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	超長尺軽量細径ロボットアームの試作
Title	Development of Hyper long, light, and slender manipulator
著者	稲岡敬之, 鈴森康一
Author	Takayuki Inaoka, Koichi Suzumori
掲載誌/書名	ロボティクス・メカトロニクス講演会2015 予稿集, Vol. , No. , pp. 1A1-A10
Journal/Book name	Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp. 1A1-A10
発行日 / Issue date	2015, 5
URL	http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

超長尺軽量細径ロボットアームの試作

Development of Hyper long, light, and slender manipulator

○　稲岡　敬之（東工大）　　正　鈴森　康一（東工大）

Takayuki INAOKA, Tokyo Institute of Technology, inaoka.t.aa@m.titech.ac.jp
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

In recent years, a long and slender robot arm is required for entering narrow space while avoiding obstacles and doing various works such as inspection and searching at nuclear power plant, collapsed building, and so on. In this research, we established the design method of the robot arm that will be longer, lighter and slenderer than any other previous research and products with pneumatic McKibben artificial muscles which are quite light, compared with normal actuators such as a motor. Besides, toward the final objective length, 20m, we have made about 3m prototype of the robot arm and did the driving experiment of it.

***Key Words*:** Robot arm, Artificial muscle

1.　緒言

原子力発電所といった、障害物が数多くある入り組んだ空間に進入し、点検などの各種作業を行うロボットとして長尺ロボットアームが近年求められている。

従来研究・開発には文献[1][2]のようなものがあり、長いもので 10m 程、アーム径は 20cm 程であり、質量は 15kg 程であると推察される。このようなアーム長さでは求められる作業に対して十分でなく、太径であるために狭い隙間に入り込むことができない。また大重量であることから運搬、実用が困難である。

長尺ロボットアームを開発する上での一番の技術的課題は、自重を支える方法にあり、通常の設計では過重量、極太径になってしまう。その解決策として、モータなどの従来のアクチュエータと比べて極めて軽量な空圧マッキベン型人工筋肉[3]を使用することで、従来のロボットアームの長さを大きく超える長さをもち、また軽くて細いロボットアームの設計方法の構築と、製作を本研究では行う。

具体的な目標長さとしては 20m を目指す。これを 1m のアーム節を 20 個連ねることで実現する。このときの自由度は 1 節ごとに 2 自由度あるので、全て併せて 40 自由度のロボットアームとなる。

本論文では、その最終目標への一段階として約 3m のものを試作し、その駆動実験を行って得た結果を示す。

2.　ロボットアームの概念設計

2.1 アーム自重の支持方程式の導出

本研究の、ロボットアームの自重を支える基本方針は、先端のアーム節を一つ後ろのアーム節が支え、その次のアーム節がそれら前方のアーム節を支え、そのまた次のアーム節が、というように先頭のアーム節から順に支持していく、というものである。

その前方のアーム節を支持する具体的な方法は、関節まわりでのモーメントのつりあいをとる、というもので、そのつりあい方程式は以下のように求めた。この式により目的姿勢時のロボットアームの自重を支持するために必要な、各関節における人工筋の収縮力を算出することができる。

図 1 のようなロボットアームの模式図において例えば、黄色の関節まわりのモーメントのつりあいを考えると、その関節より前方にあるアーム節や人工筋などの総質量を M、それらの重心と関節の回転軸までの距離を l、重力加速度を g、人工筋による収縮力を F、関節の回転軸から人工筋の収縮力の作用線に下ろした垂線の長さを r とすると、モーメントのつりあい方程式は下の(1)式のようになる。

$$Mg \times l = F \times r \;\Leftrightarrow\; F = \frac{Mgl}{r} \tag{1}$$

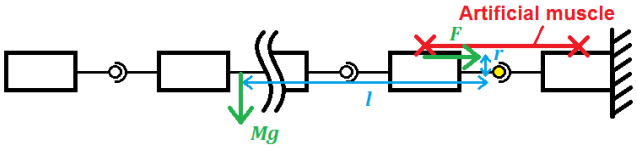

Fig. 1 Model diagram of the robot arm

2.2 ロボットアームの構成

ロボットアームの単位駆動系は図 2 のようになっている。アーム胴体はユニバーサルジョイントで連結されており、人工筋に接合された「腱糸」という糸を、アーム胴体に接着された「結び板」と呼ばれる板に結び付け、コンプレッサーからの圧縮空気を送気チューブを通して人工筋に供給し、収縮させることでアーム節を曲げる、という構成である。これを 1 関節につき 4 系設けてアーム節を上下左右に曲げる、という駆動系である。

