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)	超長尺ワイヤ駆動型多関節アームの開発―干渉ワイヤ駆動機構と自重補償機構による駆動方式の提案―
Title(English)	Development of Hyper Long-reach Tendon-driven Multi-joint Manipulator -Combination of a Coupled Tendon-driven Mechanism and a Weight-compensation Mechanism-
著者(和文)	堀米篤史, 遠藤玄, 鈴森康一
Authors(English)	Atsushi Horigome, Gen Endo, Koichi Suzumori
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2016講演概要集, Vol. , No. , 2P1-15a5
Citation(English)	Proceedings of the 2016 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , 2P1-15a5
発行日 / Pub. date	2016, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

超長尺ワイヤ駆動型多関節アームの開発
―干渉ワイヤ駆動機構と自重補償機構による駆動方式の提案―

Development of Hyper Long-reach Tendon-driven Multi-joint Manipulator
-Combination of a Coupled Tendon-driven Mechanism and a Weight-compensation Mechanism-

○ 堀米篤史 (東工大)　正　遠藤玄（東工大）
正　鈴森康一（東工大）
Atsushi HORIGOME, Tokyo Tech, horigome@robotics.mes.titech.ac.jp
Gen ENDO, Tokyo Tech
Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech

Recently long-reach multi-joint robot manipulator is widely required. In this research, we suggested a new mechanism which is the combination of a coupled tendon-driven mechanism and a weight-compensation mechanism in order to develop hyper long-reach and slim manipulator. We calculated that this mechanism can lead to a slim arm diameter by saving the total of wires widths. Unfortunately, this mechanism doesn't compensate arm weight completely at any arm posture. Therefore, we suggested a method of calculation of an optimal weight-compensation wire tension. Moreover, we did a trial calculation of wires tension at some arm postures. In future work, we will conduct experiments with a prototype model.

Key Words: Robot, Manipulation, Long-reach, Tendon-driven

1　序論

近年，福島第一原発の廃炉作業を始めとして，災害時に人が立ち入れないような空間へ進入し調査・作業を行う事が可能な長尺ロボットアームの開発が求められている．現存する長尺かつアーム径の小さいスリムなロボットアームには柔らかいアーム体幹の側面にワイヤを張って駆動する構造 [1] や平行リンク機構にばねを用いることで重力を補償している構造 [2] がある．しかし前者はアーム体幹とワイヤの間に摩擦が生じるために長尺なアームで曲率の大きい姿勢を取ることが難しく，後者はアームの長尺化に伴い自重補償に用いられるばねが巨大になり，根元付近のアーム幅が非常に大きくなる課題がある．

一方，ワイヤ・プーリ系で構成される干渉ワイヤ駆動 [3] ではプーリを用いる事で摩擦を小さくし，さらに干渉ワイヤ駆動機構により根元部で必要な莫大なトルクを比較的小さな力で生成している．しかし本機構ではアームの長尺化に伴う関節数や必要ワイヤ径の増加が根元付近のプーリ数やプーリ幅の増加につながり，結果的にアーム幅が大きくなる課題がある．

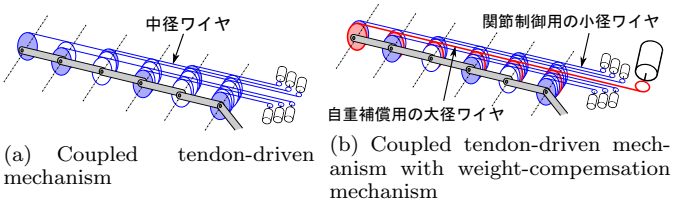
そこで，我々はワイヤ自重補償機構を有する多関節アーム [4] に着目した．本アームは 4 節平行リンクを直線上に連結した構造を持ち，それ故にアームの姿勢を維持するために各関節に必要なトルクがアームの姿勢によらず常に一定であるという特徴を持つ．この原理を利用し，アーム体幹中心部に太いワイヤを根元から先端まで張り，根元側に重りで一定荷重を加えることにより各関節に常に一定のトルクを生成する事で自重補償を行っている．しかし，本アームは 4 節平行リンクを連結するため，部品点数の多さ，それによる自重増加，曲げ・ねじりモーメントに耐える剛性の確保といった課題がある．そのため，この自重補償機構を従来のワイヤ・プーリ系で構成される干渉ワイヤ駆動機構に取り入れることで長尺・スリムな多関節アームを実現しうる新たな駆動機構を提案する．

