

# 状態依存型非線形アクチュエータの知的制御 と空気圧サーボシステムへの適用

An Intelligent Control for State-Dependent Nonlinear Actuator  
and Its Application to Pneumatic Servo System

山崎 幹夫 安信 誠二

Mikio Yamazaki Seiji Yasunobu

筑波大学 システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

**Abstract:** Soft actuators such as pneumatic actuators are nonlinear, and their characteristics change depending on their state. Therefore, they are difficult to control using a conventional linear controller. In this paper, an intelligent controller based on an actuator model that is designed using a present state of an actuator is proposed. The actuator model shows a present characteristic of the actuator. The effectiveness of the intelligent controller composed is confirmed by the experiment.

## 1 序論

ソフトアクチュエータは柔らかな機構と動きを兼ね備えたアクチュエータであり、医療や介護の分野などにおいて人の近くで使用するアクチュエータとして注目を集めている。このようなソフトアクチュエータの一つに空気圧を利用して駆動する McKibben Pneumatic Muscle (PM) がある。

PM は柔らかいチューブとスリーブから構成されていて、柔軟で人に優しいアクチュエータである。また、高い質量出力比を持つため、人の動作支援装置などに活用されている [1][2]。しかし、PM の高精度な制御は応答の遅れや制御入力飽和、PM のクーロン摩擦などのさまざまな非線形性のため困難である。

これまで我々の研究室では非線形システムに対する制御法として、予見ファジィ制御 [3] の有効性を検証してきた。予見ファジィ制御とは制御対象のモデルを用いて将来の状態を予見し、予見した将来状態をファジィ集合により評価することで最適な制御入力を得る制御法である。このように、予見ファジィ制御を利用して PM の制御を行うためには PM の入出力特性を表わした順モデルが必要となる。

近年空気圧システムの研究の過程で PM に対するいくつかのモデルが提案されている [4]。これらのモデルによると、PM は長さによって発生力が変化することが分かる。すなわち、入力が一定であってもアクチュエータの長さが異なれば発生力が異なり、入出力特性が変化する。このように状態に依存して入出力特性が変化するアクチュエータを状態依存型非線形アクチュエータと呼ぶ。

本稿では、状態依存型非線形アクチュエータに対する知的制御器を提案する。知的制御器は、現在のアク

チュエータの状態からリアルタイムに順モデルを推定し、そのモデルに基づいて予見ファジィ制御を行う。また、PM を利用した空気圧サーボ装置に知的制御器を適用し、その有効性を確認する。

## 2 状態依存型非線形アクチュエータ に対する知的制御

図 1 に提案する知的制御器の構成を示す。本章では始めに制御対象となる状態依存型非線形アクチュエータについて記述する。その後、知的制御器の各部について記述する。

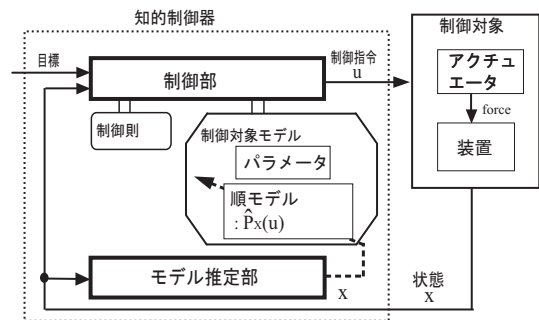


Fig. 1: 知的制御器の構成

### 2.1 状態依存非線形アクチュエータ

状態依存非線形アクチュエータは状態に依存して入出力特性が変化する。この入出力特性を

$$P(x, u) \quad (1)$$

と表す。 $x$  はアクチュエータの状態、 $u$  はアクチュエータの入力である。

## 2.2 モデル推定部

モデル推定部ではアクチュエータの現在状態  $X$  からアクチュエータの入出力特性を表わすモデル  $\hat{P}_X(u)$  を推定する。現在状態  $X$  は制御対象からリアルタイムに計測した値である。現在の状態における順モデル  $\hat{P}_X(u)$  は

$$P(x, u) \xrightarrow{x=X} \hat{P}_X(u)$$

のように決定される。ここで、アクチュエータの順モデルとアクチュエータの状態の関係はあらかじめ調べておく。

## 2.3 制御部

制御部は、制御対象のモデルを使った予見ファジィ制御 [3] により制御指令を決定する。制御対象のモデルはモデル推定部で推定したアクチュエータの現在の順モデル  $\hat{P}_X(u)$  とアクチュエータ以外の機構部のパラメータ  $M$  を用いて以下のようにあらわす。

$$\hat{Q}(M, \hat{P}_X(u)) \quad (2)$$

予見ファジィ制御は人間の制御知識を「(IF) 制御指令  $U$  を  $\hat{U}_k \rightarrow$  制御対象モデルから求めた将来状態  $\hat{x}_k$  と目標状態  $x_t$  の誤差が小さい (THEN) 制御指令  $U$  を  $\hat{U}$  とする」といった if-then ルールで記述し、制御則として利用する。

