

空気圧人工筋肉を用いた7自由度マニピュレータの開発

Development of 7-DOF manipulator using pneumatic artificial muscles

精密工学専攻 46号 前原正典
Masanori Maehara

1. 緒言

近年、様々なロボットが人間生活に進出してきている。そのため、ロボットと人間が接触する機会を避けることはできない。したがって、人間と共存することを想定したロボットは、人間との接触時の安全性や人間との共同作業に適した動作特性が要求される。このような特性を備えたアクチュエータとして空気圧ゴム人工筋肉が注目されている。

人工筋肉は、柔軟で人間に近い筋特性を有している。とりわけ、本研究で使用する軸方向繊維強化型人工筋肉は、従来の McKibben 型ゴム人工筋肉に比べ収縮率や収縮力が高く、寿命が長いという長所を有している⁽¹⁾。そのため、本人工筋肉は人間と密接した環境で動作するロボットのより高性能なアクチュエータとして期待されている。

前田⁽²⁾らの報告において、本人工筋肉を用いた 6-DOF マニピュレータが開発された。しかし、本マニピュレータには以下に示す三つの問題点がある。

第一に各人工筋肉間のスペースが不足しお互いがぶつかり合い干渉している点である。この結果、マニピュレータを稼働させる度に人工筋肉同士が擦れ合い摩擦が発生し、耐久度の減少、制御の不安定化が生じている。

第二に人間の腕と比べて自由度が少ない・自由度を追加するための人工筋肉を追加するスペースがないという点がある。文献⁽³⁾においては、自由度の不足を制御の手法によって補うことで、人間同様の動きをさせていた。しかし、この方法ではマニピュレータの動き全体が大掛かりになってしまい、細かい動きをする際などに問題があると考えられる。具体例として、マニピュレータに円軌道を追従させる場合を考える。人間の場合、この動作は手首を返せば簡単に達成できるが、自由度が不足しているため肩全体でまわさなければ達成できない⁽³⁾。

最後に関節部に用いているベアリング機構が構造上大きな荷重に対応することができていないという問題がある。本ベアリングは大きな荷重が印加された際、その荷重によってマニピュレータの動作への影響を避けることや、マニピュレータの動きを滑らかにするために取り付けられている。そのため、本来ならばラジアル・スラストの両方向の荷重を受けられる必要がある。しかし、現在のスラスト軸受を使用した構造では、一部しかラジアル荷重を受けることができず、完全には荷重を受けられていない。

そこで、本研究では以上の問題点を改良するための機構を考案した。そして、その機構を適用した 7 自由度マニピュレータの設計・製作を行う。そこで、マニピュレータの制御に必要な各種運動計算と制御システムの構築を行った。

2. 軸方向繊維強化型人工筋肉

本研究で使用する軸方向繊維強化型人工筋肉の概略図を Fig.1 に示す。

本人工筋肉は素材に天然ラテックスゴムを使用しており、ゴムをチューブ状に成形し、ゴム内部の軸方向へカーボンロービング繊維を内包した構造を有する。このとき、層状に繊維を配置することで一部のゴムの過膨張を防ぎ、耐久性、効率を向上させている。

本人工筋肉に空気圧を供給すると、ゴム膜は膨張するが、繊維は伸びないため軸方向の長さは拘束される。その結果、人工筋肉は半径方向に膨張して軸方向に収縮する。このときの収縮力をアクチュエータとして利用する。また、本人工筋肉は非常に軽量であり、柔軟性と衝撃吸収能力を有しており、構造的に安全なロボットの実現が可能である。

