

空気圧アクチュエータの特性変化を考慮した知的制御の提案

An Intelligent Control for Pneumatic Actuator with Characteristic Change

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: A pneumatic actuator is light and flexible. So It is expected to support human's movement. However, the control of the pneumatic actuator is difficult, because the characteristic of the actuator changes by the state variation. In this paper, the model that a present characteristics of the actuator are shown is made, and the actuator is controlled based on this model. The model is made from the present state. Moreover, the effectiveness of the intellectual control machine constructed is confirmed by the experiment.

1 はじめに

近年、空気圧アクチュエータは人の動作支援への応用が期待され、筋力補助装置などへの適用が研究されている [1][2]。従来の産業用機器のような、電動モータを使用した機器は重く剛性が高いため、衝突や故障時に人に危害を加える可能性があった。一方、空気圧アクチュエータを使用した機器はアクチュエータ自身が軽く柔らかいため人に対して優しく、安全である。特に McKibben 型といわれる空気圧アクチュエータは、動作部の柔軟さから人と接する環境での使用に適している。

しかし、McKibben 型空気圧アクチュエータは長さ、空気圧などの変化によって出力特性が変わるため、このアクチュエータを利用した装置の良好な制御は困難である。

本論文では状態によって特性が変化するアクチュエータを利用した装置をうまく制御するため、その特性変化を考慮した知的制御器を提案する。特性の変化に対応するため、現在の特性を表すアクチュエータモデルを常に決定し、そのモデルと制御則に基づいた制御を実行する。また、空気圧アクチュエータを用いた装置に知的制御器を適用し動作実験を行うことで、提案した制御器の有効性を確認する。

2 知的制御器

本論文では次式で表されるような出力特性が変化するアクチュエータを用いる。

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

f はアクチュエータの出力、 P はアクチュエータの特性関数を表す。特性関数 P は、アクチュエータの状態 x 、入力 u の関数となっている。さらに、このよう

なアクチュエータを利用した装置を制御対象として用いる。制御対象の構成例を図 1 に示し、次の運動方程式で表す。

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = Mg - f = Mg - P(x, u) \quad (2)$$

ここで M は負荷、 y は負荷の位置である。

上記のように状態 x の変化に伴って入出力特性が変化するアクチュエータに着目し、そのアクチュエータを用いた装置を制御対象とする。このような制御対象をうまく制御するためには、アクチュエータの状態変化による特性変化に常に対応し、現在の特性に適合した制御指令を決定する必要がある。そこで本論文では、現在の入出力特性を表すアクチュエータモデルを常に決定する「アクチュエータモデル決定部」と、制御対象モデルと制御則により制御指令を決定する「制御部」から構成される知的制御器を提案する。図 2 に提案する知的制御器の構成を示す。

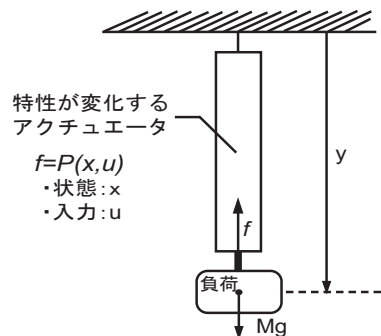


Fig. 1: 制御対象の構成例

2.1 アクチュエータモデル決定部

アクチュエータモデル決定部では、観測したアクチュエータの現在状態 X によって現在のアクチュエータモ

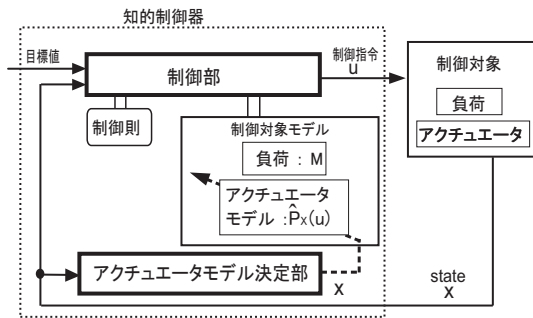


Fig. 2: 知的制御器の構成

デル $\hat{P}_X(u)$ を決定する。

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

現在の特性を表すアクチュエータモデルを常に決定することで、特性変化に対応する。

2.2 制御部

制御部では、アクチュエータモデル決定部で決定した現在のアクチュエータモデル $P_X(u)$ と負荷 M を用いた制御対象モデルを使って、予見ファジィ [3] で制御指令を決定する。「(if) 制御指令 u を \hat{u}_k と仮定したとき、制御対象モデルから求めた将来の負荷の位置の推定値 \hat{y}_k と目標位置 y_t の誤差が小さいならば、(then) 制御指令 u を \hat{u} とする」といった If-then ルールの集まりを制御則として制御を実行する。

