

## 人工筋肉を用いた 6 軸人間共存型マニピュレータの開発

### Development of a 6-DOF Manipulator Actuated by a Straight Fibers Type Artificial Muscle

登録番号

研究者代表 中央大学 助教授 中村 太郎

#### 〔研究の目的〕

近年、医療・福祉分野における介護ロボットや、家庭におけるコミュニケーションロボット等、ロボットが人間と共存する環境に進出している。これらのロボットは人間と密接した動作環境で活躍するため、接触・衝突したときの安全性が確保され、人間との共同作業に適した動作性能を持つ柔軟なアクチュエータを用いると有効である。人間の筋肉は動作・構造ともに柔軟性があり、さらに高出力・高効率で応答が速いので、このようなロボットに使われるソフトアクチュエータの理想的なモデルとして人工筋肉が注目されている。

本研究では、軸方向繊維強化型人工筋肉を用いて人間の腕の関節配置や筋配置を模倣した 6 自由度マニピュレータを開発し、パワーアシストや自立型ロボットへの応用を目的としている。

#### 〔研究の内容、成果〕

##### 1. 軸方向繊維強化型人工筋肉

ゴム人工筋肉には、既にマッキベン型人工筋肉と呼ばれるアクチュエータが広く用いられており、軽量・高出力・柔軟性を実現している。しかし、網目状構造のスリーブを使用していることから、高い収縮率が得られず、ゴムとスリーブの摩擦により壊れやすいという欠点がある。

本研究では図 1 に示す軸方向繊維強化型人工筋肉を開発した。この人工筋肉はマッキベン型とは構造・挙動共に異なり、高収縮率・高耐久性を期待できる。

本人工筋肉は天然ラテックスゴムをチューブ状に成形し、ガラスロービング繊維を軸方向に配置した構造を有する。本人工筋肉に空気圧を供給すると、ゴム膜は膨張するが、繊維は軸方向に拘束される。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。

またチューブにリングを取り付けて過度の膨張による破裂を防ぎ、人工筋の長さや半径の比を調節して様々な条件での特性を検討することができる。

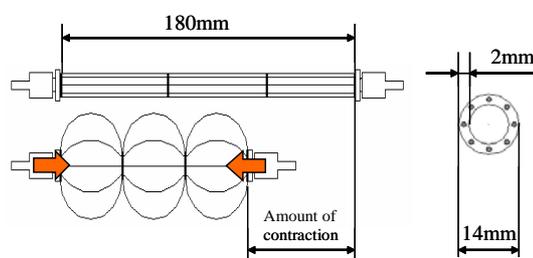


図 1. 軸方向繊維強化型人工筋肉

##### 2. 人工筋肉と生体筋との比較

筋の収縮形態には、大きく分けて静的な等尺性収縮と動的な等張性収縮がある。この二つの収縮特性を、人工筋と生体筋について比較する。

###### 2.1. 等尺性収縮

等尺性収縮は、腕で物を持って静止しているときや動かない物を押しているときなどのように、筋全体の長さを変えずに筋の張力が大きくなるような収縮形態のことをいう。

本実験では、まず人工筋を加圧して種々の筋長で固定する。そこから設定した最大圧力まで圧力を高め、そのときの最大等尺性張力を測定した。実際の生体筋と本人工筋における筋長と張力の関係を図 2 に示す。なお、筋の自然長と最大張力を代表値として、筋長と張力を無次元化してある。

