

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	内部調査用多関節アームLIBRA-Iの高ペイロード化検討
Title(English)	Enhancing the payload Capacity of Lightweight Balanced Robot Arm "LIBRA-I"
著者(和文)	楠佳泰, BRICE Christian Percy, 有賀嵩紘, 高橋秀治, 木倉宏成, 遠藤玄
Authors(English)	Keita Kusunoki, Christian Percy BRICE, Takahiro Aruga, Hideharu Takahashi, Hiroshige Kikura, Gen Endo
出典(和文)	第26回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 12
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。 (c) 2025 The Society of Instrument and Control Engineers

内部調査用多関節アーム LIBRA-I の高ペイロード化検討

○楠 佳泰 (東京科学大学), Christian Brice (東京科学大学), 有賀 嵩紘 (東京科学大学),
高橋 秀治 (東京科学大学), 木倉 宏成 (東京科学大学), 遠藤 玄 (東京科学大学)

Enhancing the payload Capacity of Lightweight Balanced Robot Arm "LIBRA-I"

○ Keita KUSUNOKI (Science Tokyo), Christian BRICE (Science Tokyo), Takahiro ARUGA (Science Tokyo), Hideharu TAKAHASHI (Science Tokyo), Hiroshige KIKURA (Science Tokyo), and Gen ENDO (Science Tokyo)

Abstract: As the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station – damaged in the Great East Japan Earthquake – continues, a detailed investigation of the Unit 3 main steam isolation valve (MSIV) room is required. Tokyo Electric Power Company Holdings (TEPCO) requires the use of a long-reach robotic arm because human workers cannot enter this area due to high radiation. We previously proposed LIBRA-I with a payload capacity of 0.45 kg. However, to conduct a thorough investigation of the MSIV room, TEPCO suggested a target payload of 5.0 kg to accommodate some equipment. We hypothesize that the low payload capacity of LIBRA-I is due to its arm joint design. To tackle this, we redesigned the joints such that the load is supported by the joint structure rather than the actuator which drives it. This paper presents the design and prototyping of the new joint. Also, we confirmed an improvement in payload capacity and measured the relationship between moment and arm deflection through experimentation.

1. 緒言

廃炉作業中の福島第一原子力発電所の作業エリアは放射線量が高く、また、干渉物等により狭隘である。そのため、作業エリアに隣接する低線量エリアからアクセスするニーズがあり、小径孔を通過し、その先の空間を調査するロボットが有効である。具体的な作業エリアとして、主蒸気隔離弁 (Main Steam Isolation Valve, MSIV) 室の内部が挙げられる。MSIV 室内は放射線量が高く、人による長時間の作業ができない状態である。しかし、MSIV 室の上階には線量の低い空調機械室があり、その床に直径 300 mm の小径孔を開け、ロボットによりアクセスすることを考えている。東京電力ホールディングス株式会社は現在までに、上階からパンチルトカメラを吊り下げることで水の漏洩を確認している¹⁾が、より広範囲の調査と、可能であれば止水することまでも含めてロボットで作業することが望まれている。これらの仕様を満たすロボットとして、LIBRA-I²⁾が開発されている。ロボットアームの実現可能性を確かめるために、手先ペイロードを 0.5 kg と仮定して開発が進められたが、実際の廃炉関係者からのヒアリングでは 5 kg 程度までの高ペイロード化が望ましいとコメントを得た。

本稿では、LIBRA-I のペイロードが限定されている理由は、各リンクを接続する関節部にあると考えた。そこで、本稿の目的は、関節部分の部品の設計を改良し、試作機による実験を通して、ペイロードの向上を確かめることを目的とする。

2. LIBRA-I の設計改良

2.1 廃炉作業用長尺ロボットアームの先行研究

福島第一原子力発電所の格納容器内にある燃料デブリを回収するために、ワイヤ干渉駆動型長尺多関節アーム "Super Dragon"³⁾ やワイヤ駆動と空圧駆動を用いた "Truss Arm"⁴⁾ が開発されている。しかし、MSIV 室

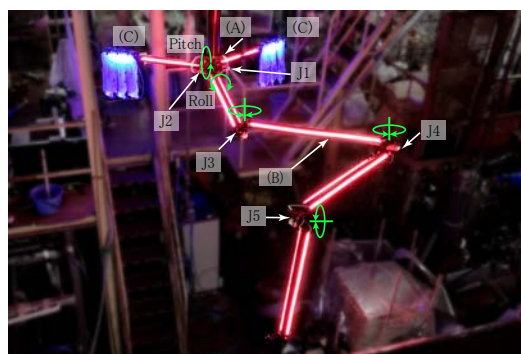


Fig. 1 LIBRA-I

調査用のロボットにおいては MSIV 室の上階まで各部品を運搬後組み立てを行う想定であるが、ワイヤ駆動ロボットでは質量が大きいことや張力の調整が必要になるなど、人による運搬や現地での組み立てが困難であるという課題がある。