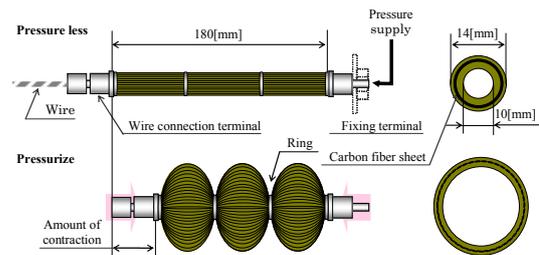


Fig.1 Straight fibers type artificial muscle

3. 7 自由度人工筋肉マニピュレータ

3.1 7 自由度マニピュレータの構造

本研究で作製した 7-DOF マニピュレータを Fig.2, 各関節の駆動範囲と筋配置の並列・単列を Table 1 に示す。

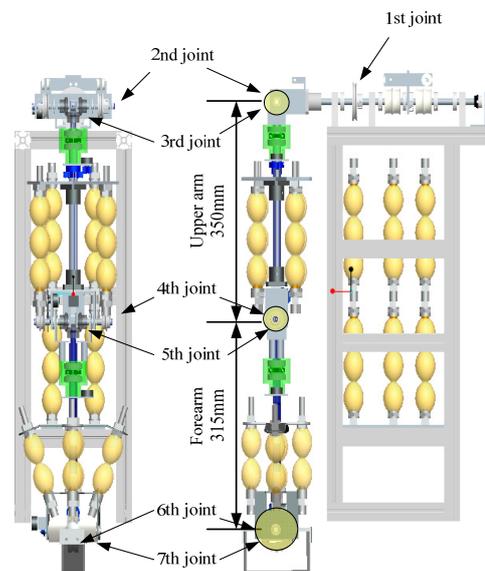


Fig.2 A schematic diagram of 7-DOF manipulator

Table 1 Motion ranges of the 6-DOF manipulator

Joint number	Parts	Joint type	Motion		Range[deg]		Muscle configuration
1	Shoulder	Pivot joint	Flexion	Extension	130	30	Single
2		Rotational joint	Abduction	Adduction	180	0	Parallel
3	Elbow	Pivot joint	External rotation	Inner rotation	90	90	Parallel
4		Rotational joint	Flexion	Extension	140	0	Parallel
5	Wrist	Pivot joint	External rotation	Inner rotation	90	90	Parallel
6		Rotational joint	Flexion	Extension	80	80	Single
7		Rotational joint	Abduction	Adduction	30	30	Single

本マニピュレータは、人間との自由度の差異による協調作業時の不具合やより少ない動きで目標動作を実現できるように肩部(3自由度), 肘部(1自由度), 手首部(3自由度)からなる7自由度に設定し、人間の腕と同様な関節配置を実現した。出力/重量比の高いゴム人工筋肉をアクチュエータとして使用することで、マニピュレータの多自由度化に伴う重量の増加を抑えている。また、アームリンクを覆うように人工筋肉を配置する内骨格構造とすることで、人間とマニピュレータが接触したときの安全性を高めた。

3.2 差動歯車型人工筋肉マニピュレータ⁽⁴⁾の概要

3.2.1 差動歯車型マニピュレータの構造

人工筋肉どうしの干渉や自由度を追加するためのスペース確保のために、差動歯車機構を用いた人工筋肉マニピュレータを作製した。作製したマニピュレータを Fig.3 に示す。また、差動歯車機構の動作を表した概要図を Fig.4 に示す。

本研究では第2, 第3関節と第4, 第5関節に差動歯車機構を採用した。本機構は1つの機構で2自由度の動きを実現できる。まず, Fig.3(a)のようにかさ歯車Aとかさ歯車Bを、それぞれx軸回りに逆回転させる。すると、かさ歯車Cがz軸周りに回転し、腕の内転・外転の動きを実現できる。さらに、Fig.3(b)のようにかさ歯車Aとかさ歯車Bをx軸回りに同方向に回転させる。すると、かさ歯車Cはz軸回りに回転せず、かさ歯車Aとかさ歯車Bとともにx軸回りに回転し、腕の屈曲の動きを実現できる。

