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)	ワイヤ干渉駆動型超長尺多関節アームSuper Dragonの開発
Title(English)	Development of a super long reach coupled tendon-driven manipulator “ Super Dragon ”
著者(和文)	遠藤玄, 高田敦, 堀米篤史
Authors(English)	Gen Endo, Atsushi Takata, Atsushi Horigome
出典(和文)	日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 875, p. 19-00075
Citation(English)	Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 85, No. 875, p. 19-00075
発行日 / Pub. date	2019, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

ワイヤ干渉駆動型超長尺多関節アーム Super Dragon の開発

遠藤 玄 [*1]，髙田 敦 [*2]，堀米 篤史 [*3]

Development of a super long reach coupled tendon-driven manipulator “Super Dragon”

Gen ENDO[*1], Atsushi TAKATA[*2] and Atsushi HORIGOME[*3]

[*1, *2] School of Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan
[*3] Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

Received: XXXX; Revised: XXXX; Accepted: XXXX

Abstract

The decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants is a national urgent problem in Japan. The distribution and characteristics of the fuel debris inside the nuclear reactor must be investigated to safely retrieve them. This study describes a 10 m-long articulated manipulator for investigation inside the primary container vessel. We employed a coupled tendon-driven mechanism and a gravity compensation mechanism using synthetic fiber ropes to design a lightweight and slender articulated manipulator. After discussing the basic principle and control algorithm, we focus on the detailed mechanical design of a prototype model. We confirmed its feasibility through basic motion experiments.

Keywords : Long reach articulated manipulator, Coupled tendon-driven mechanism, Synthetic fiber rope

1. 緒　　言

福島第一原発の廃止措置は国家的喫緊の課題である．１～３号機にはそれぞれ 100 トン以上の燃料デブリが解け落ちた状態で残っていると推定されている．2017 年に国際廃炉研究開発機構（IRID）と東芝は，小型の水中 ROV を用いて初めて格納容器（Primary Containment Vessel, PCV) 内の燃料デブリの映像を取得することに成功した（IRID, 2017a）．内部状態は徐々に明らかになりつつあるが，燃料デブリの分布状況やその性状をより深く理解するためには，さらなる調査活動が必要である．

超長尺のリーチを持つマニピュレータは PCV 内部調査や，将来的な燃料デブリ取り出しに対して有効であると，筆者らは考えている．実際，IRID と三菱重工業は燃料デブリおよび PCV 内部構造物の取り出しを目的とした，巨大な 6 自由度油圧マニピュレータ（PA-2000）を試作した（IRID, 2017b）．アーム全長 7.1m，全質量は 3500kg であった．手先での発生力は 2000kgf と非常に大きな力であるが，一方，その大きさと質量ゆえ，現場への搬入・設置などを考えると長い工期が必要であろう．

本論文の目標タスクは，最大 10kg の計測装置を可搬し，PCV 内部を調査することである．PCV の大きさを考慮して最大リーチ長を 10m と設定した．PCV 内部からの放射性物質の漏洩を防ぐ観点から，PCV 内にアクセスするための穴は小さいほど望ましいため，アーム直径は可能な限り最小化する．

No.19-00075 [DOI: 10.1299/transjsme.19-00075]
[*1] 正員，東京工業大学工学院（〒 152-8552　東京都目黒区大岡山 2-12-1）
[*2] 東京工業大学工学院
[*3] 東京工業大学大学院理工学研究科

E-mail of corresponding author: endo.g.aa@m.titech.ac.jp

長尺多関節マニピュレータは過去にもいくつか開発されている．国際熱核融合炉（ITER）を維持メインテナンスするために，JET-EFDA は Octant 1 と名付けた全長 8m, 水平展開型の遠隔ハンドリングシステムを開発した（Haist et al., 2009）（Snoj et al., 2013）（Culham, 2009)．Octant 1 は 6 つのリンクを 5 つのヨー軸回転関節で直鎖上に連結した構造をもつことから，手先ペイロード 100kg を機構的に支えることが出来る．すべてのアクチュエータは各関節に装備されているため，全質量は 7000kg 程度と見積もられ，非常に大きい．

CEA LIST は全長 8.2m，直径 160mm，手先ペイロード 10kg の 5 節からなる多関節マニピュレータを開発した（Perrot et al., 2012）．各節はピッチ軸・ヨー軸の 2 自由度関節を有するため，全部で 10 自由度の構成である．各ピッチ軸関節には，四節リンク機構とバネによる自重補償機構が導入されているが，各軸を駆動するためのアクチュエータは Octant1 と同様，節内に装備されている．自重補償機構の効果によりアクチュエータは小型化されたが，それでもなお各節の質量は 30kg であり，架台を含まないアーム部のみの合計質量は 150kg となった．

筆者らの研究グループでは，全長 20m の風船型多関節マニピュレータを開発した（Takeichi et al., 2017）．本ロボットはヘリウムガスを円筒形の風船に封入することで浮力により自重を補償するとともに，各関節間には本研究グループで開発した細径空圧人工筋を拮抗配置することで屈曲する．アーム全質量はわずか 1.2kg であり極めて容易な現場展開と本質的な安全性を有するが，一方で手先ペイロードはわずか 20g と小型カメラを搬送する程度であった．

本論文では特に，重量物であるアクチュエータをすべてベース部に配置することの出来る，干渉ワイヤ駆動機構に着目する（Hirose and Ma, 1991）．このアクチュエータ配置であれば，アーム部を軽量化するとともに，大きな手先ペイロードと高い放射線耐性を同時に実現することが可能である．筆者らの研究グループでは，いままでにワイヤ干渉駆動の原理を 2.4m の実験機を試作することにより確認している（堀米他，2017）．本論文の目的は，長さ 10m，手先ペイロード 10kg のワイヤ干渉駆動型超長尺多関節アーム”Super Dragon”を設計試作し，設計手法の有用性と実現性を確認するとともに，基本的動作を実現することである．

2. 目　標　仕　様

東京電力による報道発表資料ならびに IRID から提供される情報，ならびに廃止措置作業に従事する関係会社へのヒアリングに基づき，試作機の目標仕様を下記のように定めた．目標タスクはアーム先端に取り付けられたカメラ・線量計などの各種調査機器を，所望の位置に搬送することとする．

- 全長: 10m
- 最大アーム直径: 0.3m
- 手先ペイロード: 10kg
- 全質量: 500kg (アーム部: 100kg, 基部: 400kg）
- 大きさ: ロボットシステムが巾 3.0m ×高さ 2.5m の開口部を通過できること

将来的にはエンドエフェクタを用いた燃料デブリ取出し作業などに応用されることが期待されるが，まず設計の実現可能性を検討する段階であるので，本研究では手先部にはペイロードの重力のみが働くものとして検討を進める．

図 2 は福島第一原発での作業イメージを示している．10m のアーム長は PCV の直径 20m の半分として設定した．アクセスする開口部（X-6 ペネトレーション）の直径はおよそ 0.5m であるため，リンクにより離散化されたアームの挿入動作を考慮してアーム最大直径を 0.3m と定めた．手先に装備するセンサは耐放射線カメラ，照明，線量計などで全質量 10kg であると仮定した．より軽くより小型なアームであればあるほど現場への搬入設置が容易になることから，総質量は人力でも設置可能な 500kg とし，両開きのドアを通過できる程度の大きさと定めた．これらの仕様は過去に開発された同ペイロードの長尺アームに比して，非常に軽量かつコンパクトである．

3. 機　　構

片持ち構造の超長尺マニピュレータを設計するためには，根元関節に働く膨大な自重モーメントを如何に支えるかは最重要の設計課題である．例えば，アーム部質量を仮に 50kg と設定し，重心は全長の半分，5m のところにあると仮定すると，根元関節に働く自重モーメントは 2450Nm であり，これを支えることが可能な産業用ロボッ

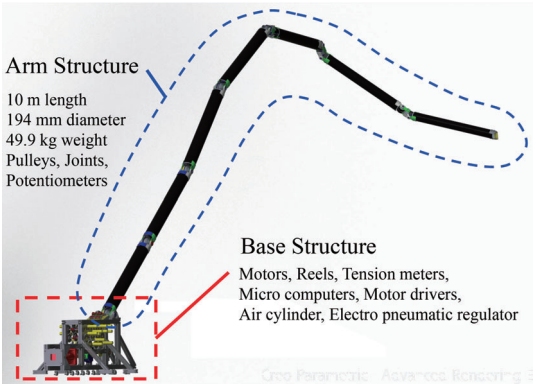

Fig. 1 Super Dragon: a 10 m-long coupled tendon-driven articulated manipulator (3DCAD model).

