T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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.			

学術・技術論文

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

後 藤 優 斗* 藤 汪 宇* 遠 玄* 振 橋 秀 治* 木 倉 宏 成* 高

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 naarrow 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 にも開発されてきた.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

不示⊥未八子 *T-1

^{*}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.

 $\mathbf{2}$

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 ±45[deg] の可動域を持つピッチ軸と ±90[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る長尺アー 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,まずロボットの大まかな構成につ 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ェイトが接続されて いる.カウンタウェ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部に 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 アクセスロへ通される.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ェイトを用いて Joint A のトルクを補償する(Fig.3 (4)(5)).そしてカウンタウェ 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 セスロを降下したのちに,大空間内を探査することができる.

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 自由度カウンタウェイ 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 Configration of LIBRA-I and part names

は能動関節である.J1 (Roll) には ±10[deg],J2 (Pitch) に は –10[deg] から 90[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ェイトとなり, 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査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と効果については、2 点が挙げられる。
 第一に、J2 の 0[deg] から 90[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自由度カウンタウェイト

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

まず,2.3 で述べたように,カウンタウェイトがあることで 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な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,カウンタウェイトは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つのカウンタウェ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ェイトがあることで,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 スロ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. カウンタウェ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



 ${\bf Fig. 7} \quad {\rm Detail \ view \ of \ J3}$

できると期待される.カウンタウェイトを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



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 クセスロを鉛直に通るとき(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.



 ${\bf Fig. 10} \quad {\rm Configration \ for \ 1-DoF \ of \ the \ counterweight \ system \ that \ adjusts \ the \ volume \ of \ water \ in \ water \ bags }$

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 ンプを通って下水道に流れてしまうことがないよう,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	$\pm 10[\text{deg}]$
Range of motion of J2	$-10 \sim 90[\text{deg}]$
Range of motion of J3, J4, and J5	$\pm 170[\text{deg}]$
Power Voltage of a Smart Actuator	DC 24[V]
Rated Continuous Current of a Smart	0.8[A]
Actuator	
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

 $\mathbf{6}$



and Water Tube



2-DoF Joint and Balancing V-shaped Arm

Water Bags

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つ 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[deg] から10[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[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 × 720 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 possition and power consumption in static

Time		Tore	ot Do	Dowow		
1 line		Targ	get PO	Power		
(mm:ss)	J1	J2	J3	J4	J5	consumption[W]
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が 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[W], 最 大値は 23.5[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[m],通過可能孔径 300[mm],アーム部の設計質量 11[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

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. ペイロードの向上

- 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 スロ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、東京工業大学工学院機械系木倉研究室の学生・スタッ フの方々に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 Biomechatronics, 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: "Pixelwise 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).



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)



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,

スマート農林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具
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
由京工業大学原子恒工学研究所助手 2000 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).