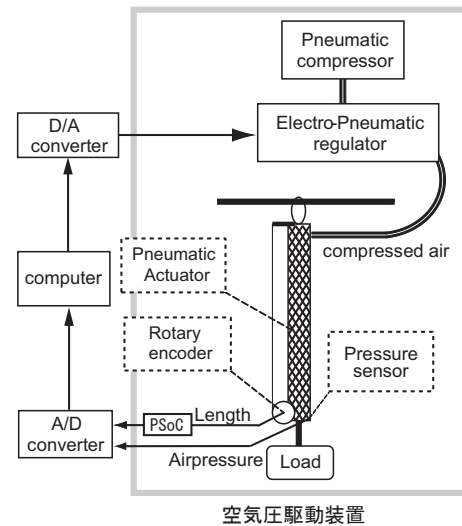
3 空気圧アクチュエータ

本研究では状態の変化に伴って特性が変化するアクチュエータとして、McKibben 型空気圧アクチュエータを用いる。今回用いる McKibben 型空気圧アクチュエータは、株式会社日立メディコ製のエアマッスルと呼ばれるものである。このアクチュエータは、内側のシリコンチューブとナイロン製の繊維で編まれた外側のスリーブの二重構造になっている。内側のチューブは加圧されると膨張し、円周方向に張力を発生し、外側のスリーブがその張力を軸方向の収縮力に変換する。以下、知的制御器を構築する準備のため、空気圧アクチュエータの特性を計測し、モデリングを行う。

3.1 実験装置の構成

McKibben 型アクチュエータの特性計測実験と長さ制御実験のために製作した空気圧駆動装置の構成を図 3 に示す。アクチュエータは無加圧状態の稼動部長 1500mm、稼動部径最大 $\phi 48$ mm である。また、両端に $\phi 4$ mm のチューブが取り付けられていて、そこから圧縮空気を入れる。アクチュエータの長さは、収縮量を回転量に変換する機構を介してロータリエンコーダ

(日本電産ネミコン社製) で計測する。エンコーダの出力パルスは PSoC(Programmable System-On-Chip) [4] でカウントし、アナログ電圧に変換して A/D ボードへ送る。アクチュエータ内部の空気圧は、下端に取り付けたプレッシャーセンサ (SMC 社製) で計測し、同じく A/D ボードへ送る。PC からの制御信号は、D/A ボードでアナログ電圧に変換され 8cH 電圧レギュレータ ((株) 日立メディコ製) を介してアクチュエータを駆動する。



空気圧駆動装置

Fig. 3: McKibben 型空気圧アクチュエータの実験装置の構成

3.2 特性計測とモデリング

アクチュエータの特性を計測するための実験を行った。アクチュエータの下端に重りを吊るし、重りと内部の空気圧を変化させて、アクチュエータの収縮力と長さとの関係を計測した。計測したアクチュエータの特性を図 4 に示す。このアクチュエータは、ヒステリシス特性を持つ [5]。そのため、加圧しながら計測した場合と減圧しながら計測した場合とで長さが異なる。ここではそれぞれの長さの平均をとることにする。実験結果から、このアクチュエータを空気圧によりバネ定数が変化するバネ要素と仮定し、空気圧アクチュエータの特性を次式のように表す。

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

l はアクチュエータの長さ、 p は空気圧、 f は収縮力、 $l_0(p)$ は負荷 0 で空気圧 p の時の長さ、 $K(p)$ は空気 p の時のバネ定数、 C はクーロン摩擦力である。

負荷を M 、負荷の位置を y として空気圧駆動装置の運動方程式を次式のように表す。

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = Mg - C \operatorname{sgn}\left(\frac{dl}{dt}\right) - K(p)(l - l_0(p)) \quad (4)$$