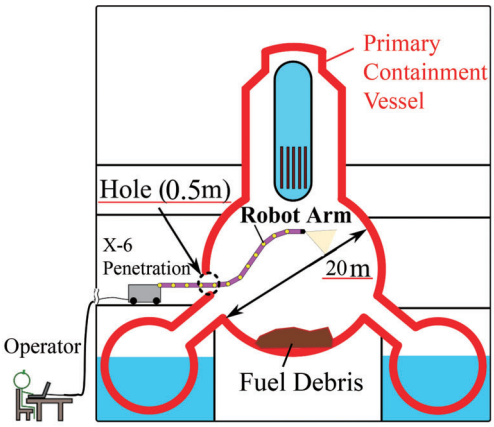

Fig. 2 Operating image of deployment in the Fukushima Daiich NPP.

ト減速機である RV 減速機 (RV-320C，ナブテスコ）を選定すると，その減速機質量のみで 79.5kg となる．つまりシリアルリンク系の通常の産業用ロボットのように各関節にアクチュエータと減速機を装備することは設計上不可能である．

これに対し，干渉ワイヤ駆動機構では，膨大な自重モーメントを多数のワイヤで分散して支えることが可能で，なおかつ重量物であるアクチュエータをすべて基部に装備することができる．その結果，アーム部は軽量かつコンパクトな構造になり得る．これに加えて，姿勢に応じて変化する自重モーメントの大部分を支えることを主目的とした，太いワイヤとそれを牽引する大型のアクチュエータを 1 つ導入することで，より高い手先ペイロードを，より細いアーム直径で実現することが出来る．本章では太径ワイヤによる自重補償機構を組み合わせた，干渉ワイヤ駆動機構の概要を以下に示す．

3·1 ワイヤ干渉駆動機構

図 3 は文献 (Hirose and Ma, 1991) で提案されているワイヤ干渉駆動の原理を示している．各関節軸に固定されている灰色斜線の丸は半径 r の関節駆動用プーリ，白丸は同じく半径 r で各関節軸に回転自在に軸着されている中継プーリである．Tendon 3 は Joint 3 のプーリに固定され Joint 3 を回転駆動するとともに，Joint 2, 1 の白いプーリに巻きかけられ，張力 F_1 で引っ張られている．Tendon 2 の端部は Joint 2 のプーリに固定され，Joint 2 を回転駆動するとともに，Joint 1 の白いプーリに巻きかけられ，張力 F_2 で引っ張られている．Tendon 1 の端部は Joint 1 のプーリに固定され Joint 1 を回転駆動する．Tendon 3 が力 F_3 で牽引されるとき，Joint 3 に働くトルク τ_3 は $F_3 r$ である．興味深いことに，同じ大きさのトルク $F_3 r$ がより根本側の Joint 2, 1 にも生成される．Tendon 2 についても同様であるので，Joint 1 に働くトルク τ_1 は $(F_1 + F_2 + F_3)r$ となる．定性的に現象を説明すると，本機構構成を用いれば，手先関節を駆動するためのトルクはより根元側の関節トルクに加算することができる．結果として，根元側に生じる膨大な自重モーメントを複数のワイヤにより分散して支えることが可能な機構である．より詳しい解説については文献を参照されたい．

3·2 自重補償機構

より高い手先ペイロードをより細いアーム直径で実現するため，前節のワイヤ干渉駆動機構に加えて新たに自重補償ワイヤと呼ぶ太径のワイヤを 1 本導入する．ワイヤ強度はワイヤの断面積に比例するため，ワイヤの半径の 2 乗に比例して増加する．従って，アームの直径が一定であるとき，複数の干渉駆動用ワイヤの直径を一様に増加させるより，一本の太いワイヤを導入する方が総合的により高い強度を実現できる（Horigome et al., 2016）．図 4 は自重補償機構の基本的な概念を示している．従来のワイヤ干渉駆動機構である (a) は，中径のワイヤにより均等にトルクを支えているが，提案する (b) の機構では，赤線で示した大径のワイヤ（便宜上，自重補償ワイヤと呼ぶ）を大型のアクチュエータで牽引し，自重モーメントの大部分を支えている．これにより青線で示したワイヤ干渉駆

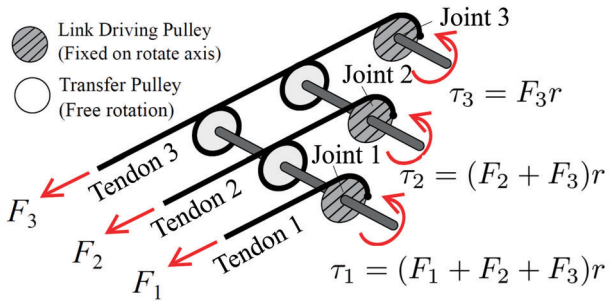

Fig. 3 Basic principle of the coupled tendon-driven mechanism.

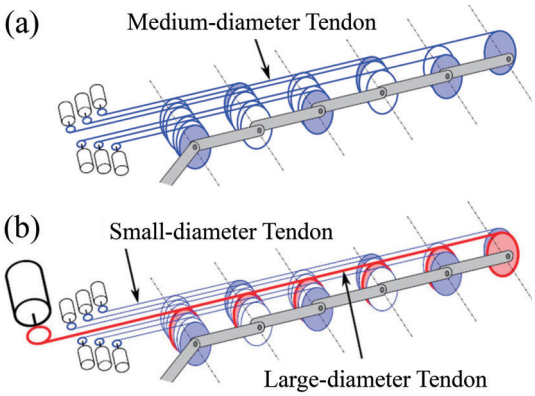

Fig. 4 Tendon arrangement: (a) coupled tendon-driven mechanism and (b) coupled tendon-driven mechanism and weight compensation mechanism.

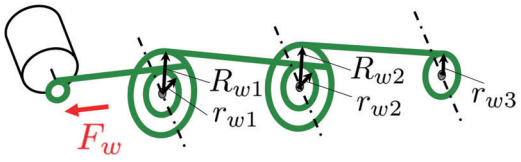

Fig. 5 Double pulleys to obtain appropriate weight compensation torques.

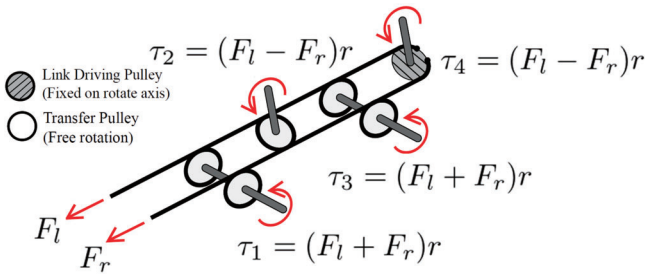

Fig. 6 Coupled tendon-driven mechanism for the yaw and pitch joints.