この制御則に基づいた予見ファジィ制御の推論過程を図 2 に示す。まず、制御指令の候補を仮定し、制御対象モデルを用いてそれぞれの制御指令を入力した場合の将来状態を予見する。次に、求めた将来状態が制御目的をどれだけ満足しているかファジィ集合によって評価する。このとき評価に用いるファジィ集合は、制御目的の数に合わせて複数設定することができるため、複数の目的について評価し、最も "良い" と思われる制御指令を決定することができる。最後に、将来状態の評価値が最大となる制御指令候補を選択し、実際の制御指令として出力する。

## 3 空気圧サーボ装置に対する知的制御

### 3.1 McKibben Pneumatic Muscle のモデリング

McKibben Pneumatic Muscle (PM) の特性を計測した結果から本研究ではこのアクチュエータを空気圧

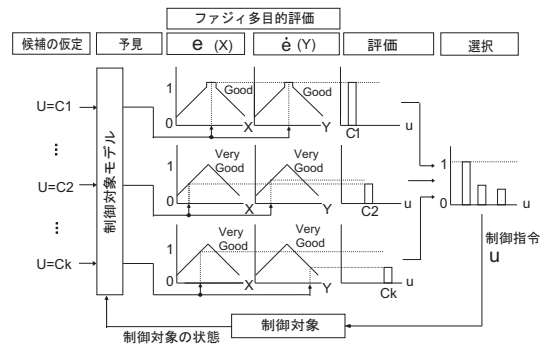


Fig. 2: 予見ファジィ制御部の推論過程

によりバネ定数が変化するバネ要素とする。  $l$  を PM の長さ、  $p$  を空気圧、  $l_0(p)$  を負荷 0 で空気圧  $p$  の時の長さとする、収縮力  $f$  は次式で表される。

$$f = K(p)(l - l_0(p)) + \hat{C} \quad (3)$$

ここで  $K(p)$  は空気圧  $p$  におけるバネ定数、  $\hat{C}$  は状態によって変化するクーロン摩擦力である。

現在の PM の長さを  $L$  とすると PM の順モデルは

$$f = \hat{P}_L(p, \hat{C}) = \hat{C} + K(p)(L - l_0(p)) \quad (4)$$

となる。

### 3.2 知的制御器

PM を利用した空気圧サーボ装置に対して知的制御器を構成した。空気圧サーボ装置と知的制御器の構成を図 3 に示す。サーボ装置は PM を鉛直に吊りし先端に負荷を取り付けた構成とし、負荷を目標の高さまで持ち上げるように PM を制御する。空気圧サーボ装置に対する知的制御では、2 章で提案した知的制御器にクーロン摩擦推定部を追加した制御器を用いる。

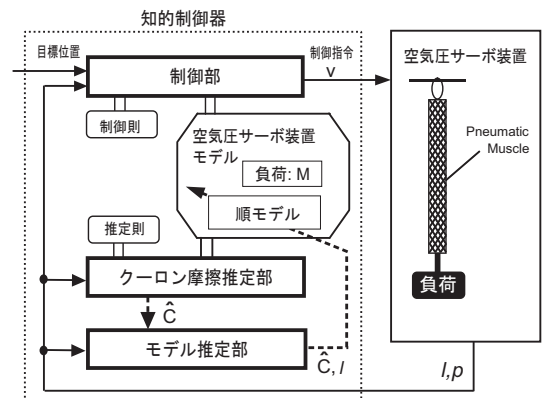


Fig. 3: 空気圧サーボ装置に対する知的制御

制御部に用いた制御則は

- If ( $U$  is  $U_{old} \rightarrow e$  is “Good” and  $\dot{e}$  is “Good”) then  $U$  is  $U_{old}$ .
- If ( $U$  is  $U_{old} + 1.0 \rightarrow e$  is “Very Good” and  $\dot{e}$  is “Very Good”) then  $U$  is  $U_{old} + 1.0$ .
- If ( $U$  is  $e_{now} * kp + \dot{e}_{now} * kd \rightarrow e$  is “Very Good” and  $\dot{e}$  is “Very Good”) then  $U$  is  $e_{now} * kp + \dot{e}_{now} * kd$ .

