

# 形状記憶合金を拮抗配置したロボットアームの開発

苫高専 ○小林 憲弘, 苫高専 吉村 斎, 苫高専 阿部 司

## 要旨

本研究では、生体を持つ柔軟な特性を模倣するロボットアームの製作を目的として、形状記憶合金を拮抗配置したロボットアームの開発を行った。形状記憶合金を用いることで生体により近い構造を実現できた。また、拮抗筋の制御方法として提唱されているタスク制御モジュールをマイコンと電子回路で構成し、組になった拮抗筋の制御を行うシステムを提案する。

### 1. 研究の目的

ロボットアームに生体のような特性を持たせる方法の一つとして、生体の構造を模倣することがあげられる。生体の四肢には必ず対になった筋が拮抗して存在している。最近では生体の構造を模倣して二関節筋を装備したロボットアームが製作され、生体のような運動特性を実現することが確認されている[1]。しかし、これらのロボットアームは空気圧縮人工筋肉やリニアアクチュエータなどを使用しており、構造が複雑であったり、重量が重くなる。また、伊藤らは、生体の運動制御を分散制御するモデルを提案し、生体のような動作が実現できることをシミュレーションで示している[2]。本研究では、生体の筋と類似した特性を持つバイオメタルファイバー(以下 BMF)と呼ばれる形状記憶合金を用いてロボットアームを製作することで、より簡単な構造で生体のような特性をもつロボットアームの実現を目的とする。

### 2. 生体の筋と形状記憶合金の類似性

生体の筋は、筋が長くなるにつれて張力が増加するという可変粘弾性を持つ。筋力  $F$  は(1)式のように表せる。

$$F = \alpha \cdot (f_0 - kx - bx) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  は筋の活性度、 $f_0$  は自然長における最大発揮力、 $x$  は筋長、 $k$ 、 $b$  は定数である。式(1)より、生体の筋は図1のように、筋活性度  $\alpha$  を変化させることで長さと同様に張力を調節できる。これと同様に、BMF も筋活性度に対応する温度によって長さと同様に張力を調節できることが知られている[3]。筋収縮の力学的特性において生体の筋と BMF は類似性がある。

また、生体の筋には筋紡錘という感覚受容器が備わっている。筋紡錘は筋線維に平行に付着し、筋の長さと同様に短縮速度を感知する。BMF は収縮量に応じてその抵抗値が変化し、抵抗値から筋の長さと同様に短縮速度を検出できる(図2)。このように筋の構造自体にも類似性がある。

BMF は生体の構造を模倣するのに適した人工筋肉であるといえる。

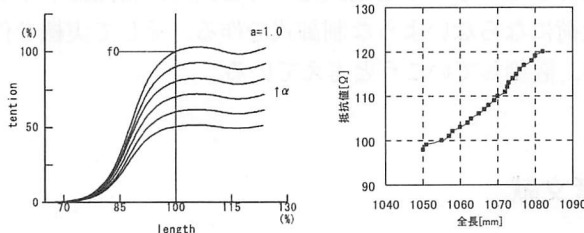


図1 筋の張力-長さ関係 図2 筋長対抵抗値(実測値)

### 3. 上肢筋骨格系の粘弾性モデル

人間の四肢には、筋が拮抗するように配置されている。これをモデル化したものとして、上肢筋骨格系がある。図3に

上肢筋骨格系を示す。

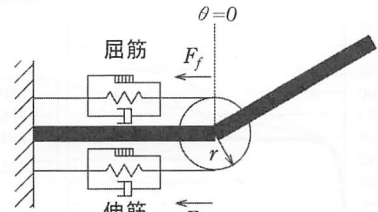


図3 上肢筋骨格系

図3において、関節トルク  $T$  は(1)式の筋力の式を用いて(2)式のように表せる。これは双線形モデルと呼ばれている[2]。ここでは屈筋の筋長  $x_f$  と伸筋の筋長  $x_e$  を(5)、(6)式のように変換し、さらに関節の粘性摩擦を無視している。