また、本研究で用いた電空レギュレータの特性についても計測した。レギュレータはむだ時間 T 、時定数 τ の一時遅れ要素となる。時定数はアクチュエータの長さによって変化する。伝達関数を次式で表す。

$$G(s) = \frac{e^{-Ts}}{\tau(l)s + 1} \quad (5)$$

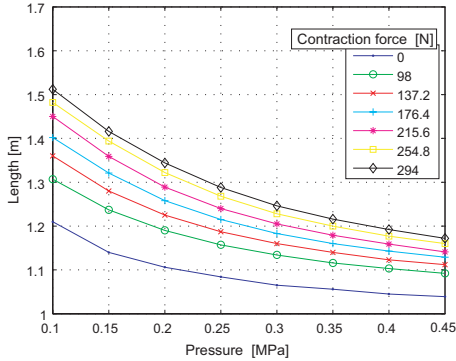


Fig. 4: 長さ、空気圧、収縮力の関係

4 制御システムの構築

2章で提案した制御器を図3の空気圧駆動装置に適用し制御システムを構築する。制御システムの構成を図5に示す。前章でも述べたように、空気圧アクチュエータにはクーロン摩擦が存在する。しかし、このクーロン摩擦はチューブ内の空気圧などにより変化するためその大きさを計測するのは困難である。そこで、クーロン摩擦を推定する「推定部」を制御器に追加した。クーロン摩擦の推定は、推定則と空気圧駆動装置モデルを用いた予見ファジィ制御方式 [3] を拡張して行う。以下にアクチュエータモデル決定部、制御部について記述する。

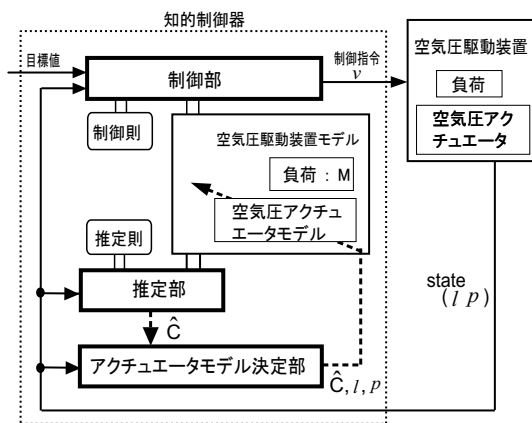


Fig. 5: 駆動装置制御システムの構成

4.1 アクチュエータモデル決定部

推定したクーロン摩擦 \hat{C} と現在の空気圧アクチュエータの状態 (l, p, \dot{p}) から現在の空気圧アクチュエータ

モデルを決定する。モデルは次式のようになる。

$$f = P(l, p, \hat{C}) = \hat{C} + K(p)(l - l_0(p)) \quad (6)$$

4.2 制御部

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 の微分を表す。 e_{now} は現在のアクチュエータ長と目標長さの誤差、 \dot{e}_{now} は e_{now} の微分、 kp, kd はゲイン定数である。仮定する制御指令の候補は、直接出力電圧を指定するものと、 $\dot{e}_{now}, \dot{e}_{now}$ にゲインを乗算して足し合わせた出力電圧 (PD 制御出力) を指定するものがある。このように線形制御も組み合わせることにより、目標長さ近傍での安定した制御を可能としている。制御部の推論過程を図6に示す。

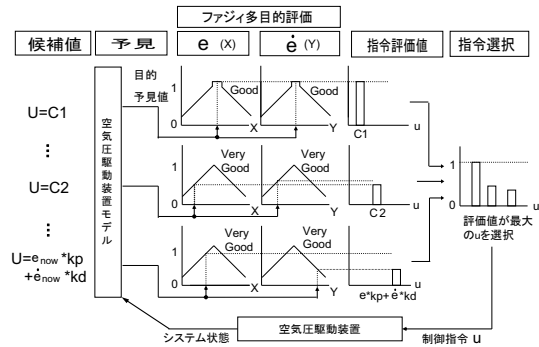


Fig. 6: 予見ファジィ制御部の推論過程

5 実験

駆動装置を用いた長さ制御実験を行う。目標の長さへ速くかつオーバーシュートを少なく収縮させることを制御目的とする。

初期アクチュエータ長 $1.61[m]$ 、目標長さを $1.35[m]$ 、負荷は $20[kg]$ として行った。構築した知的制御器の有効性を確認するため、「一定値指令器」「PD 制御器」「知的制御器」の3つを用いた場合について、それぞれ実験し考察する。

一定値指令器を用いた場合の結果を図7に示す。入力指令は、負荷 (20kg) と目標長さ (1.35m) を考慮して

あらかじめアクチュエータの静特性から求めた 1.72[V] の指令をステップ時間 0 秒で入力した。約 4.8 秒で目標の長ささに到達しオーバーシュートや振動はない。