2　干渉ワイヤ駆動への自重補償機構の導入

ワイヤ・プーリ系で構成される干渉ワイヤ駆動を用いた多関節アームと，本研究で提案する自重補償機構を取り入れた機構を図 1 に示す．従来の干渉ワイヤ駆動 (図 1(a)) では，ある関節を駆動するワイヤがその関節より根元側の全ての関節に受動プーリを介して 1 回ずつ巻かれており，そのワイヤの張力は巻かれている関節全てにトルクを生成することができる．このため，最も根元側の関節では全ワイヤ張力がトルク生成に寄与し，アームの自重を支えるために必要な大きなトルクを生み出している．

一方，提案する手法 (図 1(b)) ではアームの中心に 1 本の太い自重補償用のワイヤを張り，このワイヤの張力でアームの自重の大部分を支える．それ以外にも従来と同じ巻き方で細いワイヤを張る事で，残りのアームの自重を支えると同時に関節位置を制御する．

本提案手法では従来の干渉ワイヤ駆動と比べ，張力を 1 本のワイヤに集中させる事で全ワイヤ幅の合計値が小さくなるという，スリムなアームを実現する上での大きな利点がある．



(a) Coupled tendon-driven mechanism

(b) Coupled tendon-driven mechanism with weight-compemsation mechanism

Fig.1 Wires and pulleys arrangements of 6 pitch axes manipulator

3　張力の一極集中化によるワイヤ合計幅の減少効果

アーム内の関節数の増加に伴い，必要となるワイヤ本数も増えていく．プーリを用いた駆動機構の場合，各関節ではプーリを同軸上に並べていくため，そのアームに必要な最小幅 W はワイヤ径 d とワイヤ本数 n の積 nd となる．第 2 節で述べたように，干渉ワイヤ駆動ではある関節を経由する全てのワイヤ張力がその関節に生じる駆動トルクに寄与する．そのため，全てのプーリ径が等しいと仮定すると，最も負荷の加わる関節を駆動するのに必要な合計張力 F から必要なアーム最小幅 W を算出する事ができる．ここでは従来方法における必要なアーム最小幅 W_1 と，本提案手法である自重補償用ワイヤを導入した場合の必要なアーム最小幅 W_2 について議論する．

各機構における必要アーム最小幅の概要を図 2 に示す．単位長さの直径で f の力を発生する事ができるワイヤを n 本用いる駆動系を考える．一般的にワイヤの引張強度は断面積に比例するため，このワイヤは直径 d の時には $d^2 f$ だけの力を発生することができる．アームの駆動に大きな力 $F(\geq fn)$ が必要である時，全てのワイヤ径を均一に太くする場合のワイヤ直径 d_1 とアーム幅 W_1，および本提案手法である自重補償用ワイヤを 1 本導入した場合の太いワイヤ直径 d_2，細いワイヤ直径 d_3 とアーム幅 W_2

の関係式は次のようになる．

$$F = nd_1^2 f\,, \qquad W_1 = nd_1 = \sqrt{nF/f} \tag{1}$$

$$F = d_2^2 f + nd_3^2 f\,, \quad W_2 = d_2 + nd_3 = \frac{d_{23}+n}{\sqrt{d_{23}^2+n}}\sqrt{F/f} \tag{2}$$

ここで，d_{23} は小径ワイヤと大径ワイヤの直径の比 $d_{23} = d_2/d_3$ である．それぞれのアーム幅 W_1,W_2 の大小関係を比べると，

$$d_{23} \geq \frac{2n}{n-1} \quad \Rightarrow \quad W_1 \geq W_2 \tag{3}$$

となるため，小径ワイヤと大径ワイヤの直径の比が十分に大きければ自重補償用ワイヤを導入した方が必要なアーム最小幅が小さくなり，より細いアームの実現が可能である事がわかる．