グラフから人工筋・生体筋では上に凸、下に凸の違いはあるが、ともに筋長が長いほうが大きい張力を得られ、収縮量が大きくなるにつれ

で発生できる張力が小さくなっていくという点では同じであるといえる。

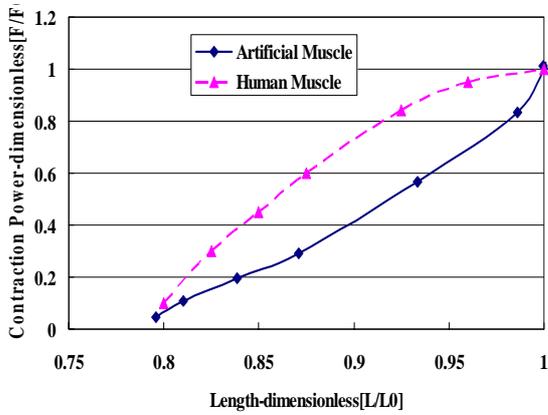


図2. 等尺性収縮における収縮特性

### 2.2. 等張性収縮

等張性収縮は、腕で物を持ち上げたり、跳んだりするときなど、一定重量の負荷を移動させることで筋力を発揮し、筋の張力自体は等しく保たれているような収縮形態である。

実験は、自然長の人工筋の一端に一定の負荷をかけた状態で圧力を加え、収縮の始まりから収縮の完了までの速度を測定した。負荷と収縮速度の関係を図3に示す。

結果から、人工筋・生体筋ともに筋収縮の速度と発生する張力は反比例するという、同様の特性を持っている。

等尺性収縮と等張性収縮の特性から、軸方向繊維強化型人工筋と生体筋の収縮特性は近いと考える。

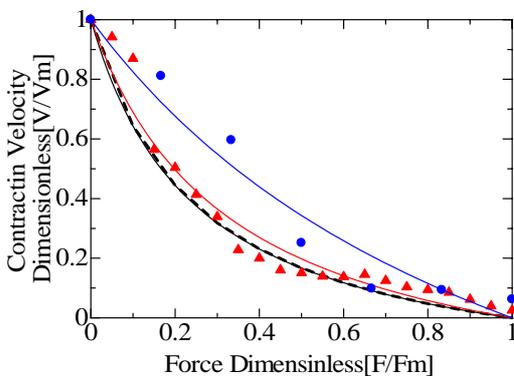


図3. 等張性収縮における収縮特性

## 3. マニピュレータ概要

### 3.1. 駆動方式

本マニピュレータの駆動方式は、人間の腕と同じ拮抗筋駆動である。二本の人工筋をワイヤーで繋ぎ、関節回転軸に固定されたプーリーを介して拮抗配置する。両方に同じ初期圧力を掛けた状態から筋の片方を加圧し、もう一方を減圧すると二本の人工筋肉の収縮力に差が生じる。この収縮力の差がプーリーによって回転運動に変換され、関節を駆動させる。駆動方式の概略図を図4示す。なお、初期圧力を  $P_0$ 、入力する圧力差を  $dP$  とする。

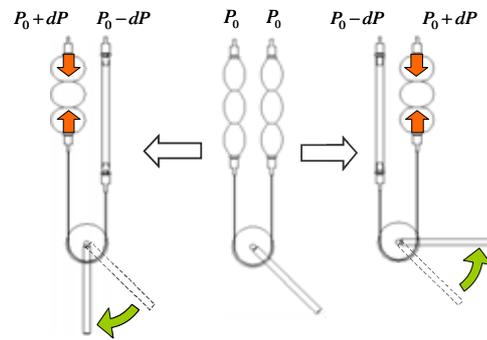


図4. マニピュレータの駆動方式

### 3.2. マニピュレータの構造

本マニピュレータは、手先が任意の位置・姿勢をとることができるように6自由度に設定し、肩3自由度、肘1自由度、手首2自由度として人間の腕に近い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ることができる。また、アームリンクを覆うように人工筋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。

関節駆動トルクと駆動可能範囲はプーリー径に依存してトレードオフの関係になるが、今回の設計では駆動範囲に重点を置いてプーリー径を決定し、駆動トルクについては、人工筋を並列に配置して補う。図5にマニピュレータの概略図を、表1に各関節の駆動範囲と筋配置の並列・単列を示す。