$$T = J\ddot{\theta} = r(F_f - F_e) = T_\alpha - G_\alpha(k\theta + b\dot{\theta}) \quad (2)$$

$$T_\alpha = rf_0(\alpha_f - \alpha_e) \quad (3)$$

$$G_\alpha = r^2(\alpha_f + \alpha_e) \quad (4)$$

$$x_f = r\theta \quad (5)$$

$$x_e = -r\theta \quad (6)$$

ここで、 $r$  はプーリーの半径、 $F_f$  は屈筋の筋力、 $F_e$  は伸筋の筋力、 $\alpha_f$  は屈筋の活性度、 $\alpha_e$  は伸筋の活性度、 $J$  は腕の慣性モーメントである。

### 4. BMF の抵抗値制御

2節で述べたように、生体の筋の活性度  $\alpha$  は、BMF の温度  $h$  に対応し、アームの制御には BMF の温度制御が必要となる。BMF の温度  $h$  は抵抗値に関係するため、図4のような制御ブロックを用いて抵抗値の制御実験を行った。

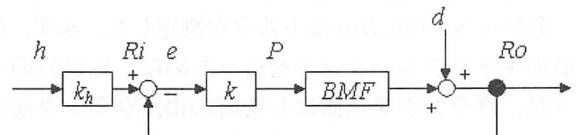


図4 抵抗値制御のブロック図

図4のように、形状記憶合金の温度を制御するためには目標の温度  $h$  を抵抗値  $Ri$  に変換し、抵抗値の比例制御を行う。本研究では、PSoC マイコンと簡単な外部回路を使ってこの制御を実現した。図4において、偏差  $e$  から計算された操作量  $P$  は PWM 波として BMF に加えられる。BMF の抵抗値  $Ro$  は、シャント抵抗を使って求めることができる。BMF の抵抗値は、室温による外乱  $d$  に影響される。また、この制御

ブロックを用いて抵抗値を制御した結果を図2に示す。よって、抵抗値は長さにも関係しており、抵抗値を制御することでその長さの制御も可能である。

## 5. 設計と製作

伊藤らは、筋、関節、運動、及びタスクの制御を、階層的なモジュールの組み合わせによる運動制御構造としてモデル化している[2]。本研究では、このような階層的な制御構造として、PSoCマイコンと簡単な外部回路による制御構造を提案する。この制御構造の概要を図5に示す。



図5 分散モジュール型拮抗筋制御構造の概要

この回路では、マスタ側のマイコンで全体の動作を決定し、それによってスレーブ側のマイコンが1組の拮抗筋を制御する。マイコン間の通信には双方向通信が可能なI2C通信を用いている。3組の筋を同時に制御でき、二関節筋を含む3対6筋の制御も可能である。

筋を使ったロボットアームの実験を行うため、BFMを拮抗配置したロボットアームを製作した。このロボットアームの写真を図6に示す。

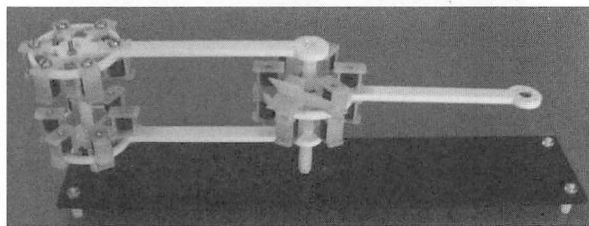


図6 単関節筋ロボットアーム

## 6. 実験結果

製作したロボットアームのパラメータを用い、製作したロボットアームのシミュレーションを行った。但し、筋の粘性係数は適当な値とした。(6)式において、初期値  $\theta_0=0$ 、 $\dot{\theta}_0=0$  として、伸筋と屈筋の温度  $\alpha_f$  と  $\alpha_e$  を入力として与えた場合のアームのステップ応答を図7に示す。温度  $\alpha_f$  と  $\alpha_e$  の組合せは、図7中に示した3通りとした。