2.2 LIBRA-I の仕様

開発された LIBRA-I を Fig. 1 に示す。LIBRA-I は、アームをピッチ方向、ロール方向に姿勢を変更する (A) 2 自由度関節 (J1, J2)、平面 3 自由度を持つ長さ 4 m の (B) 水平展開アーム (J3, J4, J5)、2 自由度関節の駆動トルクを最小化するために、アーム後端に設置された 2 つの (C) 質量可変カウンターウエイトによって構成されている。各リンクは減速機付き DC アクチュエータ (HEBI Robotics, X8-16) によって駆動される。また、アクチュエータのトルクを計測し、常に J1, J2 のトルクがゼロになるように、左右のカウンターウエイトの質量を内部の水量で調節している。そのため、小型のアクチュエータを採用することができ、既存の LIBRA-I の質量は 17 kg と軽量である。さらに、各リンクが独立のアクチュエータで駆動されるため、分解組立が容易

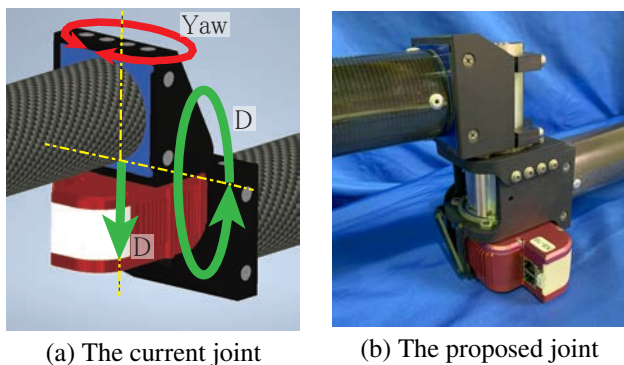


Fig. 2 Arm joint, in its current and proposed configuration

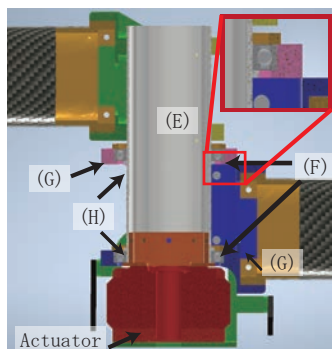


Fig. 3 The cross-section diagram of the proposed joint

である。

2.3 LIBRA-I の課題

従来の LIBRA-I の手先ペイロードは 0.45 kg となるように設計されている。既存の水平展開アームの関節の拡大図を Fig. 2(a) に示す。この関節では、アクチュエータの出力軸に直接リンクが接続される構造となっている。このような設計になっているのは、部品点数を少なくし、機構を簡単にするためである。しかし、LIBRA-I 試作後に廃炉作業の関係者らからは、MSIV 室内部の詳細な調査において、カメラや放射線量計など高質量な計測機器を搭載するために、手先ペイロードを 5 kg ほどまで向上させたいとの要望があった。既存の設計では、アームとペイロードにはたらく重力やこれに起因する自重モーメントが Fig. 2(a) の矢印方向 (D) に、アクチュエータの出力軸に負荷されるため、アクチュエータの許容曲げモーメント荷重によって手先ペイロードが制限されてしまう。具体的には、アクチュエータの最大許容モーメントは 55.6 Nm である⁵⁾ ため、手先ペイロードが 0.45 kg に制約されている。

2.4 LIBRA-I の関節改良設計

ペイロード向上を目的として、アームとペイロードにはたらく重力と自重モーメントをアクチュエータに負荷させないために、関節部の設計を改良した。改良後の関節の全体の写真を Fig. 2(b) に、断面図を Fig. 3 に示す。新たに設計した関節では、アームを保持するためのモーメントを (E) 大口径薄肉ステンレスパイプで受け、そのパイプを (F) 2つの軸受と (G) A7075 製の部品で構造的に保持している。また、Fig. 3 の拡大図のように、パイプに (H) フランジを設けて軸受の内輪と接触させることで、軸に軸方向の力が加わってもアクチュエータがその力を受けない。このように、設計を改良することによって、部品点数、質量は増加したが、

Table 1 Weight equivalent to payload

payload	Weight equivalent to payload	The moment applied to J3
0.50 kg	8.73 kg	77.0 Nm
1.0kg	10.31 kg	91.0 Nm
1.5 kg	11.89 kg	105.0 Nm
2.0 kg	13.48 kg	118.9 Nm