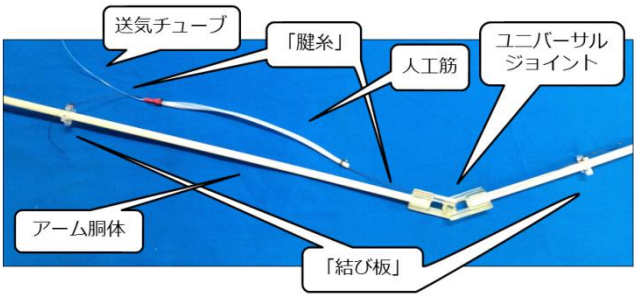

Fig. 2 One unit of the manipulator's drive system

ユニバーサルジョイントは図 3 のような形状をしている。通常のものとの相違点は、外周部に 4 つ設けられた、「腱糸」を通すための小径の貫通穴である「糸穴」にある。「糸穴」の中心軸からアーム胴体の中心軸までの距離は式(1)における r

である。なぜなら、アーム胴体の中心軸はユニバーサルジョイントの回転軸と垂直に交わるためである。これにより、アーム胴体の径に関係なく r の値が大きくなるように設計することができ、それによって式(1)の関係より、自重を支えるために必要な人工筋の収縮力、ひいては、束ねて使用する人工筋本数を減らすことができる。

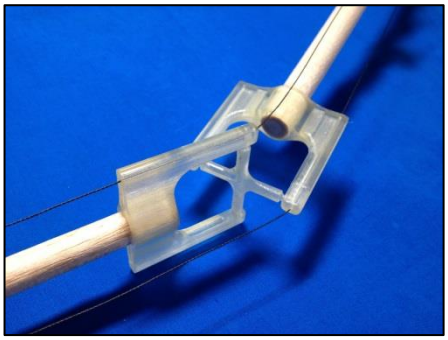

Fig. 3 Universal joint when “Tendon-strings” are passed through 2 “String-holes”

「結び板」は図 4 のようなもので、外縁部に、「腱糸」を括り付けるための小径穴である 4 つの「糸結び穴」がある。「糸結び穴」の中心軸とアーム胴体の中心軸との距離は、隣接するユニバーサルジョイントの r 値と同じになるように設計する。

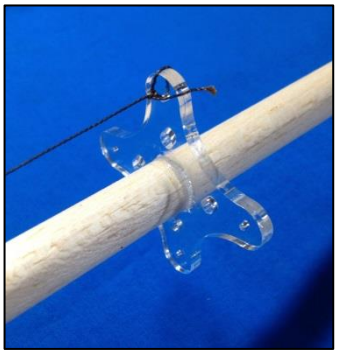

Fig. 4 “Knotting board” when “Tendon-string” is tied to “String-knotted-hole”

ロボットアームの各構成部品の素材は以下のように選定した。

本研究で使用する空圧マッキベン型人工筋肉の質量は 0.013g/cm、初期外径は 1.3mm である。また、最大収縮力は 6N ほどで、その軽さを考慮すれば十分な出力である。これを束ねて使用することで必要な大きさの収縮力を発揮させる。

アーム胴体に使用する素材としては、軽くてしなりにくい素材としてバルサ丸棒を選んだ。長さは 90cm である。

ユニバーサルジョイントはアクリル系 3D プリンタであるキーエンス社の「AGILISTA-3100」を用いて製作した。この製作方法を選択した理由としては、ドリル加工では困難な小径深穴を作る必要があり、原材料はアクリル系で十分な軽さと強度をもつためである。