例えば，長さ $L = 10\,\mathrm{m}$，質量 $M = 50\,\mathrm{kg}$，プーリ半径 $R = 100\,\mathrm{mm}$，関節数 $n = 10$ のアームを想定し，JIS で定める直径 1mm で $f = 912\,\mathrm{N}$ の破断強度を持つステンレスワイヤロープ [5] を用いる時，必要張力 F と均一に太くした場合のワイヤ径 d_1 は

$$F = \frac{Mg(L/2)}{R} = 24500\,[\mathrm{Nm}], \quad d_1 = \sqrt{F/(nf)} = 1.64\,[\mathrm{mm}]$$

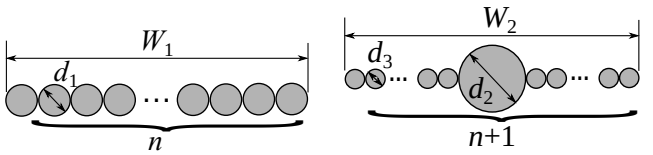
となる．この時，細いワイヤ直径を $d_3 = 0.5\,\mathrm{mm}$ とすると，

$$d_2 = \sqrt{F/f - nd_3^2} = 4.94\,[\mathrm{mm}]$$

となり，各場合のアーム最小幅 W_1, W_2 は

$$W_1 = nd_1 = 16.4\,[\mathrm{mm}], \quad W_2 = d_2 + nd_3 = 9.9\,[\mathrm{mm}]$$

となるため，必要なアーム最小幅は本提案手法を用いた場合の方が小さい事がわかる．



(a) Coupled tendon-driven mechanism

(b) Coupled tendon-driven mechanism with weight-compemsation mechanism

Fig.2 Required arm width in each mechanisms

4 自重補償用張力の制御則と簡易モデルによる試算

長尺アームはその姿勢により各関節で必要なトルクが大きく異なり，自重補償用張力と拮抗する側のトルクが要求される事もある．よって，アームの可動範囲を大きく取るためには自重補償用ワイヤの張力を制御する機構が必要である．この時，最適な自重補償張力は次の手順で求めることが可能である．

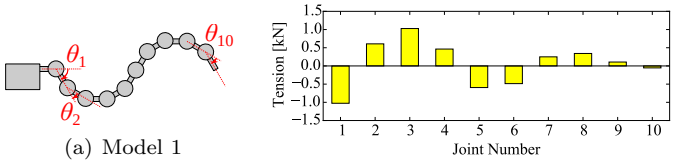
1. アームの姿勢を決め，各関節の角度 θ を算出する．
2. 各節の質量・重心位置から，アームの姿勢を維持するために各関節に必要なトルク $T(\theta)$ を求める．
3. 自重補償用張力 F を定め，各ワイヤのプーリ径から，アーム先端節から順にそれぞれの必要なワイヤ張力 $f(T(\theta), F)$ を算出する．
4. 自重補償用張力 F を変え，ワイヤ張力の最大値 $\max(f)$ が最も小さくなる F を探す．

以上の手法を用いて，3 節で例に挙げた長さ 10m，半径 0.1m，質量 50kg のアームがピッチ軸の関節を 10 個持つような簡易モデルを想定し，各姿勢におけるワイヤ必要張力を試算した．ここで，アームの姿勢を水平にした時に完全自重補償（関節制御用ワイヤの張力がゼロ）となるように，自重補償用ワイヤが巻かれるプーリ径を定めた．尚，プーリは文献 [4] の自重補償機構と同じ二重プーリを想定しており，手先側ほど自重補償用ワイヤによる発生トルクが小さくなるようにしている．また，完全自重補償時のワイヤ張力は 24.5 kN である．特徴的な 2 種類の姿勢における自重補償用ワイヤ張力及び関節制御用ワイヤ張力の試算結果を図 3 及び図 4 に示す．ここで，図中の張力が正の時はアームを持ち上げる方向，負の時は下げる方向に張力を発生している時である．また，横軸は根元側から数えた各関節に取り付けられているワイヤの番号を示す．