動用のワイヤ（便宜上，関節制御ワイヤと呼ぶ）を小径にすることができ，結果として細いアームを実現できる．各関節の角度はワイヤ干渉駆動機構により小型アクチュエータを駆動して制御する．自重補償ワイヤの張力 F_w はアーム姿勢に応じて制御される．例えばアーム姿勢が水平であるとき，自重モーメントは最大であるが，アーム姿勢が垂直であるとき，自重モーメントはゼロとなる．従って，F_w はアーム全体の姿勢により最適化される必要がある．加えて，自重モーメントは関節位置により各々異なり，根元関節ほどより大きな自重補償トルクが必要で，手先関節はより小さな自重補償トルクとなる．自重補償ワイヤは 1 本で根元部分の 1 つの大型アクチュエータで牽引されることから，このトルク調整を図 5 に示す二重プーリにより関節ごとにプーリ半径比（r_{wi}/R_{wi}）を変えることで機構的に対応する．自重補償機構の有効性については文献（Horigome et al., 2016）を参照されたい．

3·3 ヨー軸関節

より広範な調査活動を行うためには手先位置を 3 次元空間上に配置できる自由度を持つことが望ましい．筆者らの先行研究で，アーム部の先端の関節にはピッチ軸周りの関節に加えて，ヨー軸周りの関節を導入することを提案している (堀米他, 2017)．図 6 は干渉駆動でピッチ軸関節とヨー軸関節の屈曲を実現する構造を示している．拮抗配置された左右のワイヤに張力 F_l, F_r が与えられているとき，ヨー軸周りのトルクは $(F_l - F_r)r$，ピッチ軸周りのトルクは $(F_l + F_r)\, r$ となる．本機構を用いれば，ヨー軸の角度を一定に保つ場合であっても，拮抗する張力を共に増大させることにより，根元側のピッチ軸のトルク生成に寄与することが可能であり，より大きな自重モーメントを支えることができる．

3·4 関節およびワイヤープーリの配置

アームの自由度数が増えれば増えるほど，入り組んだ狭隘空間で作業することができる一方，より多くのプーリをアーム内部に配置する必要があり，結果としてアーム直径および質量が増大することになる．またアーム直径の制約がある中でプーリ数が多くなれば，プーリ幅は減らさなければならず，必然的に各ワイヤの直径が小さくなるため生成可能な最大張力は低下することになり，その結果，自重や手先ペイロードを支えることが困難となる．このようなトレードオフ関係の元，試行錯誤的に関節数及びリンク長を求めた結果，図 7 に示すリンク系

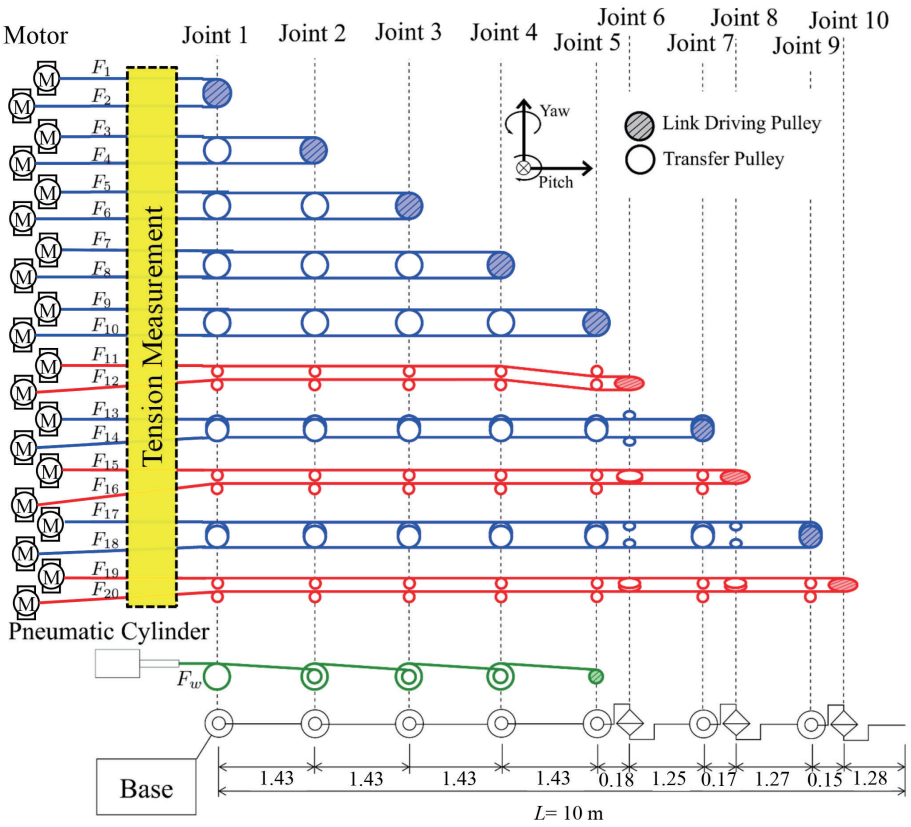

Fig. 7　Joint configuration and tendon–pulley arrangement.

の構成と関節配置，ならびにワイヤとプーリの配置であれば目標仕様を満たす構成が成立することを見出した．

アーム部は 7 つのセグメントで構成され，根元側 4 節はピッチ軸関節のみ，手先側 3 節はピッチ軸関節とヨー軸関節の 2 自由度をもつ構成である．PCV 内部の調査はアーム先頭部分から順次挿入されていくため，先端部が十分な 3 次元の可動範囲を持てば十分調査が可能であると考え，ヨー軸は手先側のみに導入した．（なお，アクセスする穴からアームを挿入するために，アーム全体を四角柱のドラムに巻き付けて収納し，そのドラム全体を回転させる手法を既に提案しているが（Horigome et al., 2014），本論文はアーム部の設計を主眼とするため，議論しない．）

アーム部の質量を可能な限り減らし，またエンコーダなどの放射線に弱い半導体を可能な限り遠ざけるため，すべてのアクチュエータは基部に装備する．このようにアクチュエータを配置すれば，アーム部は基本的には機械的機構のみで構成されるので放射線に対する耐性の向上が期待できる．（別途関節角制御のためには関節角を計測する必要があるが，耐放射線性の高い電気的受動素子であるポテンショメータを用いることで高い放射線耐性を実現できる．）このような機構構成であればアーム部を防水とすることも容易である．

全ての関節はワイヤの拮抗駆動系で駆動されるとともに，より根元側の中継プーリに巻きかけられている．従って根元側の第一ピッチ軸に働く自重モーメントは，装備されたすべてのアクチュエータで分散して支えることができる．自重補償ワイヤは大きな牽引力が必要であること，ワイヤ牽引量はさほど大きくないことを考慮して，エアシリンダにより牽引することとし，その張力は電空レギュレータにより空気圧を制御することで調整される．

4.　手先可動範囲の解析

図 7 下に示すようなリンク長，関節配置とした場合，ワイヤが破断しない手先の可動範囲はどのようになるであろうか？ 本アームは手先の位置 3 自由度に対し 10 関節をもつことから運動学的に冗長であり，さらにワイヤ駆動機構は 10 関節に対し 21 自由度のアクチュエータを備えており，さらに冗長である．従って，与えられた手先位置から，関節角度およびワイヤ張力は一意に定まらず，何らかの最適化指標に基づき関節角度およびワイヤ張力の冗長問題を解く必要がある．本節では，ワイヤの破断を防ぐため関節制御ワイヤの張力の最大値を最小化

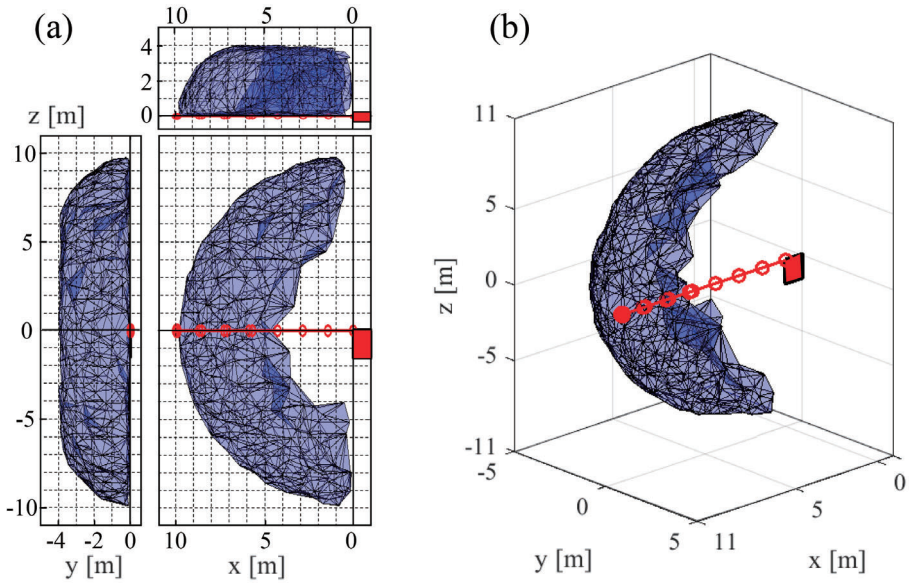

Fig. 8 Workspace analysis where end-point payload is 10kg, and the maximum tension of the joint control tendon is 3kN. (a)Trihedral figure, (b)isometric view. (Red circles indicate joint position in the standard posture, and red rectangle means means the base structure.)