といったルールである。ここで、 $U_{old}$  は前回の制御指令、 $e$  は推定したアクチュエータ長  $\hat{l}$  と目標長さ  $l_t$  との誤差、 $\dot{e}$  は  $e$  の微分である。

PM には内部の空気圧や長さによって変化し、計測が困難なクーロン摩擦が存在する [4]。クーロン摩擦推定部では PM のクーロン摩擦  $C$  の推定値  $\hat{C}$  を予見ファジィ方式 [3] で推定する。推論には

「(if) クーロン摩擦  $C$  を  $\hat{C}_k \rightarrow$  制御対象モデルから推定した現在の負荷の推定位置  $\hat{y}_k$  と実際の負荷の位置  $y_t$  の誤差が小さい (then) クーロン摩擦  $C$  を  $\hat{C}_k$  とする」といった推定則の集まりと空気圧サーボ装置のモデルを用いる。

## 4 実験

### 4.1 実験装置

実験装置として PM 2 本を並行に配置し、座面を持ち上げる空気圧リフト装置を製作した。空気圧リフト装置の構成を図 4 に示す。空気圧リフト装置は 2 本の PM の収縮力を利用して座面に座った人間を持ち上げ、足腰の弱い高齢者の入浴やベッドへの上り下りの動作支援を想定する。

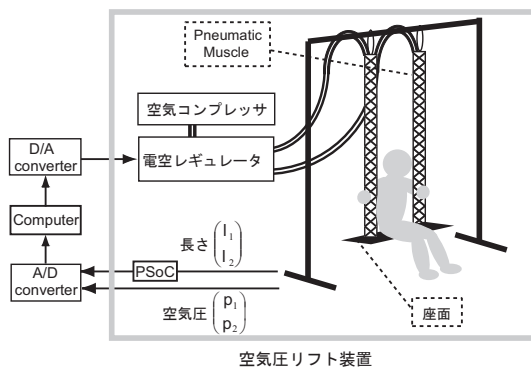


Fig. 4: 空気圧リフト装置の構成

### 4.2 長さ制御実験

長さ制御実験は空気圧リフト装置の片方の PM に注目した実験である。目標の位置へ速くかつオーバーシュートを少なく負荷を持ち上げることを制御目的とする。初期 PM 長は  $1.6[m]$ 、目標長さは  $1.35[m]$ 、負荷は  $20[kg]$  である。実験は (A) 「PD 制御+重力補償」 (B) 「知的制御」の 2 つの制御法を用いた場合で行う。

A. PD 制御+重力補償を用いた場合の結果を図 5 に示す。比例ゲイン ( $kp$ ) と微分ゲイン ( $kd$ ) は  $kp=12$   $kd=16$  と、 $kp=3.5$   $kd=7.0$  とした。また、重力補償として負荷と目標の位置を考慮した入力を追加した。 $kp=12$   $kd=16$  の時は 2.5 秒付近で目標長さに達しているが、オーバーシュートがありまた、目標長さ付近で振動している。 $kp=3.5$   $kd=7.0$  の時は、オーバーシュートや振動なく収束しているが目標到達まで 2.9 秒かかっている。

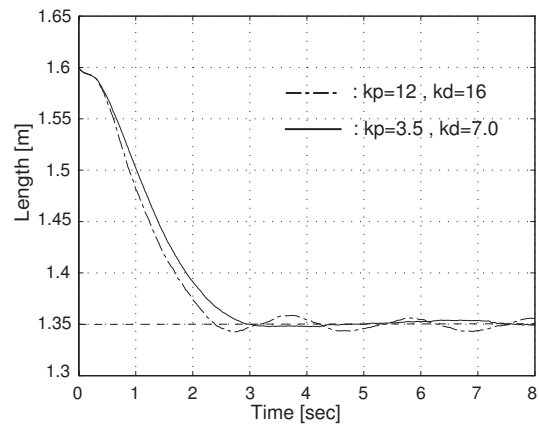


Fig. 5: 長さ制御の結果 “PD 制御+重力補償”

B. 知的制御器を用いた場合の結果を図 6 に示す。オーバーシュートや振動がなく約 2.1 秒で目標長さへ達している。

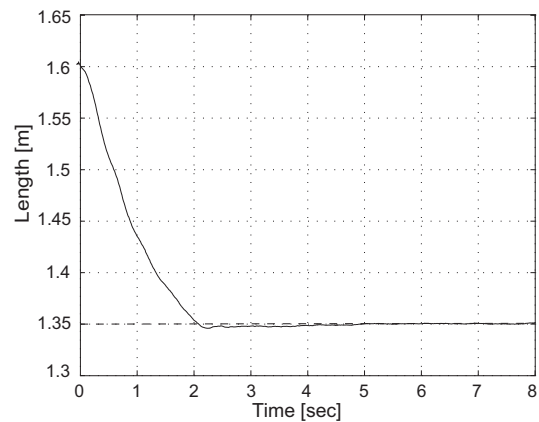


Fig. 6: 長さ制御の結果 “知的制御”