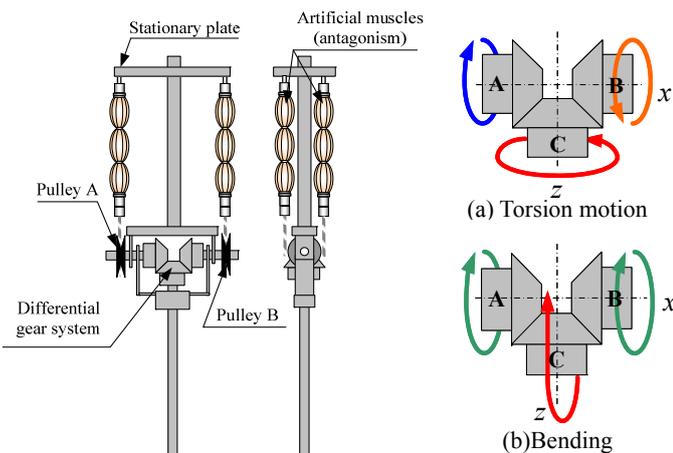


Fig.3 A schematic diagram of manipulator Fig.4 Differential gear

この機構の利点は、既存のマニピュレータではそれぞれ別の機構を用いている屈曲の関節と内外転の関節の2自由度を1つの機構で実現できる点である。既存のマニピュレータでは、アクチュエータである人工筋肉を屈曲で4本、内外転で

2本使っている。しかし、この機構を採用することにより6本の人工筋肉のうち、内外転に使っている2本をなくすることができるため、マニピュレータの軽量化やスペースの確保を実現できる。

3.3 二自由度手首機構

Fig.5,6に手首部の概要図, 二自由度手首関節の構造をそれぞれ示す。この関節は、大きいプーリに小さいプーリが直交する形で納まる構造になっている。これは、関節同士の干渉の低減や逆運動学の計算負荷を減らすためである。大プーリが橈屈・尺屈の動作, 小プーリが屈曲・伸展の動作に当たる。また、拮抗する人工筋肉の一方は可動範囲を確保するために斜めに配置される。そのため、ガイドプーリを斜めに設置し、ワイヤーがプーリの溝に沿うようにしている。

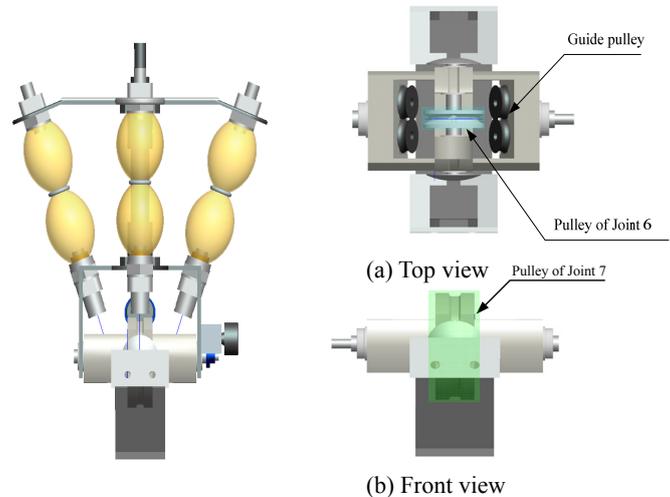


Fig.5 A schematic diagram of wrist Fig.6 A structure of wrist

3.4 新型軸受機構

Fig.7は既存のマニピュレータの軸受, Fig.8は新しいマニピュレータの軸受の構造である。

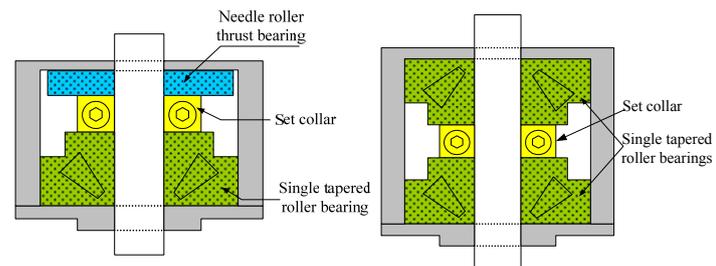


Fig.7 Previous bearing mechanism Fig.8 New bearing mechanism

現在の軸受はリンクにセットカラーを固定し、段差をつけ、それを上下のスラスト針状ころ軸受と円錐ころ軸受で挟みケーシングしている。そのため、上部のスラスト軸受ではラジアル荷重を受けることができない。