することを最適化指標として定める．（なお，自重補償ワイヤについては十分な強度があると想定する．）この指標の下で，（１）与えられた手先位置から関節制御ワイヤの張力最大値を最小化する関節角度を決定する冗長逆運動学問題と，（２）与えられた関節角度を実現する関節トルクから，関節制御ワイヤと自重補償ワイヤの最適な張力を求める冗長静力学問題の二つを同時に解く必要がある．（１）についてはヤコビ行列の疑似逆行列を用いて，任意の評価関数を最小化する最適関節角度を決定する微分逆運動学手法（馬，1997），（２）についてはワイヤ張力分散制御法（広瀬，馬，1990）を適用した．

本論文の主題は機構設計であるので，上記最適化問題の詳細は別報に譲り，数値解析の結果のみ示す．数値解析は手先最大リーチの範囲内でランダムに目標手先位置を指定し，同じくランダムに設定した初期関節角度から目標手先位置への到達運動を行いながら，繰り返し最適化計算により関節角度を変化させ関節制御ワイヤ張力の最大値を最小化した．繰り返し演算が収束し，各関節角度最大値が機構的な限界値である ± 90 deg を超えず，なおかつ最大張力が設定値以下である手先位置を，可動範囲であると判定した．手先ペイロード 10kg, 関節制御ワイヤと自重補償ワイヤの張力最大値をそれぞれ 3kN，21kN と設定したとき，手先が到達できる可動範囲を図 8 に青の領域で示す．機構的に左右対称であるのでここでは $y \leq 0$ の領域のみ図示している．上下方向に $\pm$10m, 左右方向に $\pm$4m と広い可動範囲が実現できることが明らかになった．またベース部に近い部分には手先を到達できないことが分かる．これは隣り合うピッチ軸関節角が大きな角度で屈曲する場合，互いのトルクを相殺する向きにトルクの干渉がおこるためである．このトルク干渉は，できる限り大きな曲率で滑らかに屈曲した形態をとることで回避できることが知られているため（Horigome et al., 2016），滑らかな形状でアクセス穴から徐々に挿入することにより，アクセス穴近傍にも手先位置を到達させることが可能である．

5. 試 作 機 の 設 計

図 1 に示すように，試作機は主にアーム部と基部に分けられる．アーム部は複数のプーリとワイヤを用いた関節機構，主たるリンク構造材である CFRP パイプ，そして関節角度を計測するポテンショメータで構成される．ベース部はアクチュエータ，ワイヤを巻き取るリール機構，アクチュエータ制御器，そしてワイヤ張力センサで構成される．

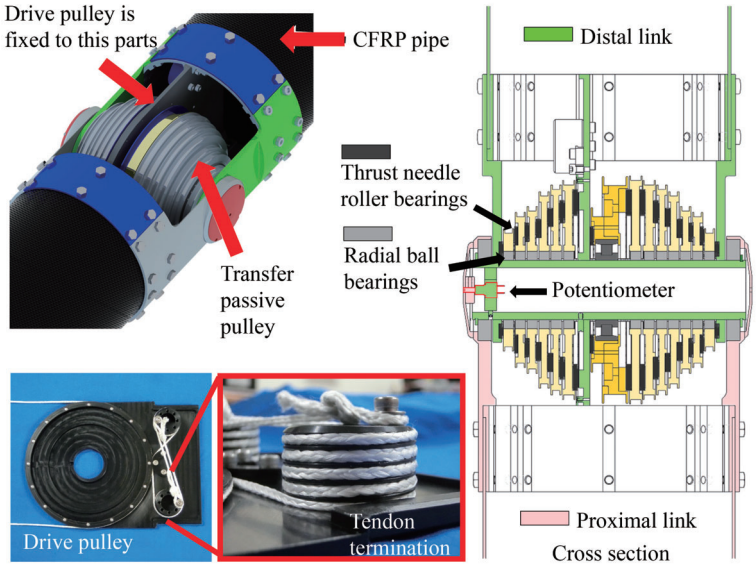

Fig. 9　Detailed mechanism of the first proximal joint.

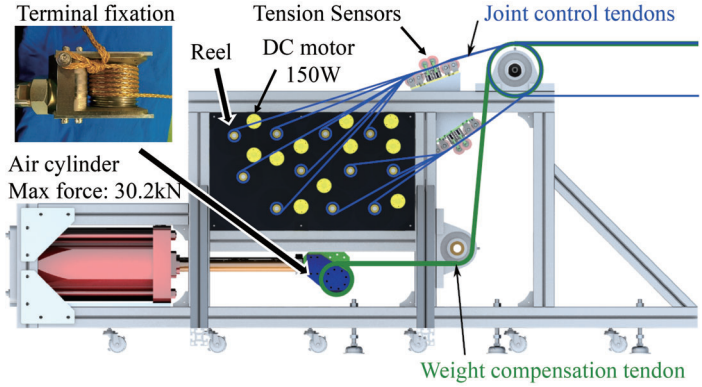

Fig. 10　Base structure: arrangement of the actuators and the tendon pathways.

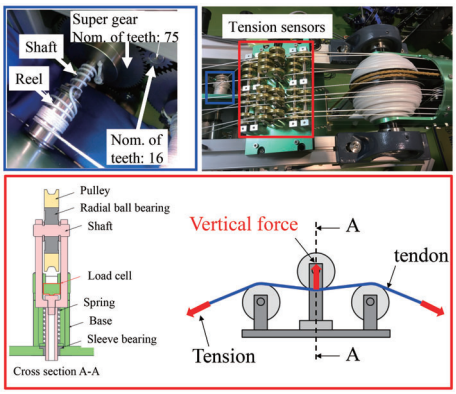

Fig. 11　Reel mechanism (blue) and tension sensor (red).

5·1　アーム部の設計

図 9 に最も多数のプーリが配置される第 2 ピッチ軸関節の詳細図を示す．主たる構造材は厚さ 2mm の CFRP パイプであり，その端部に超ジュラルミン (A2017）製の構造材を接着し，さらにステーをボルトにより締結する構造となっている．アーム部の直径を最小化するためには，可能な限り中継プーリの厚さを最小化することが必要であるが，同時に直径が大きく，薄いプーリは面外方向への撓みが問題となる．また関節質量を減らすためにプーリ素材としてはポリアセタール樹脂を選択したため，面外方向への変形も大きくなる．これを支えるために中継プーリ間にスラストニードルベアリングを導入し，隣同士で支える機構とした．しかしながら，予備実験の結果，面外方向への変形が一部プーリで発生し，フランジが破損することが明らかとなったため，破損したプーリは肉抜きした超ジュラルミン製のものに変更するとともに，大口径で重いスラストニードルベアリングを廃し，代わりに小口径のクロスローラベアリングで軸着することで対応した．中空の関節軸内にはポテンショメータ（JC10-000-103N, NIDEC COPAL Corp.）を設置し，リンク間の相対的な関節角度を計測する．

3DCAD モデル上でのアーム部想定質量は 49.9kg でありより長尺でありながら先行研究（Perrot et al., 2012) のおよそ 1/3 となった．またアーム部の最大直径は 194mm であり，目標仕様の 0.3m 以下を達成した．以上の結果から，提案する機構構成法によれば軽量かつ細径の長尺アームが実現可能であることが分かる．