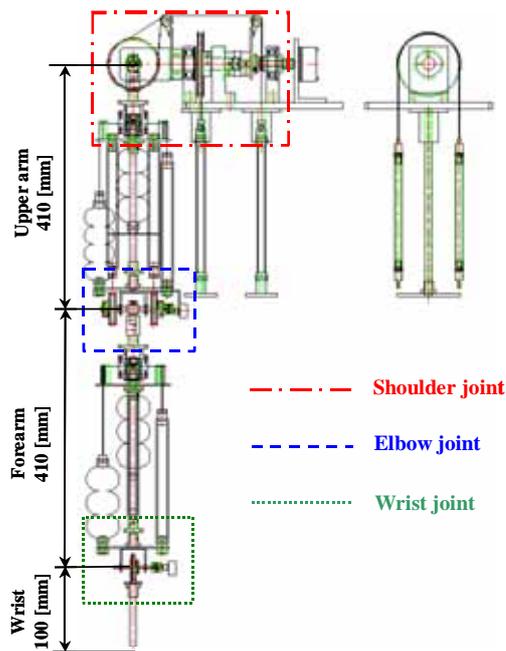


図 5. マニピュレータ概略図

表 1. マニピュレータの移動範囲・筋配置

Parts	Motion	Range [deg]	Muscle configuration
Shoulder	Flexion, Extension	140, 40	Parallel
	Abduction, Adduction	160, 0	Parallel
	External rotation, Inner rotation	80, 80	Single
Elbow	Flexion, Extension	130, 0	Parallel
Wrist	Flexion, Extension	160, 0	Single
	External rotation, Inner rotation	80, 80	Single

#### 4. 位置制御実験

##### 4.1. 実験方法

マニピュレータの位置制御実験を行った。位置制御のブロック線図を図 6 に示す。まず図 7 のように第 2 関節を原点とした  $xyz$  座標を定め、目標位置を  $x=300$  [mm]  $y=400$  [mm]  $z=630$  [mm] とする。手先の目標姿勢をロール・ピッチ・ヨー角  $\theta$  で定義し、 $\theta_x=120$  [deg]、 $\theta_y=-30$  [deg]、 $\theta_z=-150$  [deg] とする。目標位置・姿勢から、逆運動学計算を行って各関節角度を算出する。さらに角度偏差を PI 制御器に通して圧力差  $dP$  を決定し、これを人工筋に入力してマニピュレータを駆動させる。PI 制御器の比例ゲインと積分ゲインは試行錯誤的に求めた。マニピュレータの動きは図 7 のように二台のカメラで撮影し、動作解析ソフト Movias を使って手先の位置を測定する。実験は、無負荷の場合と手先に 0.5 [kg] の負荷を持たせた場合で行った。

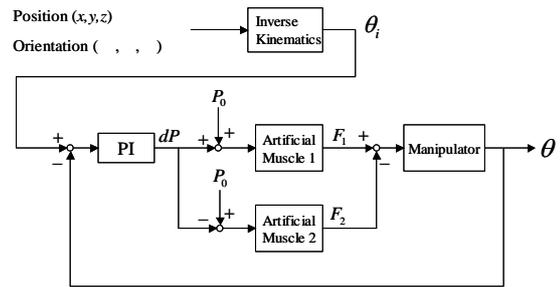


図 6. 位置・姿勢制御のブロック線図

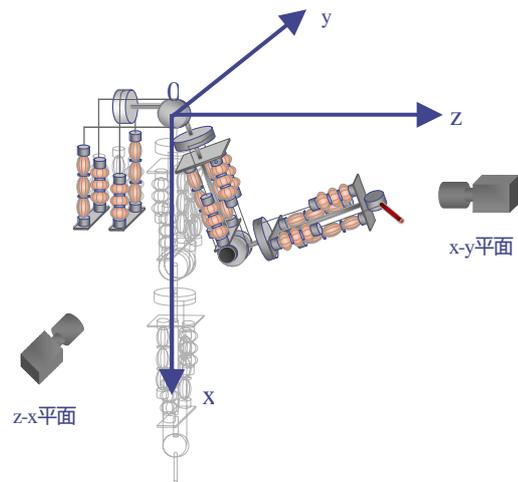


図 7. 各座標と撮影方向

##### 4.2. 実験結果

図 8-10 に本マニピュレータにおける位置制御実験の各座標における結果を示す。これらの図より、マニピュレータの位置はわずかに偏差が残るものの、ほぼ目標位置に到達していることが確認できる。しかしながら負荷印加時において、その挙動が不安定になることが分かる。これは、人工筋は高いコンプライアンスを有するため、負荷印加による慣性力の影響により制御系が不安定になってしまうことが原因であると考えられる。