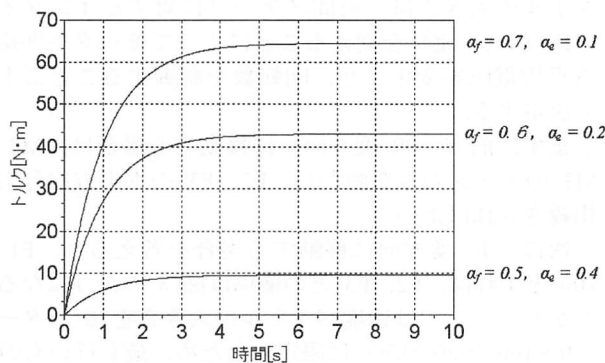


図7  $\alpha_f$ 、 $\alpha_e$ に対する関節角度の変化

図5の制御構造の一部を用い、作製したアームの伸筋にパルス幅20[%]のPWM波を加え、屈筋にパルス幅20~60[%]のPWM波を加えた。その時の関節角度と、屈筋の抵抗値の変化を図8に示す。また、BFMの抵抗値制御を行った結果を図9に示す。

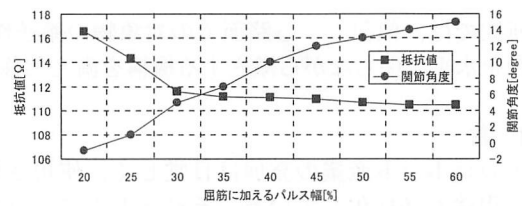


図8 パルス幅の差による関節角度の変化

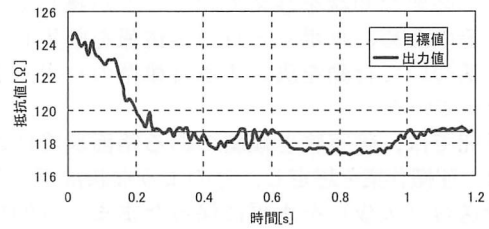


図9 抵抗値制御の結果

図7のように、シミュレーションでは  $\alpha_f$  と  $\alpha_e$  の差によってアームが動き、平衡点で停止する結果になった。平衡点の関節角度は  $\alpha_f$  と  $\alpha_e$  の差が大きいほど大きくなっている。

図8の結果では、シミュレーションのように、アームの角度はパルス幅の差によって変化し、平衡点で停止した。しかし、屈筋に20[%]、伸筋に60[%]のPWM波を加えたとき、シミュレーションでは43°という結果になるのに対し、実測値は15°となった。これは、パルス幅と温度が比例すると仮定して実験を行ったが、実際には温度上昇には遅れがあることが原因として考えられる。

図9より、抵抗値を制御すると、約1[s]で目標値に収束した。しかし、これでは十分な応答性能ではないので、ゲインの調整などを行い、より速く制御する必要がある。今後は、抵抗値制御を使って、温度  $\alpha_f$  と  $\alpha_e$  を入力として加えることが課題となる。

## 7. 結論

本研究では生体のような特性をもつロボットアームの実現のために、BFMの特性を調べるための実験を行った。また、BFMを使って単関節筋ロボットアームを製作し、その制御を行うための制御方法について考えた。そして、ロボットアームのシミュレーションを行って実験結果との比較を行った。

## 謝辞

本論文では、現代的教育ニーズ取り組み支援プログラムにおける株式会社電気工事西川組との共同研究の成果の一部に利用している。

## 参考文献

- [1]熊本水頼, ヒューマノイド工学
- [2]長野智晃, 近藤敏之, 伊藤浩司: 情報伝達に遅れを伴う分散制御系による多リンク系の運動制御, 第18回自立分散システム・シンポジウム講演論文集, pp. 123-128 (2006)
- [3]前野隆司, 形状記憶合金を拮抗配置した剛性可変小型ロボットフィンガの開発, 日本機械学会[No. 04-4] ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (2004)