5·2 基部の設計

図 10 に基部の側面図とワイヤ経路を示す．遊星歯車減速機（減速比 1/113）を有する定格出力 150W の DC アクチュエータ（RE40,Maxon）を 20 台装備し，これらで各関節の干渉駆動ワイヤを制御する．アクチュエータ出力は平歯車による減速（減速比 16/75）を介してリールに連結されている（図 11 青枠）．リール直径は 30mm としたが，これは筆者らの先行研究において小さなプーリにより急峻に曲げれば曲げるほど，化学繊維ワイヤの強度が低下することが明らかになったため（Horigome and Endo, 2016），破断張力の 90%まで保証できる値として選定した．DC アクチュエータの配置は，干渉駆動ワイヤがお互いに触れ合うことなく，かつ，アクチュエータ設置面積を最小化できる配置を全検索により最適化している（堀米他，2017）．すべての干渉駆動ワイヤは独自開発した張力センサ（図 11 赤枠）により張力が計測され，張力と巻き取り量が制御される．干渉駆動ワイヤは 3 つの受動プーリを通過し，中央部のプーリに接続されたロードセル（MCDW-50L, TOYO-SOKKI）を押すことで幾何学的関係から張力が計測される．

自重補償ワイヤに関しては，牽引力が非常に大きいことから，軽量化のため電動アクチュエータではなく，ボア径 200mm の空圧シリンダ（10A-2FB200B300, Taiyo）を選定した．この空圧シリンダにより最大 30.2kN で自重補償ワイヤを牽引することができる．自重補償のワイヤ張力は電空レギュレータ（EVD-3900, CKD）により制御する．構成した基部の質量は CAD 上で 250kg と見積もられ，目標仕様を達成するとともに，先行開発事例の同程度のペイロードの長尺マニピュレータに比して著しく軽量に構成できている．

5·3 高強度化学繊維ワイヤ

近年，高強度の化学繊維が様々に開発され，その強度はすでにステンレスワイヤーを超えており，質量は 1/5〜1/8 を実現している．さらに化学繊維ワイヤはしなやかで曲げやすいことから，よりコンパクトな機構を設計でき，さらにメインテナンス性も向上できる．このような特質から，筆者らの研究グループでは化学繊維ワイヤをロボット駆動系として用いる場合の包括的な設計指針の確立を目指して，様々な特性を明らかにしてきた．本節では試作機設計に用いられた知見をまとめる．

まず関節制御ワイヤとしては直径 2mm の高密度ポリエチレン繊維 Dyneema を選択した．同径のステンレスワイヤの破断荷重は 3.56kN であるのに対し，Dyneema（DB-96HSL, ハヤミ工産）では 4.29kN とおよそ 20%高い値である．筆者らの先行研究でプーリによる繰り返し曲げに対する耐久性を様々な化学繊維ロープに対して計測した結果，Dyneema が最も繰り返し曲げに対する耐久性が高いことが明らかになった（Horigome and Endo, 2018）．さらに Dyneema に対して熱を加えた上で引き延ばす熱延伸加工を施したワイヤも存在する（single braid Dyneema SK99 [HPS+PU] without a cover, NA20020SOC00\001.000, Armare）．より多くの原糸を高密度に配置できるため，引張強度の実測値はステンレスワイヤのおよそ 2 倍の 7.17kN に達する．一方で繰り返し曲げに対する耐久性は下がるため，トレードオフの関係がある．本試作機には繰り返し曲げ耐久性の高い DB-96HSL を基本として採用し，実験中破断したワイヤについては，より高強度の熱延伸 Dyneema に順次入れ替えることとした．（4 章で設定した関節駆動ワイヤの上限値 3kN に対して熱延伸加工のワイヤは安全率 2.4 である．）

ところで Dyneema の端部を駆動プーリに強固に固定することは簡単ではない．なぜなら Dyneema の摩擦係数は非常に小さく，容易に滑りを生じてしまうためである．この問題を解決するために，筆者らは新しい端部固定法を開発した．その方法は溝付きプーリに複数回巻きかけた後に，端部を二重 8 の字結びでループを作り，そのループを固定ピンに引っ掛けるというものである（図 9 左下）．この手法により破断張力の 90%以上の張力を固定できることを先行研究により明らかにしている（遠藤他，2018）．

自重補償ワイヤに関しては，直径 5.5mm の PBO 繊維 Zylon(ZB-15728, ハヤミ工産）を選択した．破断張力は 46.1kN である．Zylon ロープは繰り返し曲げに対する耐久性は Dyneema に対して劣るが，より高い強度と少ないクリープ伸び特性を有する．自重補償ワイヤは干渉駆動用ワイヤに比してさほど頻繁に駆動されず，その変位も少ないことから，耐久性よりも強度と伸びない特性を重視して採用した．干渉駆動用ワイヤと同様の手法で端部固定を行い（図 10 左上），本手法により 30kN の締結力を破断することなく発生できることを実験的に確かめた（遠藤他, 2018）．

筆者らの研究グループでは，現在高強度化学繊維にコバルト 60 による γ 線を照射することで放射線への耐性について評価をしている．初期実験の結果では，累積線量 10kGy までの範囲では，Dyneema, Zylon ともほぼ強度低

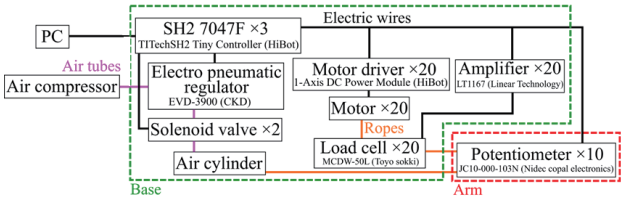

Fig. 12　System configuration of Super Dragon.

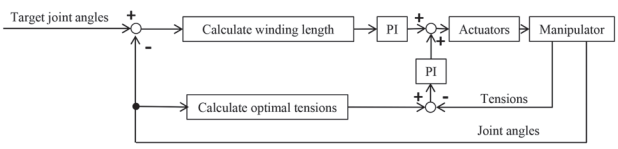

Fig. 13　Control block diagram for each joint control tendon.

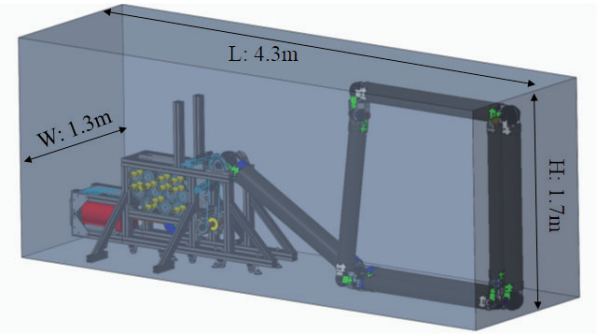

Fig. 14　Storing configuration of the 10 m model.

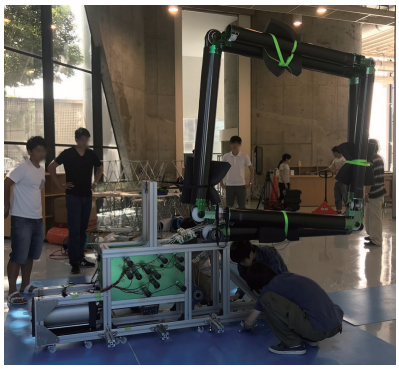

Fig. 15　Deployment of the 10 m model.