以上の結果から、提案した「知的制御器」を用いる

ことにより「PD制御+重力補償」と比較してより良好な長さ制御ができることを確認した。

### 4.3 同時動作制御実験

同時動作制御実験は空気圧リフト装置の2本のPMを同時に制御する実験である。目標の位置へ速くかつオーバーシュートを少なく負荷を持ち上げることに加えて、左右PMの収縮を合わせる（座面を水平に持ち上げる）ことを制御目的とする。構築した知的制御器は予見ファジィ制御を用いて制御指令を決定するため、このように制御目的が増えた場合に対しても、目的評価のためのファジィ集合を追加することで対処できる。この実験では、ファジィ多目的評価に「他方のアクチュエータの長さとの差」と「差の微分」を追加する。

初期PM長1.6[m]、目標長さを1.35[m]、負荷は右PMに10[kg]、左PMに20[kg]を吊るして行った。実験は(A)「知的制御(左右アクチュエータの差の評価なし)」(B)「知的制御(左右アクチュエータの差の評価あり)」の2つの制御法を用いた場合で行う。

A. 「知的制御(左右アクチュエータの差の評価なし)」を用いて左右それぞれのPMを独立に制御した結果が図7である。オーバーシュートや振動は抑えられているが独立に制御されているため、収縮のバランスが悪い。すなわち座面が傾いた状態で持ち上げられている。

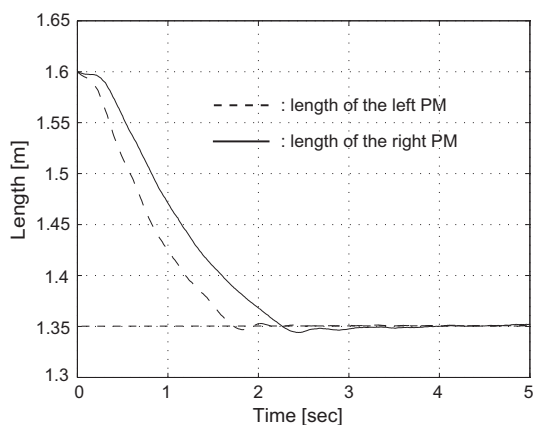


Fig. 7: 同時動作制御の結果“知的制御(左右アクチュエータの差の評価なし)”

B. 「知的制御(左右アクチュエータの差の評価あり)」を用いた場合の結果が図8である。上述したように「他方のアクチュエータの長さとの差」と「差の微分」の評価を追加してある。左右PMは他方の将来状態にあわせて収縮するように制御されている。そのため、左右の収縮のバランスが良くなり、座面も水平に持ち上げられている。以上の結果から、知的制御器をに協調

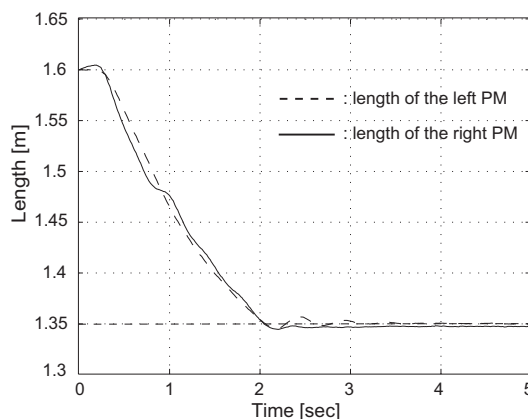


Fig. 8: 同時動作制御の結果“知的制御(左右アクチュエータの差の評価あり)”

目的評価を加えることで二本のPMの協調動作を実現できることを確認した。

## 5 結論

本稿では、状態に依存して特性が変化する非線形アクチュエータに対して知的制御器を構築した。知的制御器はアクチュエータの状態から現在のアクチュエータの順モデルを推定する。そして、この順モデルを利用してアクチュエータの将来状態を予見し、入力候補を評価することで最も適切な制御入力決定する。この知的制御器をPneumatic Muscleを利用した空気圧サーボシステムに適用し実験を行った。実験結果からこの知的制御器を用いることで良好な制御ができることを確認した。これにより、提案した知的制御器が状態依存非線形アクチュエータに対して有効であることを示した。

## 参考文献

- [1] 則次, 高: “湾曲型空気圧ゴム人工筋を用いた腰部パワーアシスト装置の開発”, Journal of the Japan Fluid Power System Society Vol.36, No.6, pp.143-151, (2005).
- [2] 小林, 石田, 松下, 小関: “動けない人を動けるようにするマッスルスーツの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告.HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎 101(267), pp.55-61, (2001).
- [3] 安信誠二, 「ファジィ工学」, 昭晃堂, 1991.
- [4] C.P.Chou, B.Hannaford: “Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.12, pp.90-102, (1996).
- [5] M.yamazaki and S.Yasunobu, “An Intelligent Control for State-Dependent Nonlinear Actuator and Its Application to Pneumatic Servo System”, SICE Annual Conference, CD-ROM proceedings, pp.2194-2199, 2007