そこで、上部の軸受を円錐ころ軸受に変更した。円錐ころ軸受はラジアル荷重, スラスト荷重, どちらの荷重も受けられる軸受である。よってこの構造ならば、ラジアル荷重, スラスト荷重の両方を十分に受けられるようになると思われる。

4. 7-DOF マニピュレータにおける運動学・動力学

本章では、7自由度マニピュレータの制御に必要な各種運動計算方式について述べる。はじめにマニピュレータのモデル化を行い各種運動計算に用いる座標系を示す。続いて、マニピュレータの制御に用いた順運動学計算、逆運動学計算、逆動力学計算の順に説明する。

4.1 マニピュレータのモデルと座標系

マニピュレータのモデルを Fig.4 に示す。第二関節を基準座標系とし、図のように座標系を決定した。また、マニピュレータの姿勢はロール・ピッチ・ヨー角により示す。

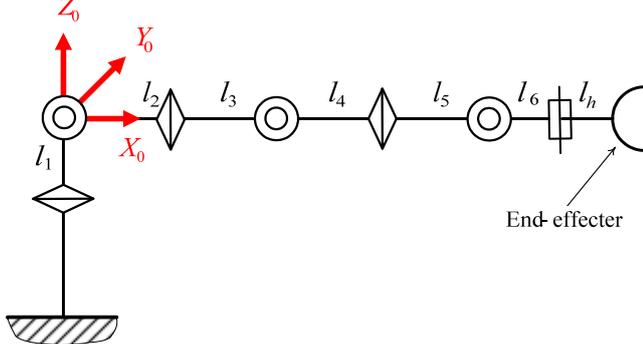


Fig.9 A model of manipulator

4.2 順運動学計算

順運動学(forward kinematics)は、各関節角度が与えられた場合の手先の位置・姿勢を求める計算である。これは、原点座標系から手先座標系に向かって順々に座標変換を行うことで達成できる。Table 2 にリンクパラメータを示す。 x 軸の周りに座標系を θ 回転させる場合を $Rot_x(\theta)$ と表し、 x 軸の方向に l 並進移動させる場合を $Dis_x(l)$ と表す。

Table 2 Parameters among the each coordinates

	Link parameter
$\Sigma_0 \rightarrow \Sigma_1$	$Dis_z(-l_1) * Rot_z(\theta_1)$
$\Sigma_1 \rightarrow \Sigma_2$	$Dis_z(l_1) * Rot_y(\theta_2)$
$\Sigma_2 \rightarrow \Sigma_3$	$Dis_x(l_2) * Rot_x(\theta_3)$
$\Sigma_3 \rightarrow \Sigma_4$	$Dis_x(l_3) * Rot_y(\theta_4)$
$\Sigma_4 \rightarrow \Sigma_5$	$Dis_x(l_4) * Rot_x(\theta_5)$
$\Sigma_5 \rightarrow \Sigma_6$	$Dis_x(l_5) * Rot_y(\theta_6)$
$\Sigma_6 \rightarrow \Sigma_7$	$Dis_x(l_6) * Rot_z(\theta_7)$
$\Sigma_7 \rightarrow \Sigma_h$	$Dis_x(l_h)$

4.3 逆運動学計算

4.3.1 冗長マニピュレータの逆運動学

逆運動学(inverse kinematics)とは、手先の位置・姿勢が与えられた場合に、それらを満足する関節角度を求める計算である。しかし、冗長マニピュレータの場合、手先の位置・姿勢が拘束されても関節角度が一意に定まらない。そこで、今回は清水らの手法⁽⁵⁾を参考にし、逆運動学計算を行う。

この手法は、アームアングルというパラメータを導入して第四関節の位置を拘束することで、逆運動学を可解にするも

のである。アームアングルとは、肩・肘・手首の三点を通る平面と参照面の成す角度を表す。また、参照面とは第二関節と第四関節の軸方向が一致するとき、肩・肘・手首により形成される面のことを指す。Fig.10 にアームアングル q と参照面の概要図を示す。