下が見られないことが分かった（兼清，遠藤， 2018）．現在までに分かっている PCV 内の最大空間線量率は 2 号機で観測された 75Gy/h であることから，この環境下で 133 時間の稼働が可能である．以前の PCV 内部調査で用いられたカメラは 1kGy の耐放射線性であるので，化学繊維ワイヤの耐放射線性は十分実用の範囲内であると考えている．

5·4　制御システム

図 12 に全体の制御系を示す．外部 PC より干渉駆動ワイヤの目標関節角度と目標張力，自重補償ワイヤの目標張力がマイコンに送られる．マイコンは DC アクチュエータと空気圧を 10ms 周期で制御する．また関節角度，張力の計測値ならびに DC アクチュエータに出力する PWM 信号を外部 PC に送る．オペレータの指令する関節角度は 100ms 周期で更新され，マイコンへの指令値が再計算される．図 13 は関節制御ワイヤの制御ブロック線図である．張力制御と関節角度制御は 2 つの PI 制御器により行われている．

もし関節制御が各関節で独立しておりワイヤがまったく伸びがないのであれば，目標関節角から必要なワイヤ巻取り量は一意に定まり，ワイヤ張力も関節トルクから一意に定まる．しかしながら，実際には化学繊維ワイヤは粘弾性を持つことから，関節角を定めてもワイヤの巻取り量は定まらない．さらに，4 章で述べたようにたとえ関節トルクが定まったとしても，冗長な干渉駆動であることから，各ワイヤの張力には任意性がある．よって必要な関節トルクを複数ワイヤの張力として分散するため，予め目標関節角度から目標張力を計算し，フィードフォワードにより張力制御を行う．張力制御と関節角度制御の 2 つの PI 制御器の結果は重みづけされ，DC アクチュエータに送られる．モータドライバ回路に供給されるすべての PWM 信号は，ロープ破断を防ぐために最大張力を超えないよう監視されている．

6.　実　　験

6·1　移設性検証

東京工業大学石川台 6 号館実験室内で 10m 試作機の全システムを組み立てた後，およそ 700m 離れた同学百年記念館に移設して動作実験を行った．搬出形態はピッチ軸周りにとぐろを巻くようにしてリンクを拘束することで W3.0m×H2.5m の大きさの両開きドアから運び出すことができた．移動には 2 トンロングのトラックを用い，図 14 に示す収納形態とすることで，W1.3m×L4.3m×H1.7m の荷室に収納可能であった．また基部のフレームにはキャスタを取りつけることで床面を容易に移動することが出来た．設置の様子を図 15 に示す．搬出に要した人

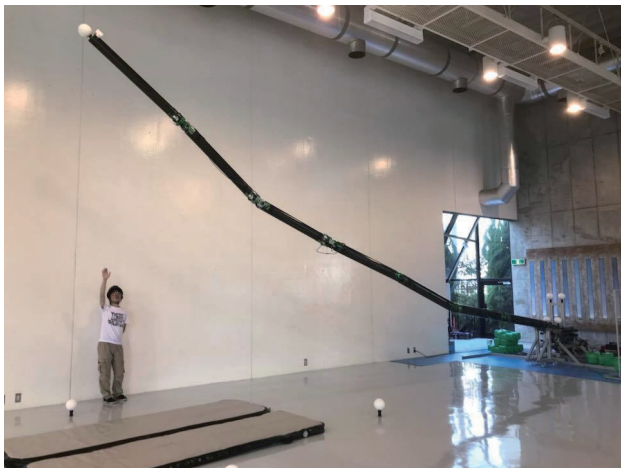

Fig. 16 Experiment on keeping the horizontally extended posture using the 10 m model.



Fig. 17 Experiment on keeping the yaw bending posture using the 10 m model.

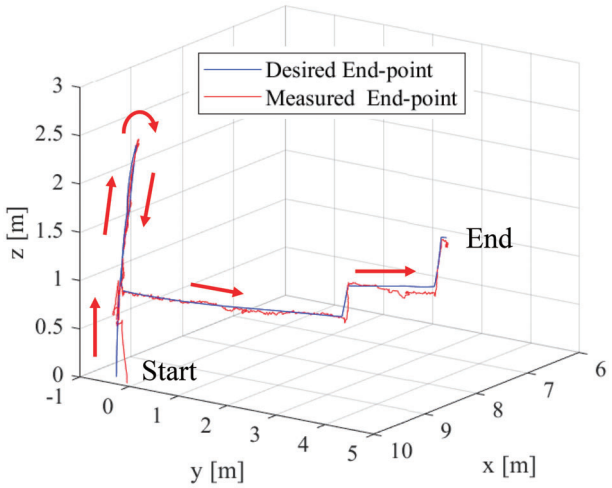

Fig. 18 Trajectories of the end point in the world coordinate. Note that the measured end-point trajectory is derived using forward kinematics with the measured joint angles.

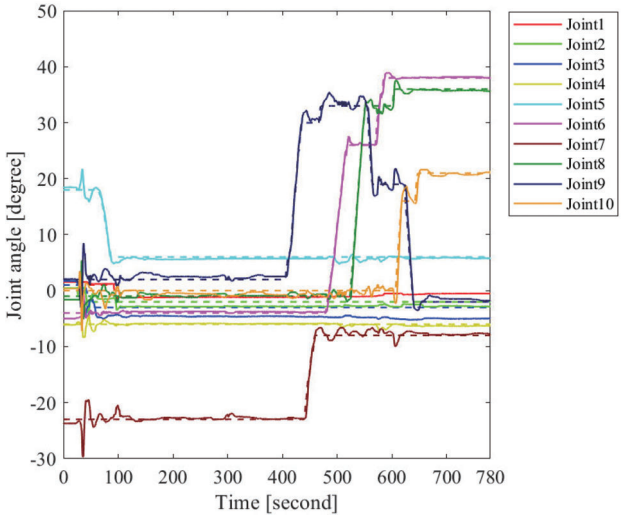

Fig. 19 Time course of the joint angles: desired angle (dashed) and measured angle (solid).

数は 10 名程度でトラックへの積み込みにリフタを用いた以外，すべて人力で移動させることができた．移設に要した時間は 5 時間程度であった．3DCAD モデルによる重心の解析では，質量の大部分は基部に集中していることから，アームを水平展開したとしても転倒しないが，より安全を期するため基部のフレームを延長し，総質量 250kg の水タンクにより抑えることで転倒を防止した．このように人力での移設が可能であることから，従来の長尺ロボットに比して高い可搬性を有することが示された．

6·2 基本動作実験

図 16，17 に基本的動作実験の様子を示す．全長 10m のアームを水平に展開しその状態を保持できることを確認した．さらにヨー軸関節を駆動することで手先を横方向に曲げた姿勢が実現できることを確かめた．このとき，根元部分の CFRP パイプ構造体には長軸周りの自重モーメントが働く．これは CFRP パイプのねじり剛性によって支えるほかないが，大きな問題なく動作することが確認できた．

次にアーム先端部の位置を制御できるか，実験を行った．アーム先端部にカメラを装着し，オペレータがカメ

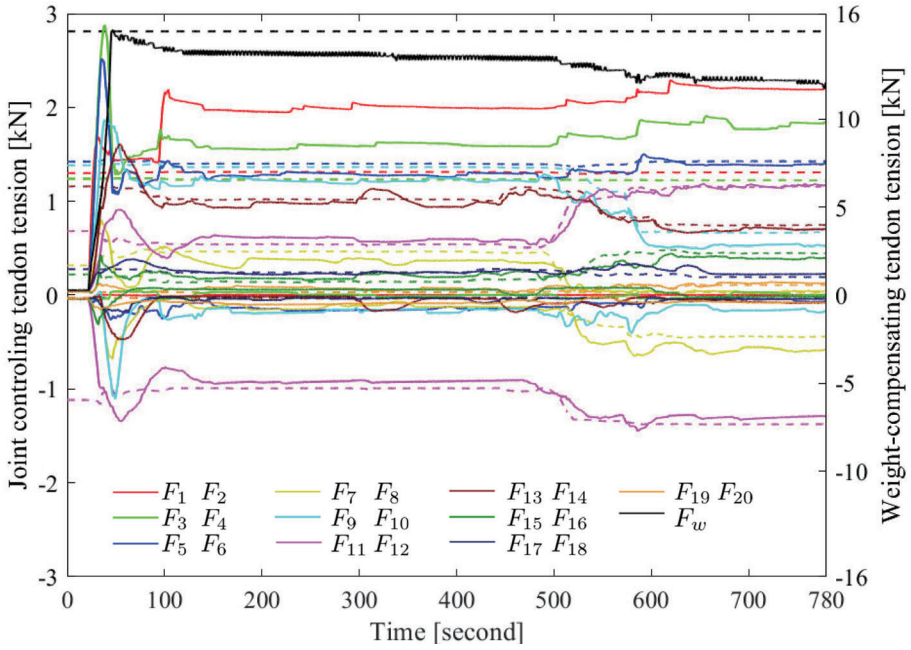

Fig. 20 Time course of the tendon tensions: desired tension (dashed) and measured tension (solid). F_{2i-1} and F_{2i} ($i = 1, 2, \cdots, 10$) are antagonistic pair tendons drawn with the same color, which are corresponded to Fig.7. Note that all tensions of F_{2i} have a negative sign.

