

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	小径孔を通過可能な内部調査用多関節アームの開発
Title(English)	Development of 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)	ロボティクスシンポジア予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2023, 3
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人 計測自動制御学会に帰属します。 Copyright (c) 2023 The Society of Instrument and Control Engineers.

# 小径孔を通過可能な内部調査用多関節アームの開発

後藤 優斗<sup>\*1</sup> 遠藤 玄<sup>\*1</sup>, 汪 振宇<sup>\*1</sup>, 高橋 秀治<sup>\*1</sup>, 木倉 宏成<sup>\*1</sup>

## Development of a Lightweight Balanced Robot Arm for an Internal Investigation through a Narrow Hole

Yuto GOTO<sup>\*1</sup>, Gen ENDO<sup>\*1</sup>, Zhenyu WANG<sup>\*1</sup>,  
Hideharu TAKAHASHI<sup>\*1</sup> and Hiroshige KIKURA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Tokyo Institute of Technology 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550 Japan

There is a need for technology to investigate the large space beyond a narrow hole such as the 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. To meet these requirements, a robot configuration combining a horizontally extending arm and a 2-DoF joint, and a variable mass 2-DoF counterweight were adopted. As a result, LIBRA-I has a horizontal reach of 4m, a passable hole diameter of 300mm, a mass of 11kg for the arm, and 5-DoF. As an experiment, LIBRA-I successfully performed a horizontal extension motion from a vertically suspended condition.

**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や洞窟など、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。例えば、福島第一原子力発電所のMSIV室の探査が挙げられる。この探査では、垂直にあいた孔からアクセスしたのちに、カメラなどの計測機器を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。

**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としては、NASAのTendrillロボット<sup>(1)</sup>や、能動スコープカメラ<sup>(2)</sup>などが存在するが、これらのロボットではMSIV室の調査は難しい。

**1.3 設計要件** 筆者らはMSIV室の探査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、水平に搬送できる。
- スタック回避のため、環境と接触しない。
- 障害物を回避できる十分な自由度を持ちつつ、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、軽量である。
- 静止時には消費電力を小さく抑える。

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、5自由度の軽量バランス型ロボットアーム「LIBRA-I」(図1)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 基本コンセプト** 設計要件を達成するため、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。
- 能動関節にはアクチュエータを直接取り付け。
- 剛性の低さを許容する構成として、軽量化を図る。
- 能動関節の駆動トルクを低く抑えることで、アクチュエータを軽量かつコンパクトなものとする。駆動トルクを低くするための方針を以下に示す。
- 水平搬送は水平展開アームによって行う。
- 質量可変カウンタウエイトにより姿勢保持のための関節駆動トルクを補償する。

**2.2 詳細な構成** LIBRA-Iの構成を図2に示す。2自由度関節と質量可変2自由度カウンタウエイトを採用することで、関節駆動トルクの低減と、吊り下げパイプに負荷される曲げモーメントの低減を狙っている。

<sup>\*1</sup> 東京工業大学 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)  
goto.y.ao@m.titech.ac.jp

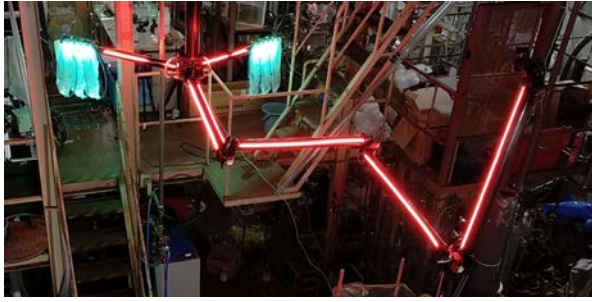


Fig. 1 Prototyped long articulated arm "LIBRA-I"

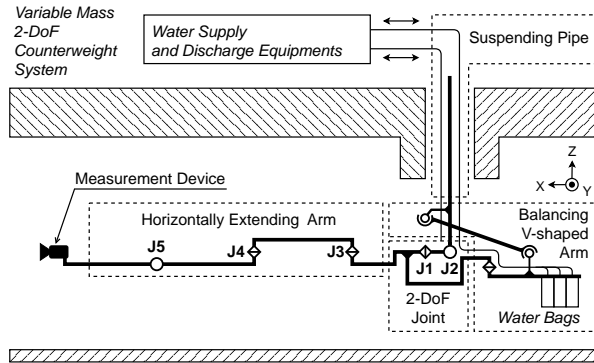


Fig. 2 Configuration of LIBRA-I and part names

### 3. 機構設計

**3.1 水平展開アーム** 能動関節には、トルクセンサやギアードモータが一体となった製品であるスマートアクチュエータの HEBI Robotics 社製 X-Series Actuators X8-16 を採用した。4つの約 1m のリンクは、直径 60mm, 肉厚 1mm の CFRP パイプとした。

**3.2 2 自由度関節** 水平展開アームと同様の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アームである。アクセス口を鉛直に通るときには直線状の格納姿勢となっているが、アームが水平になるときは受動的に V 字に展開する機構を備えている。これは V 字の根元の受動回転関節 2 つと、両端にボールジョイントのついたロッド 2 本で実現した。

**3.4 質量可変 2 自由度カウンタウェイトシステム** 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。給水は上水道から電磁弁を通じて行い、排水はポンプで吸い上げて下水道へ流すことで行う。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。

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	$\pm 10$ deg
Range of motion of J2	$-10 \sim 90$ deg
Range of motion of J3, J4, and J5	$\pm 170$ deg

### 4. 動作実験

**4.1 仕様** 試作した LIBRA-I の諸元を表 1 に示す。水平搬送距離 4.0m, 全 5 自由度の冗長自由度を持ちながら、アーム部の質量はわずか 11kg と著しく軽量に構成できていることがわかる。

**4.2 アーム動作** 試作した LIBRA-I で動作実験を行い、アーム機構の動作を確認した。実験では 8 分程度でアームが鉛直につり下がった状態から水平に展開した状態へ遷移させることに成功した。横方向に伸びた姿勢や逆の動作も可能であった。

**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 Web カメラを先端に取り付けて撮影を行った。撮影した動画から SfM を用いて 3D モデルを生成することにも成功した。

**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。測定した姿勢の中で、最小値は 15.8W, 最大値は 23.5W であり、極めて低い消費電力に抑えられていた。

### 5. おわりに

本論文では、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、孔と直角に計測機器を搬送できる、軽量のロボットアームが設計できることを示した。また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。今後は実際の調査に向けて実験と改善を行う。

### 参考文献

- (1) 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*, (2006), pp.690-695.
- (2) 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*, (2014), pp.1882-1888.