Fig. 4 Experimental setup for verification of payload improvement

荷重を構造的に支えることでペイロード向上を図った。

3. ペイロード向上の実証実験

3.1 実験方法

前章で述べた関節部の改良によるペイロード向上について、1 節のリンクと新たに設計した関節を用いて検証する。実験は Fig. 4 のように、基台に根元側のリンクを固定し、先端側にペイロードを付加する。また、今回の実験では LIBRA-I と同じ 0.9 m のリンクを使用している。Fig. 1 の水平展開アームの関節 J3, J4, J5 のうち、アームを直線状にしたときに J3 に加わる、曲げ方向のモーメントが関節部に生じるモーメントの最大値になる。したがって、J3 に加わるモーメントに十分な強度、剛性があると確認できれば、LIBRA-I のペイロードを向上させることが可能であると言えると考えた。今回の実験では、LIBRA-I の手先にペイロード 0.50 kg, 1.0 kg, 1.5 kg, 2.0 kg を付加したときに J3 に加わるモーメントと等価のモーメントを生み出すおもりをリンク先に取り付ける。各おもりを取り付けた後、どの程度リンク先端の位置が変化したのか計測する。また、ペイロードを付加した状態でアクチュエータを動作させることができるか確認するため、アームを直線状の状態からアクチュエータを 1.5 rad 回転させ、再度直線状に戻す。リンク先端の変位の計測にはレーザー距離計 (株) マキタ, LD030P) を用いて、地面からアームの下部までの距離を測定した。実験において、想定する LIBRA-I のペイロード、ならびにそのペイロード条件と等価なモーメントを J3 に発生させるために使用したおもりの質量を Table 1 に示す。

3.2 実験結果

実験した結果、LIBRA-I でのペイロード 2.0 kg に相当するおもりを吊り下げてもアクチュエータが動作することを確かめることができた。13.48 kg のおもりを取り付けた際の実験の様子を Fig. 5 に示す。本実験装置において、関節部にはたらくモーメントがアクチュ

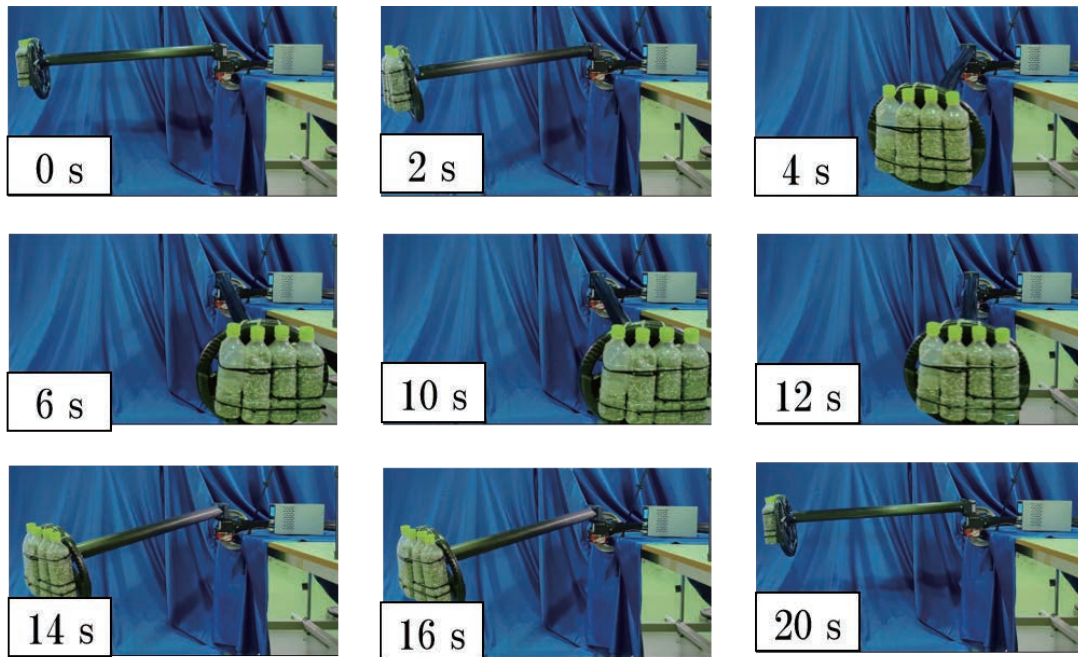


Fig. 5 Experiment with a 13.48 kg payload

エータの許容モーメント荷重 55.6 Nm を超過するのは、おもり質量が 6.3 kg を超えたときである。本実験では、この質量以上のおもりを付加した場合でもアクチュエータが破壊されなかったことから、荷重をアクチュエータではなく構造で支えられていることが確認できた。