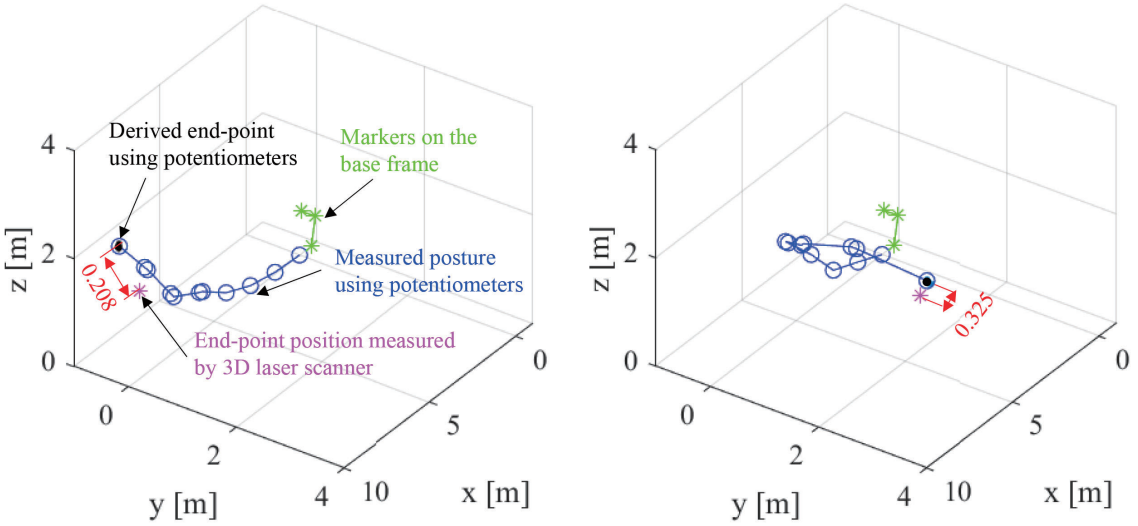

Fig. 21 End-point positioning accuracy measured by the 3D Scanner.

ラ映像を確認しつつ，各関節の目標角度を手動で設定した．図 18 は手先の位置軌跡を示している．床面から鉛直上方に 2.5m 付近まで持ち上げ，静止した後，下方の 1.0m 付近まで下ろし，再び静止した後，ヨー関節，ピッチ関節の交互に駆動している動作である．図中青線は目標手先位置であり，赤線は計測された関節角度から順運動学により算出された手先位置である．目標値に対して比較的よく追従していることがわかる．

また図 19，20 は関節角度とワイヤ張力の時系列変化をそれぞれ表している．図示した範囲内の全関節の関節角度制御誤差は 0.04 度であり，最大誤差は Joint9 の 6.5 度であった．これは主に関節角度制御のオーバーシュートにより生じた誤差である．PI 制御のゲインをさらにチューニングすることで誤差を小さくすることができると考えている．張力制御に関しては，同じ色の点線と実線が比較的同じ推移を示していることから，おおむね関節制御ワイヤは目標値とよく一致している．しかしながら，F_1, F_3 の値が大きく，徐々に上昇しているのと対応するように，自重補償張力 F_w の値が目標値より小さくなっている．これは F_1, F_3 の関節制御ワイヤがより多く自重補償のトルクを分担していることを示している．自重補償ワイヤの張力制御に問題があった可能性があるが，原因を



Fig. 22　Payload testing experiment. The bottled water of 4.4kg were attached at the tip of the arm.

特定することは今後の課題である．関節制御ワイヤ，自重補償ワイヤの最大張力はそれぞれ 2.3kN, 15kN 以下で制御することが可能で，これは破断荷重のそれぞれ 32%と 33%以下であった．

興味深いことにヨー軸制御用のワイヤ（F_{11}, F_{12}）は本来であれば関節トルクは小さいことから，さほど大きな張力は必要ないのであるが，他のピッチ軸制御用のワイヤと同等の張力が生じている．これはヨー軸の拮抗張力を増加させることで，他のピッチ軸にトルクを生成させ自重モーメントを補償しているためである．この結果から，提案する設計法の有用性が明らかになった．

さらに PCV 内調査を想定して，床面・壁面・柱の 4 か所にマーカーを設置し，手先位置を制御することで手先カメラでマーカーを撮影する実験を行った．手先位置は指令値に滑らかに追従することができ，マーカーすべてを撮影することに成功した．

6·3　手先位置決め精度の計測

手先の 3 次元空間上での手先位置決め精度を 3 次元レーザスキャナ（FARO 社製 : Focu 3D X130）を用いて計測した．白い球状のマーカをアーム先端並びに基部フレーム上に設置し，その位置を計測した．基部フレーム上の 3 点のマーカを用いてロボット座標系と絶対座標系の変換を行う．レーザスキャナの計測精度は ±2mm である．レーザスキャナでの測定は分解能を上げて計測したため，1 回の計測におよそ 5 分を要したが，その間，アーム手先部はほとんど静止しており，問題なく計測できた．

直線状に伸展した姿勢と，横方向に屈曲した姿勢の 2 つを計測した結果を図 21 に示す．内界センサであるポテンショメータからの推測した手先位置と比較すると，それぞれ 0.208, 0.325m の誤差であることが明らかになった．この値はアーム全長に比して 2〜3%程度である．誤差の最大要因は関節角度のキャリブレーションと思われるが，目視での調査であるなら，手動で関節角を操作することで十分調整可能な誤差であると考えている．

6·4　ペイロード負荷実験

最も自重モーメントが働く水平姿勢を保持した状態で，アーム手先に質量を付加する実験を行った．実験の様子を図 22 に示す．アーム手先にフックを取り付け，ペットボトルに水を入れた重りを吊るすことで負荷を与えた．その結果，4.4kg の負荷を与えても水平保持が可能であった．またアームを水平に保持したままで，ペイロードを徐々に増やし 10kg を載せた場合であっても，ワイヤ破断などの機構的な問題が起こらないことを確認した．

7.　結　　言

本論文は福島第一原発の廃止措置に資するため，全長 10m の超長尺多関節マニピュレータの開発について議論した．ワイヤ干渉駆動機構と自重補償機構を組み合わせ，高強度化学繊維ワイヤを用いることで，軽量・細径・高ペイロードのマニピュレータが設計できることを示した．試作機による基本的動作実験をおこなうことで，提案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．

- 全長 10m，最大アーム直径 0.194m，全 10 自由度（ピッチ軸 7，ヨー軸 3）のアームを実現した．
- 全質量は 300kg（アーム部 50kg, 基部 250kg）であり，幅 3.0m ×高さ 2.5m の扉を通過可能であった．
- 人力で移設可能であり，2 トンロングトラックに積載できるシステムであることを確認した．
- 各関節の位置制御を実現し，手先の位置決め精度は 0.325m であることを計測により明らかにした．
- 水平姿勢において手先に 4.4kg, 10kg を負荷し，保持ならびに機構的問題が起こらないことを確かめた．

また試作により明らかとなり，本論文に残された今後の課題は以下である．

1. リンク構造材および機構部材の変形・ガタの影響．
2. 高強度化学繊維のワイヤの粘弾塑性に起因するアーム部の振動や大きなコンプライアンス．
3. ワイヤ長さ・張力制御のローカルフィードバックが多重に干渉することによる制御の不安定性．