「腱糸」には比強度が高いという理由からザイロンを選択した。実際の製品としては YGK よつあみ製の「ザイロン X」を用いている。

「結び板」は、軽くて高強度なキャストアクリル板である「カナセライト」（カナセ工業）をレーザー加工機で切り出すことによって作成する。

送気チューブには、軽量で最大供給空圧値に耐えられるものとして NICHIAS 製「ナフロン PTFE チューブ(0.5mm×1.0mm)」を使用している。

各部品同士を接着させるための接着剤としては Henkel 社の「LOCTITE 401 難接着タイプ」を用いた。この接着剤を選んだ理由は、接着強度が高く、本研究では難接着材に対して使用する必要があるためである。

また、ロボットアーム先端に CMOS カメラ「CP-100C」を搭載し、その導線をアームに沿わせて配置する。

2.3 アームの回転角度と人工筋の収縮量の関係式の導出

各関節に配置する人工筋の自然長を設計するために、アームの回転角度と人工筋の収縮量の関係式を以下のように導出した。

2 つのアーム節が真直状態の時の関節部分をモデル化すると図 5 のようになる。図中左の「結び板」からユニバーサルジョイントの「糸穴」の端までの距離をl_1、その穴の端からもう一つの「結び板」までの距離をl_2、「結び板」の「糸結び穴」の中心軸とアーム胴体の中心軸との距離を r としている。この r は式(1)中の r と同じである。

次に、人工筋を収縮させて前方のアーム節を真直状態から角度 α 回転させたときを考えると、図 6 のようなモデル図になる。ここで、ユニバーサルジョイントの「糸穴」の端から図中右の「結び板」までの距離はl_2' に変化している。これらのモデル図から図 7 のような幾何学的関係が得られ、以下の式が立式できる。

$$\tan\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)=\frac{r}{l_2-l_2'} \tag{2}$$

上式を変形すると下式のようになる。

$$\alpha=\frac{\pi}{2}-\tan^{-1}\left(\frac{r}{l_2-l_2'}\right)=\frac{\pi}{2}-\tan^{-1}\left(\frac{r}{\varepsilon L}\right) \tag{3}$$

ここで、ε は人工筋の収縮率を表すが、これは実際の人工筋の収縮率から、2 つのアーム節が真直状態になったときの人工筋の収縮率を差し引いたものであることに注意する。また L は人工筋の自然長である。

(3)式から、ある r 、ε 、L の時のアームの最大回転可能角度を求めることができ、これを基に各ジョイントに配置する人工筋の自然長を設計することができる。

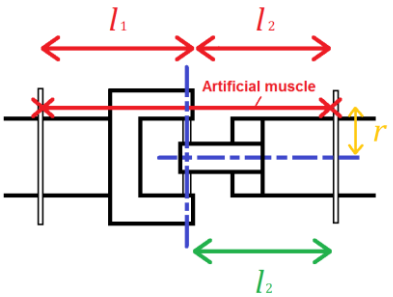

Fig. 5 Model diagram of the joint part when 2 arm segments are straight

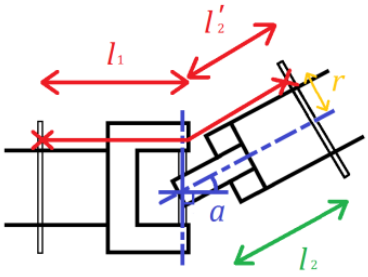

Fig. 6 Model diagram of the joint part when an arm segment is rotated at α degree

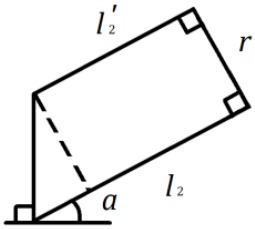

Fig. 7 Geometrical relation that is led by Fig. 5 and Fig. 6

2.4 ロボットアームの駆動制御系

ロボットアームの駆動制御系は図 8 のようなシステム図をとる。ロボットアームに取り付けられた各人工筋に目的とした空圧値が供給されるように、コンプレッサーから送られる圧縮空気を CKD 製電空レギュレータ「MEVT Series」で調節して給気する。電空レギュレータの操作にはマイコンの Arduino の PWM 信号と、それをアナログ値に変換する DA コンバータ「MCP4922」を用いる。これらに加えて、電空レギュレータの電源供給用の安定化電源と、Arduino との通信用のパソコンが制御系に含まれる。