この手法を本マニピュレータに適用すると式(3)~(5)のように各関節角度が求まる。

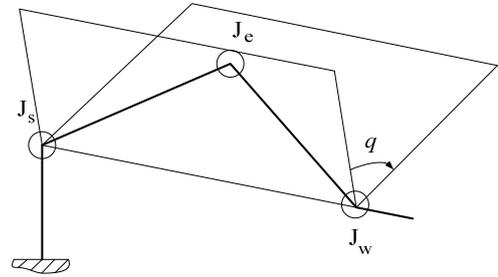


Fig.10 A diagram of arm angle q

$$\theta_4 = \arccos\left(\frac{x_{sw}^2 - (L2+L3)^2 - (L4+L5)^2}{2 * (L2+L3) * (L4+L5)}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

$$\theta_i = \arcsin(a_i \sin q + b_i \cos q + c_i) \quad (2)$$

$$\theta_j = \arctan \frac{a_n \sin q + b_n \cos q + c_n}{a_m \sin q + b_m \cos q + c_m} \quad (3)$$

ここで x_{sw} は肩から肘までのベクトル、 a, b, c は回転行列から求まる係数をそれぞれ表す。また、 i は第 2, 6 関節、 j は第 1, 3, 5, 7 関節に対応する。

4.3.2 シミュレーション

まず、手先の位置・姿勢を指定して逆運動学計算を行う。そして、その計算結果を順運動学計算に適用し、整合性を確認する。Table 3 に指定した位置・姿勢、Table 4 に逆運動学の結果を示す。また、Table 5, Fig.11 に順運動学の結果を示す。ここで、添字 i, f はそれぞれ逆運動学と順運動学に関する値を指す。

Table 3 Parameter of inverse kinematics simulation

Position [m]	x_i	0.5	Posture [deg]	α_i	6.45
	y_i	0.2		β_i	5.92
	z_i	0.4		γ_i	-26.93

Table 4 Result of inverse kinematics simulation [deg]

Joint1	Joint2	Joint3	Joint4	Joint5	Joint6	Joint7
25.206	-82.418	0	94.861	-23.549	2.0718	-19.513

Table 5 Calculation result of forward kinematics

Position [m]	x_f	0.5	Posture [m]	α_f	6.45
	y_f	0.2		β_f	5.92
	z_f	0.4		γ_f	-26.93

Table 3 と Table 5 を比較すると、手先の位置・姿勢が一致

していることがわかる。よって、シミュレーションが正しく行えたと言える。逆運動学を用いることでマニピュレータの手先の位置・姿勢を任意に指定した動作が可能になる。

4.4 逆動力学計算

この計算は、手先にかかる荷重とモーメントから、関節にかかるトルクを求める計算である。人工筋肉は材質がゴムなので、伸びやすく負荷トルクの影響を受けやすい。そのため、制御精度向上のためには、負荷トルクの補償が必要となる。物体の逆動力学計算の方法として、ラグランジュ法とニュートン-オイラー法（以下、N-E法）がある。本研究では計算量を抑えるためにN-E法を用いて逆動力学計算を行う。

N-E法は前向き漸化式と後向き漸化式から構成される。前向き漸化式は、根元から手先に向かって各リンクの運動学的な情報を計算する。後向き漸化式は、前向き漸化式の結果と手先にかかる負荷とトルクを元に、各リンクにかかる力とトルクを手先から根元に向かって計算する。Fig.13にN-E法による逆動力学計算のフローチャートを示す。

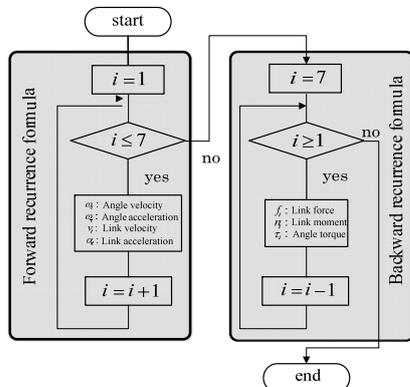


Fig.12 Flow chart of N-E method

5. 7-DOF マニピュレータの制御システム

5.1 力学的平衡モデル

人工筋肉は力学的平衡関係から、収縮量、収縮力に対応する圧力を算出することができる。その関係を表した式を人工筋肉力学的平衡モデル⁽⁶⁾という。式(4)に関節に導入した力学的平衡モデルを表す。ここで、 P_1 、 P_2 はそれぞれの人工筋肉の印加圧力、 θ_d は目標関節角度、 τ は関節負荷トルク、 K_{jd} は目標関節剛性を表している。このモデルから、圧力と関節角度と負荷トルク、および関節剛性の関係が得られる。したがって本モデルを用いることで、目標角度および目標関節剛性を代入しトルクフィードバックを行うことで、加える目標圧力が算出できる。