1. については本アームは超長尺であることから，根元部分の変形やガタが手先位置に大きな影響を及ぼす．これらを定量的に把握することが手先位置制御の精度向上のために必要である．また 2. 3. は，予期せぬ外力が手先に働いた場合（例えばアームが障害物に衝突する等），非常に大きな問題となり得る．今後，各ワイヤ制御のローカルな PID 制御ゲインを詳細にチューニングし安定性を向上させるとともに，動力学シミュレータを用いて干渉駆動系全体としての安定性も検討する必要がある．加えて，ワイヤの伸び特性を補償する制御則を導入する必要がある．さらに手先位置制御の最小分解能や可動範囲全域での位置決め精度などの計測も本アームの制御特性を明らかにするために重要である．そして設計の有効性を示すために，10kg のペイロードを負荷し，４章で示した可動範囲を実機で実現できるか，検証する予定である．

謝　　辞

本研究を実施するにあたり，東京工業大学機械系の鈴森康一教授，難波江裕之助教から大変有益な議論・ご助言を頂きました．感謝申し上げます．また中継プーリの機構改良においては同大学院修士課程薮田琢磨君，若林陽輝君に尽力いただきました．さらに実験実施の際には同大機械系鈴森遠藤研究室の学生諸君・スタッフに多大なる支援を頂きました．関係各位のサポート無しには実機検証は実現できませんでした．謹んで感謝申し上げます．本論文の成果は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです．

文　　献

Culham center for fusion energy, Octant 1 boom extension (2009), available from <http:www.ccfe.ac.uk/assets/Documents/Services/CS-RHO1BE.pdf> (accessed on 26 October, 2018).

遠藤 玄, 堀米 篤史, 若林 陽輝, 高田 敦, 高強度化学繊維を用いたワイヤ駆動系のための基礎的検討 溝付きプーリと二重８の字結びによる端部固定，日本機械学会論文集，Vol. 84, No. 864 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.18-00067.

Haist, B., Mills, S. and Loving, A., Remote handling preparations of JED EP2 shutdown, Fusion Engineering and Design, Vol. 84 (2009), pp. 875-879.

広瀬 茂男, 馬 書根, ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの開発, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No.11 (1990), pp.1291-1298.

Hirose, S. and Ma, S., Coupled tendon-driven multijoint manipulator, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (1991), pp.1268-1275.

Horigome, A. and Endo, G., Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope -investigation of strength reduction by bending and terminal fixation method, Advanced Robotics, Vol. 30, Issue 3 (2016), pp. 206-217.

Horigome, A. and Endo, G., Investigation of repetitive bending durability of synthetic fiber ropes, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 3, No. 3 (2018), pp.1779-1789.

Horigome, A., Endo, G., Suzumori, K. and Nabae, H., Design of a weight-compensated and coupled tendon-driven articulated long-reach manipulator, in Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2016), pp.598-603.

Horigome, A., Yamada, H., Endo, G., Sen, S., Hirose, S. and Fukushima, E.F., Development of a coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (2014), pp.5915-5920.

堀米 篤史, 山田 浩也, 洗 津, 広瀬 茂男, 遠藤 玄, ワイヤ干渉駆動型多関節 3 次元アームの開発（張力伝達効率，リールの最大密度配置および先端位置精度の検討），日本機械学会論文集，Vol.83，No.848（2017），DOI:10.1299/transjsme.16-00270.

IRID, IRID R&D topics Development of “ROBOT ARM / ACCESS RAIL” (2017), available from <http://irid.or.jp/en/topics/> (accessed on 26 October, 2018).

IRID, IRID R&D topics Investigation inside primary containment vessel (PCV) (2017), available from <http://irid.or.jp/en/topics/> (accessed on 26 October, 2018).

兼清 真人, 遠藤 玄, 高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 -第七報：γ線による強度低下-, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会予稿集（2018）, 1D2-03.

馬 書根, ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの最適姿勢とそのワイヤ張力の考察, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 609 (1997), pp.1665-1670.

Perrot, Y., Gargiulo, L., Houry, M., Kammerer, N., Keller, D., Measson, Y., Piolain, G. and Verney, A., 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. 22, No.1 (2012), pp.175-185.

Snoj, L., Lengar, I., Cufar, A., Syme, B., Popovichev, S., Conroy, S., Meredith, L. and JET EFDA Contributors, Calculations to support JET neutron yield calibration: modelling of the JET remote handling system, Nuclear Engineering and Design, Vol. 261 (2013), pp.244-250.

Takata, A., Endo, G., Suzumori, K., Nabae, H., Mizutani, Y. and Suzuki, Y., Modeling of synthetic fiber ropes and frequency response of long-distance cable-pulley system, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 3, No. 3 (2018), pp.1743-1750.

Takeichi, M., Suzumori, K., Endo, G. and Nabae, H., Development of a 20-m-long Giacometti arm with balloon body based on kinematic model with air resistance, in Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (2017), pp.2710-2716.

References

Culham center for fusion energy, Octant 1 boom extension (2009), available from <http:www.ccfe.ac.uk/assets/Documents/Services/CS-RHO1BE.pdf> (accessed on 26 October, 2018).

Endo, G., Horigome, A., Wakabayashi, Y. and Takata A., Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope (terminal fixation method using a grooved pulley and a figure-eight knot), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 84, No. 864 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.18-00067.

Haist, B., Mills, S. and Loving, A., Remote handling preparations of JED EP2 shutdown, Fusion Engineering and Design, Vol. 84 (2009), pp. 875-879.

Hirose, S. and Ma, S., Development of tendon driven multi-joint manipulator based on coupled drive, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 26, No.11 (1990), pp.1291-1298 (in Japanese).

Hirose, S. and Ma, S., Coupled tendon-driven multijoint manipulator, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (1991), pp.1268-1275.

Horigome, A. and Endo, G., Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope -investigation of strength reduction by bending and terminal fixation method, Advanced Robotics, Vol. 30, Issue 3 (2016), pp. 206-217.

Horigome, A. and Endo, G., Investigation of repetitive bending durability of synthetic fiber ropes, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 3, No. 3 (2018), pp.1779-1789.

Horigome, A., Endo, G., Suzumori, K. and Nabae, H., Design of a weight-compensated and coupled tendon-driven articulated long-reach manipulator, in Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2016), pp.598-603.

Horigome, A., Yamada, H., Endo, G., Sen, S., Hirose, S. and Fukushima, E.F., Development of a coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (2014), pp.5915-5920.

Horigome, A., Yamada, H., Sen, S. and Endo, G., Development of a coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator (investigation of tension transfer efficiency, optimal reel arrangement and tip positioning accuracy), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.83，No.848（2017），DOI:10.1299/transjsme.16-00270.

IRID, IRID R&D topics Development of “ROBOT ARM / ACCESS RAIL” (2017), available from <http://irid.or.jp/en/topics/> (accessed on 26 October, 2018).

IRID, IRID R&D topics Investigation inside primary containment vessel (PCV) (2017), available from <http://irid.or.jp/en/topics/> (accessed on 26 October, 2018).

Kanekiyo, M. and Endo, G., Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope -seventh report: strength degradation by gamma-ray exporsure-, Proceedings of the annual conference of the Robotics Society of Japan (2018), 1D2-03 (in Japanese).

Ma, S., Optimal arm posture control and tendon traction forces of a coupled tendon-driven manipulator, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 63, No. 609 (1997), pp. 1665-1670 (in Japanese).

Perrot, Y., Gargiulo, L., Houry, M., Kammerer, N., Keller, D., Measson, Y., Piolain, G. and Verney, A., 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. 22, No.1 (2012), pp.175-185.

Snoj, L., Lengar, I., Cufar, A., Syme, B., Popovichev, S., Conroy, S., Meredith, L. and JET EFDA Contributors, Calculations to support JET neutron yield calibration: modelling of the JET remote handling system, Nuclear Engineering and Design, Vol. 261 (2013), pp.244-250.

Takata, A., Endo, G., Suzumori, K., Nabae, H., Mizutani, Y. and Suzuki, Y., Modeling of synthetic fiber ropes and frequency response of long-distance cable-pulley system, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 3, No. 3 (2018), pp.1743-1750.

Takeichi, M., Suzumori, K., Endo, G. and Nabae, H., Development of a 20-m-long Giacometti arm with balloon body based on kinematic model with air resistance, in Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (2017), pp.2710-2716.