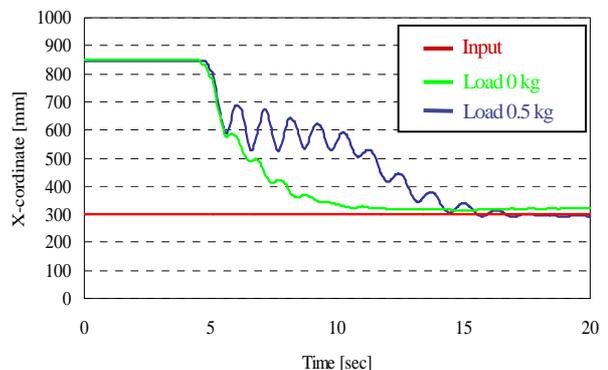


図 8. 位置制御実験結果 (x 座標)

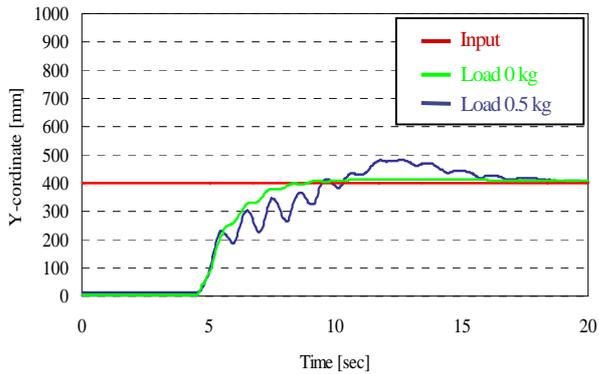


図9. 位置制御実験結果 (y 座標)

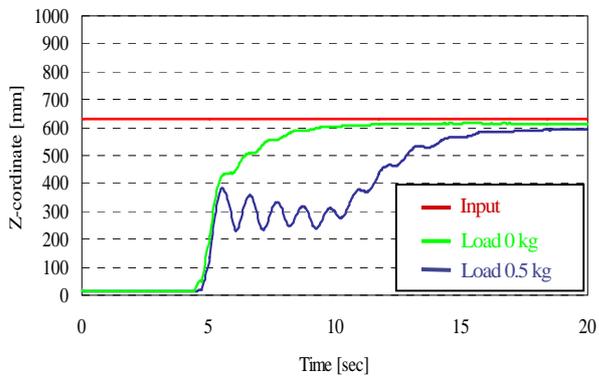


図10. 位置制御実験結果 (z 座標)

〔今後の研究の方向、課題〕

本研究では、高収縮率・高耐久性を期待できる軸方向繊維強化型人工筋肉を作製し、生体筋と近い特性であることを確認した。また、この人工筋を使用して6自由度マニピュレータを開発し、逆運動学計算を利用した位置制御実験を行い、その挙動を確認した。

しかしながら、人工筋肉が有するコンプライアンスの影響により、マニピュレータに負荷がかかる場合、その挙動が不安定になることがわかった。

今後、マニピュレータにかかる負荷に応じて、安定な制御をおこなうために、動力学を考慮した制御系を設計する。また、各関節に必要なトルクに応じた関節剛性を算出するために、人工筋肉への負荷と収縮量と圧力の関係式を導出し、制御系に適応させていく予定である。

〔成果の発表、論文等〕

- 1) 篠原ひとみ, 中村太郎: 軸方向に強化された空気圧人工筋肉の開発と生体筋肉との比較に関する研究, 平成17年フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp.77-79, 2005.5
- 2) 中村太郎, 篠原ひとみ: 軸方向繊維強化型ゴム人工筋肉の数学モデルの導出とフィードフォワード線形化の試み, 第11回ロボティクスシンポジウム, pp.222-227, 2006.3
- 3) 中村太郎, 島村健史, 永井秀和: 関節に粘弾性を有する人工筋肉マニピュレータの開発, ロボティクスメカトロニクス講演会'06, IP1-B24, 2006.5
- 4) Hitomi Shinohara, Taro Nakamura: Derivation of a mathematical model for artificial muscles, Proceedings of 4th IFAC Symposium on Mechatronic systems, pp.266-270, 2006