図 3 のような正弦波状の姿勢の時 ($\theta_{1-10} = [-60, 30, 30, 30, 30, 0, -30, -30, -30, -30]\,\mathrm{deg}$)，必要な自重補償用ワイヤ張力は 17.65kN であり，第 1 と第 3 関節に取り付けられているワイヤにおいて最大張力 1.03kN を必要とした．

図 4 のようなアームを持ち上げるような姿勢 ($\theta_{1-10} = \pi/2/10\,\mathrm{deg}$) の時，必要な自重補償用ワイヤ張力は 20.75kN であり，第 1 と第 7 関節に取り付けられているワイヤにおいて最大張力 0.66kN を必要とした．

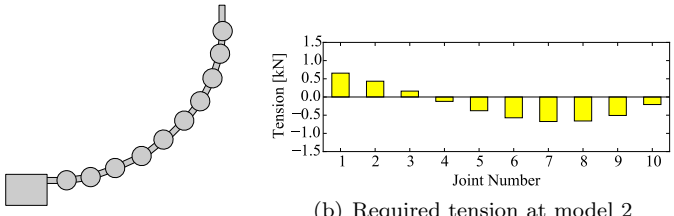
試算により，姿勢によって適する自重補償用ワイヤ張力が大きく変化する事，さらに関節制御用ワイヤ張力が最大となる関節番号も姿勢によって変化する事を確認した．



(a) Model 1

(b) Required tension at model 1

Fig.3 Wires and pulleys arrangements of 6 pitch axes manipulator



(a) Model 2

(b) Required tension at model 2

Fig.4 Wires and pulleys arrangements of 6 pitch axes manipulator

5 結論

本論文では長尺・スリムな多関節アームを実現しうる機構として，従来の干渉ワイヤ駆動に対して新たに自重補償機構を取り入れた新しい駆動機構を提案した．アームの自重を支えるために必要な力を 1 本のワイヤに集中させることでアーム全体の幅が小さくなることを解析的に示した．また，自重補償用張力の決定手法を示し，簡易モデルによる各姿勢における必要ワイヤ張力を試算した．今後は図 5 に示す 1 本の自重補償用ワイヤと 6 本の関節制御用小ワイヤを持つ長尺ロボットアーム試作機 3 関節モデルを用い，先端部に重りを乗せることで長尺化した時の根元部に必要なトルクを模した状態を作り，ワイヤ張力の制御・観測を行うことで長尺の実現可能性と制御性を評価する予定である．

謝辞

この成果は，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．

References

[1] R. O. Buckingham and A. C. Graham. Dexterous manipulators for nuclear inspection and maintenance - case study. *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry(CARPI 2010)*, Vol. 2010, , October 2010.

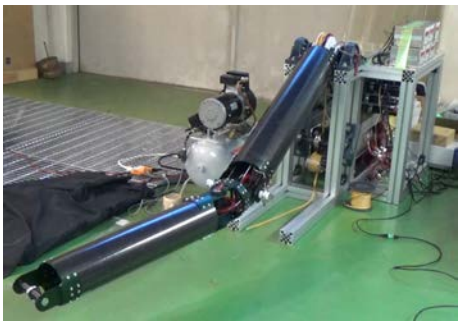


Fig.5 3 joints prototype model of the combination of a coupled tendon-driven mechanism and a weight-compensation mechanism

[2] 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, pp. 175–185, 2012.

[3] A. Horigome, H. Yamada, G. Endo, S. Sen, S. Hirose, and E.F. Fukushima. Development of a Coupled Tendon-Driven 3D Multi-joint Manipulator. In *Robotics and Automation, 2014. Proceedings. ICRA '14. IEEE International Conference on*, pp. 5915–5920, Jun 2014.

[4] S. Hirose, T. Ishii, and A. Haishi. Float Arm V: Hyper-Redundant Manipulator With Wire-Driven Weight-Compensation Mechanism. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 368–373, Sept 2003.

[5] JIS G 3540 : 2012.