また、吊り下げたおもりの質量とリンク先の変位の関係は Fig. 6 のようになった。得られたデータから最小 2 乗法を用いて計算すると、今回の実験の範囲ではおもり質量を 1.0 kg 増加させると、つまり、関節に 8.8 Nm のモーメントを負荷すると 0.9 m のリンクの先端が 4.2 mm 変位することがわかった。この結果から、LIBRA-I に手先ペイロード 5.0 kg を付加したときの、LIBRA-I の手先位置の変位量を求める。LIBRA-I のアームを直線状にし、手先にペイロード 5.0 kg を付加させたときに J3, J4, J5 にはたらくモーメントは、それぞれ 203 Nm, 117 Nm, 45.2 Nm である。したがって、関節位置と手先位置の変位を計算すると、アームを直線状にしたとき手先位置は 174 mm 変位すると求められた。

この実験により LIBRA-I で 2.0 kg のペイロードを付加させたときの J3 に加わるモーメントを再現し、アクチュエータによってアームを動作させることができた。したがって、実際の LIBRA-I でのペイロード向上が可能であると考えられる。また、今回の実験によって、おもりの質量とアームのたわみ量の関係が明らかになった。

4. 結言

本稿では、LIBRA-I のペイロード向上のため、関節部の設計を見直し、アクチュエータに荷重が加わらない設計に変更した。2 リンクを用いた実験では、LIBRA-I にペイロード 2.0 kg を付加したときに関節 J3 に加わるモーメントと等価なモーメントを関節部に加え、アクチュエータが問題なく動作することを確認した。そのため、LIBRA-I の関節を新しく設計した関節に置き換えることによって、LIBRA-I のペイロードを向上さ

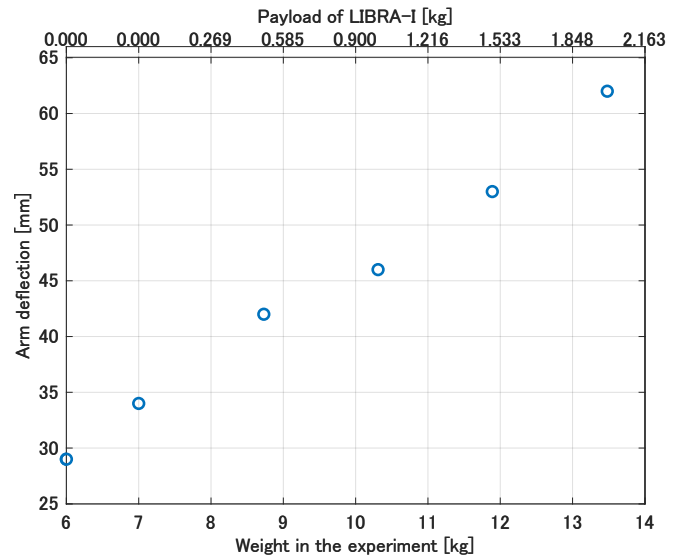


Fig. 6 Arm deflection

せられると考えている。また、関節に付加したモーメントの大きさによって、アーム先がどの程度変位するのか計測することができた。今後の課題としては、さらにペイロードを向上させるとともに、得られたデータによって、アームのたわみを予測し、所望の手先位置やロボット姿勢を低トルクで実現するためのカウンターウェイト質量の調整手法を開発することなどを検討している。

5. 謝辞

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環として実施されました。

参考文献

- [1] 東京電力ホールディングス株式会社: 福島第一原子力発電所 3 号機 MSIV 室内の調査結果について, Accessed on 25.08.2025, (2022), URL: <https://www.tepcoco.jp/>

co.jp/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2022/1h/rf_20220610_4.pdf.

- [2] 後藤優斗, 遠藤玄, 汪振宇, 高橋秀治, 木倉宏成: LIBRA-I: 小径孔を通過可能な内部調査用軽量多関節アーム, 日本ロボット学会誌 42 巻 2 号, pp. 128–176 (2024).
- [3] 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 85 巻 875 号, pp. 19–75 (2019).
- [4] 白山工業株式会社: 開発事例, Accessed on 27.08.2025, URL: https://www.hakusan.co.jp/research_and_development/hero_works.html.
- [5] HEBI Robotics: Technical Documentation, Accessed on 09.09.2025, URL: <https://docs.hebi.us/hardware.html#x-series-actuators>.