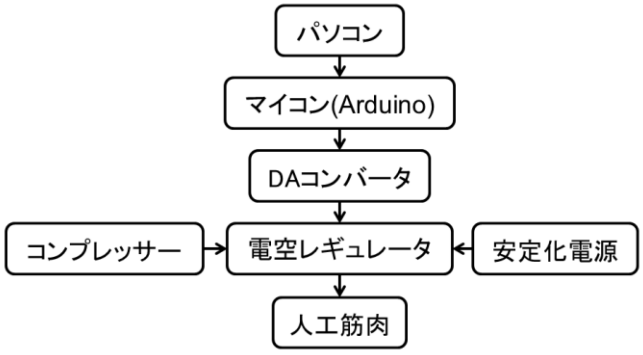

Fig. 8 Control system of the manipulator's drive

3. ロボットアームの製作

以上のことを考慮して設計し、試作したロボットアームは図 9 のようになった。仕様としては、全長 2.7m、全質量 100g、直径(先頭から順に)2.0, 2.6, 5.0cm、3 節、6 自由度、である。

そして、その試作品の駆動実験を行った。その時の様子を図 10 に示す。また、駆動実験によって、第一、第二関節での上下左右方向の最大回転可能角度を計測した結果を表 1 に示す。

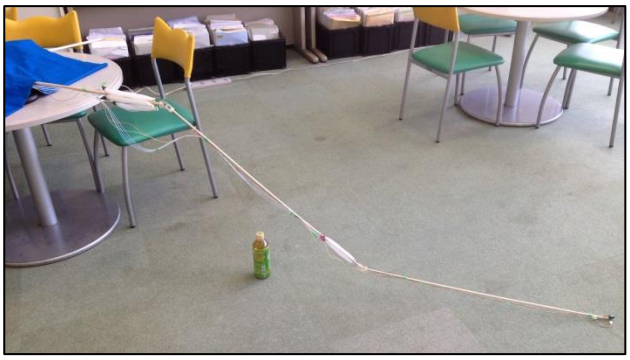

Fig. 9 Prototype of the robot arm

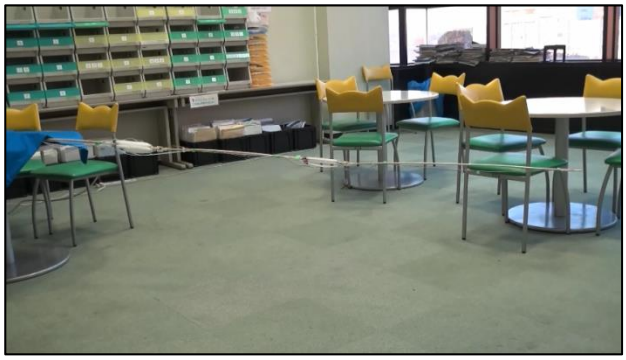

Fig. 10 The state of the driving experiment of the prototype when 3 arm segments are straight

Table 1 Maximum rotation angle of the prototype

	第 1 関節	第 2 関節
上方向[°]	50	40
右方向[°]	40	50
左方向[°]	40	50
下方向[°]	90	90

4. 結言

本研究では「超長尺軽量細径ロボットアーム」の設計方法を構築し、約 3m のそれを試作した。そしてその駆動実験を行った。今後の展望としては、最終目標である 20m を目指してロボットアームの試作を続けることが挙げられる。

文 献

[1] 洗津, 山田浩也, 広瀬茂男, 他, "原発の空中点検を行う干渉ワイヤ駆動型多関節アームの開発—立体関節機構の導入と小型モデル機の試作—", ロボティクス・メカトロニクス講演会 1A2-P20, 2013.

[2] アンニャ・シュッツ maxon motor, "ヘビ型アームロボットが狭いスペースに舞う", http://www.maxonjapan.co.jp/maxon/view/application/SNAKE-ARM-ROBOT-AB, 作成日：2012/10/11, 訪問日：2015/02/13.

[3] 高岡真幸, 鈴森康一, 脇元修一, 他, "生体模倣ロボット機構実現に向けた多繊維構造マッキベン人工筋", 第 14 回システムインテグレーション部門講演会(SI2013) システム構成学論文集第 6 巻, pp.1767-1770, 2013.