PD 制御を用いた場合の結果を図 8 に示す。比例ゲイン (kp) と微分ゲイン (kd) は応答を見ながら適当と思われる値に調整し、 $kp=17$ $kd=19$ と、 $kp=8.5$ $kd=10.7$ の時について実験した。 $kp=17$ $kd=19$ の時は 2.6 秒付近で目標長ささに達しているが、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。 $kp=8.5$ $kd=10.7$ の時は、3.8 秒程度でオーバーシュートや振動なくきれいに収束している。PD 制御を用いた場合、目標長さまでの到達時間を短くしようとすると、定常状態で振動してしまい、振動なく収束させた場合目標長さまでの到達時間が長くなった。

知的制御器を用いた場合の結果を図 9 に示す。 $kp=17$ $kd=19$ の時の PD 制御とほぼ同じ 2.5 秒付近で目標長ささに達しており、オーバーシュートが抑えられている。また、その後振動することもなく目標長ささを保っている。現在のアクチュエータモデルの決定と将来状態の予見をリアルタイムに行うことにより、目標とする長さへ速くかつオーバーシュートを少なく収縮させることができた。

以上の結果から、構築した知的制御器を用いることにより「一定値指令器」「PD 制御器」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。

6 おわりに

本論文では、状態によって特性が変化するアクチュエータを利用した装置に対して、その特性変化を考慮した知的制御器を構築した。現在の特性を表すアクチュエータモデルを常に決定し、そのモデルと制御則に基づいて制御を実行することで特性変化に対応した。この知的制御器を空気圧アクチュエータを利用した装置に適用し、アクチュエータ 1 本の長さ制御を行い良好な制御ができることを確認した。また、2 本のアクチュエータを用いた協調動作制御への適用も進めている。これにより、提案した知的制御器が特性が変化するアクチュエータを利用した装置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 .

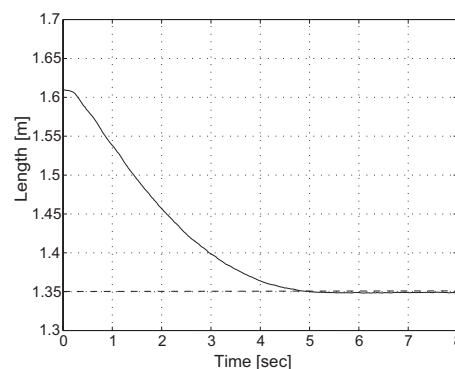


Fig. 7: ステップ入力を用いた場合の制御結果

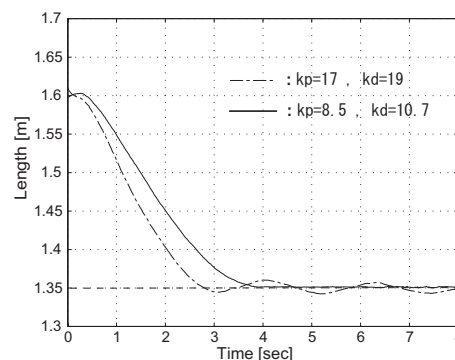


Fig. 8: PD 制御を用いた場合の制御結果

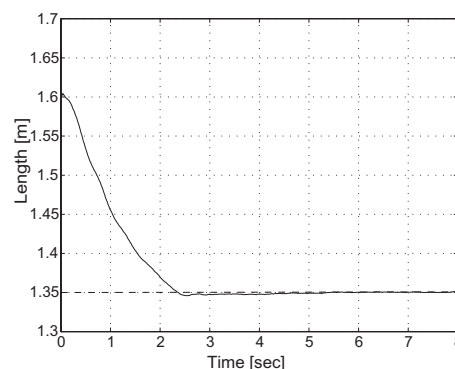


Fig. 9: 知的制御器を用いた場合の制御結果

- [4] 桑野雅彦, 「はじめての PSoC マイコン」, CQ 出版社, 2004.
- [5] 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).

連絡先 ☎ 305-8573

茨城県つくば市天王台 1-1-1

筑波大学大学院 システム情報工学研究科

知能機能システム専攻 知的制御システム研究室

山崎 幹夫

電話: 029-853-6186

E-mail: yamazaki_ics@edu.esys.tsukuba.ac.jp