", The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, pp.690–695, 2006.
- [3] J. Fukuda, M. Konyo, E. Takeuchi and S. Tadokoro: "Remote vertical exploration by Active Scope Camera into collapsed buildings", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1882–1888, 2014.
- [4] 清水建設など、廃炉調査にヘビ型ロボ - がれきの隙間進入, <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/427019>.
- [5] Y. Perrot, L. Gargiulo, M. Houry, N. Kammerer, D. Keller, Y. Measson, G. Piolain and A. Verney: "Long-reach articulated robots for inspection and mini-invasive interventions in hazardous environments: Recent robotics research, qualification testing, and tool developments", Journal of Field Robotics, vol.29, no.1, pp.175–185, 2012.
- [6] B. Haist, S. Mills and A. Loving: "Remote handling preparations of JED EP2 shutdown", Fusion Engineering and Design, vol.84, pp.875–879, 2009.
- [7] IRID R&D topics Detailed investigation inside PCV of Fukushima Daiichi NPS Unit 2, and verification test for access and investigation equipment for fuel debris test retrieval at Kobe Shipyard & Machinery Works Kobe Plant, MHI, Ltd., <https://irid.or.jp/en/topics/>.
- [8] 遠藤玄, 高田敦, 堀米篤史: "ワイヤ干渉駆動型超長尺多関節アーム Super Dragon の開発", 日本機械学会論文集, vol.85, no.875, p.19-00075, 2019.

- [9] 若林陽輝, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄: "バンドルドワイヤドライブを用いた長尺軽量ロボットアームの開発 第 2 報: 関節軸構成を変更可能なワイヤ駆動機構", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol.2020, p.1P2-K06, 2020.
- [10] J. L. Schönberger and J. M. Frahm: "Structure-from-Motion Revisited", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.4104–4113, 2016.
- [11] J. L. Schönberger, E. Zheng, J. Frahm and M. Pollefeys: "Pixel-wise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo", European Conference on Computer Vision, 2016.
- [12] T. Müller, A. Evans, C. Schied and A. Keller: "Instant Neural Graphics Primitives with a Multiresolution Hash Encoding", arXiv preprint arXiv:2201.05989, 2022.
- [13] Z. Wang, G. Endo, H. Takahashi and H. Kikura: "Robustness Comparison of Vision-Based Investigation Methods with a Wire Drive Flexible Manipulator", ROBOMECH Journal (Submitted).

後藤優斗 (Yuto Goto)

2023 年東京工業大学大学院機械系学士課程修了。2023 年 (株) セガ入社。2023 年日本ロボット学会第 13 回ロボティクスシンポジウム研究奨励賞を受賞。ロボットおよびメカトロニクス機器の機構と制御に興味を持つ。LIBRA-I の機構設計と制御設計を担当。学士 (工学)。 (日本ロボット学会学生会員)

遠藤玄 (Gen Endo)

2000 年東京工業大学機械物理工学専攻博士課程修了。2000 年ソニー (株) 入社。2007 年東京工業大学理工学研究科特任助教を経て、2008 年同大機械宇宙システム専攻助教。2014 年東京医科歯科大学生体材料工学研究所准教授、2015 年東京工業大学機械宇宙システム専攻 (現工学院) 准教授。2020 年同教授。ロボット機構の研究開発に従事。博士 (工学)。 (日本ロボット学会正会員)

汪振宇 (Zhenyu Wang)

2017 年上海交通大学機械工程及自動化系学士課程修了。同年文部科学省国費外国人留学生として東京工業大学大学院機械系博士前期課程に入學。2019 年同前期課程を修了し同後期課程入學。2023 年同後期課程修了。画像情報を用いたロボットの自己位置同定や環境地図作成に興味を持つ。博士 (工学)。

高橋秀治 (Hideharu Takahashi)

2011 年東京工業大学原子核工学専攻博士課程修了。2011 年東京工業大学原子炉工学研究所 (現ゼロカーボンエネルギー研究所) 研究員。2017 年同大科学技術創成研究院特任助教。2019 年同大科学技術創成研究院助教。2022 年同大工学院機械系准教授。原子力工学、スマート農業工学関連等の研究開発に従事。博士 (工学)。

木倉宏成 (Hiroshige Kikura)

1992 年慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程修了。1993 年慶應義塾大学理工学部訪問研究員。1993 年ドイツ・エアランゲン-ニュールンベルク大学流体工学研究所・訪問研究員。1997 年スイス国立パウル・シェラー研究所・研究員。1998 年東京工業大学原子炉工学研究所助手。2009 年同大原子炉工学研究所准教授。2021 年同大ゼロカーボンエネルギー研究所准教授。原子力熱工学、ロボット計測機器の研究開発に従事。博士 (工学)。