$$\begin{aligned} P_1 &= P_1(\theta_d, \tau, K_{jd}) \\ P_2 &= P_2(\theta_d, \tau, K_{jd}) \end{aligned} \quad (4)$$

5.2 制御ブロック

力学的平衡モデルを用いて、人工筋肉の入出力関係を線形化することをEMLと呼ぶ。Fig.13にEMLを用いたマニピュレータのブロック線図を示す。このブロック線図は、第1,6,7関節に適用する。また、Fig.14に差動歯車機構を用いた第2,3

と第4,5関節に適用するブロック線図を示す。

ここで、Fig.14の G は差動歯車機構の構造による係数で0.5、 B は第二、第四関節、 T は第三、第五関節に対応する。Fig.13,14を用いることでマニピュレータの角度・関節剛性を制御することができる。

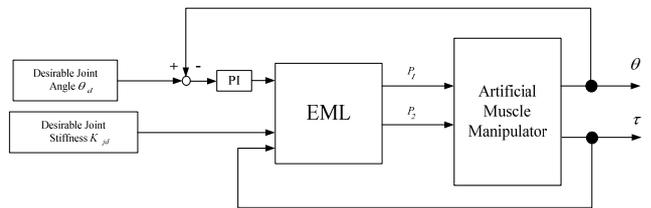


Fig.13 A block diagram of 1-DOF manipulator

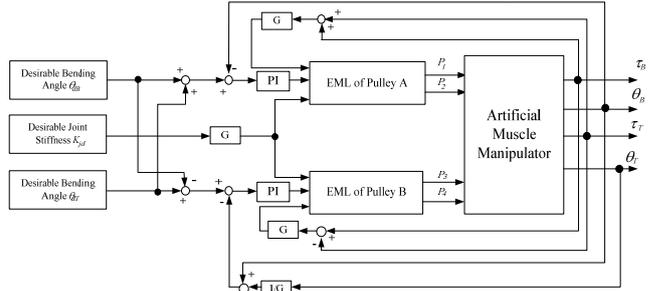


Fig.14 A block diagram of differential gear system

6. まとめ

既存の6-DOFマニピュレータの問題点を改善した7-DOFマニピュレータを設計・作製した。作製したマニピュレータの制御に必要な理論計算を検討した。また、制御システムの構築も行った。

参考文献

- (1) T. Nakamura, "Experimental Comparisons between McKibben type Artificial Muscles and Straight Fibers Type Artificial Muscles," SPIE International Conference on Smart Structures, Devices and Systems III, (2006)
- (2) T. Nakamura, H. Maeda, and H. Nagai, "Development of a 6-DOF Manipulator Actuated with a Straight-Fiber-Type Artificial Muscle," in Proc. The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS2009, pp.607-612
- (3) Hiroki TOMORI, Hiroyuki MAEDA and Taro NAKAMURA, Orbit tracking control of 6-DOF rubber artificial muscle manipulator considering nonlinear dynamics model, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C (JSME), Vol. 77, No. 779, (2011), pp.2742-2755
- (4) T.Nakamura, D.Tanaka, M.Maehara and D.Kamo, Development of a manipulator with straight-fiber-type artificial muscle and differential gear mechanism, The 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON2011,(2011) pp.98-103.
- (5) 清水昌幸, 角谷啓, 尹祐根, 北垣高成, 小菅一弘, 関節の可動範囲を考慮に入れた7自由度マニピュレータの解析的逆運動学解法, 日本ロボット学会誌, 25-4 (2007) pp.606-617.
- (6) Taro Nakamura and Hitomi Shinohara, "Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007), (2007) pp. 4361-4366.