

安全性を高めた 遠隔操作用空気圧駆動アクチュエータと その適応制御

沖 俊任*

Safety Improved Pneumatic Actuators for Remote Control and its Adaptive Control

Toshitaka Oki*

Abstract: In this paper, a safety improved pneumatic actuators and its adaptive control is proposed. It is difficult that the pneumatic actuator which controlled from remote places, because they have time delays, phase lags, and frequently changing dynamics according to the variety tasks. To overcome these problem, the pneumatic actuator is equipped a mechanical feedback by a spring to decrease phase lag, is controlled by adaptive control method. Finally, an experimental result is shown.

Key words: safety system, pneumatic actuators, adaptive control, time delay, mechanical feedback

1 緒言

空気圧システムはアクチュエータの駆動力が空気圧であるため防爆性に優れ、また、電磁的に環境を汚染しないことから、モータなど電気的アクチュエータを用いることができない環境での動力源として従来から多くの研究がある。そして近年の計算機の発展により上述の環境で動作させるロボットとしても注目されている。しかし、ロボットなどの高度な制御を必要とする場面では空気圧システムにも電磁バルブを用いることが必要であるが、この部分は防爆性や電磁的汚染の問題があり、せつかくの空気圧駆動ロボットの有利な点を生かすことが困難になる。このことは電磁バルブを問題となる環境から距離を置いて配置することで解決できるが、配管内の空気の圧縮性による高次遅れ特性、圧力伝播の時間遅れ、配管による圧力損失など、制御性能を劣化させる原因が生じる。

このようなシステムでは事前に制御対象の特性を十分把握することは困難な場合があるが、適応制御手法で

あれば高精度な制御が期待できる。本稿では、適応制御の一手法であるセルフチューニング制御 (Self-Tuning Control:STC) 法¹⁾を採用する。特に、並列補償器を用いた簡易な極配置制御法が提案されている²⁾。この手法は、制御対象に並列補償器を付加することで制御し易い拡大系を構成し、その拡大系に極配置制御系を構成するものであり、特にむだ時間系に対して有効な手法である。同様の手法は他にもあるが、設計の簡易さから本手法を採用する。しかしこの手法は制御対象が漸近安定でなくてはならず、上述のようなような空気圧システムにはそのまでは適用ができない。そこでまず、空気圧システムに「バネ」を取り付けることで漸近安定なシステムとする。これは同時に、空気圧システムの安全性を向上させることでもある。たとえば、何らかの理由でシステムを緊急停止するために圧縮空気を廃棄することを考えると、従来のシステムではその場所で停止するのみであるが、「バネ」を取り付けることで原点復帰もなされる。

以下ではまず制御対象のモデルを示す。次にこれにバネを付加したときのモデルを示す。次に制御系の設

(2005年11月24日受理)

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

計法を提案する。最後に、提案手法の効果を確認するために行った実機実験について説明する。

2 制御対象の記述

2.1 制御系の構造

制御系の概略図を Fig.1 に示す。制御対象の出力（制御量）は両ロッド複動型空気圧シリンダの片側に取り付けられた負荷の位置とする。この負荷が移動するとマグネスケールからパルスが発生し、これをカウントすることで現在位置が読み取れる。また、シリンダには電空比例圧力制御弁で圧力調整された圧縮空気（ P_1 および P_2 ）がつかわり、これらの差圧でシリンダロッドと負荷が左右に移動する。この電空比例圧力制御弁で調整される圧力は、計算機に接続された D/A 変換器から出離される電圧に比例し、これを制御対象の入力（操作量）とする。図では電空比例圧力制御弁とシリンダを近くに記しているが、この間の管（図中では太線部）が長い場合について考察する。ただし、本研究では負荷は一定としてシリンダの端部付近は使用せず、そのため、入出力が線形系として記述できる範囲で考察する。

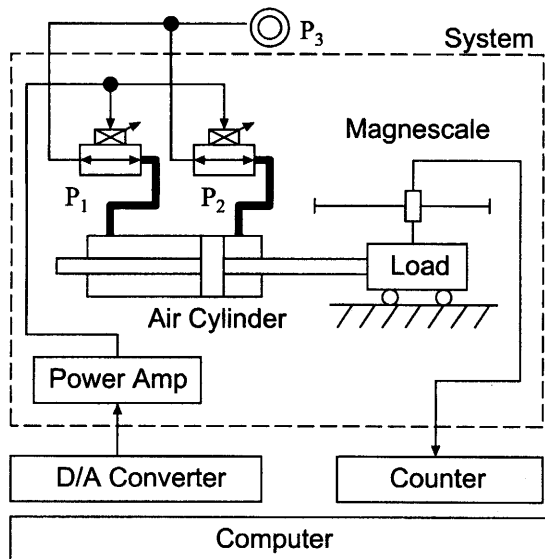


Fig.1 Schematic diagram of pneumatic servo system

2.2 制御対象の特性の記述

空気圧サーボ系の特性は、シリンダの動特性、バルブの動特性により、主な特性が決まり、そのため積分+2次遅れ+むだ時間系として記述される。

まずシリンダの動特性は次式で表される。

$$Ms^2Y(s) + CsY(s) = F(s) \quad (1)$$

ここで $Y(s)$ は負荷の位置をラプラス変換したもの、 $F(s)$ はシリンダ内の差圧をラプラス変換したものである。また、 M と C は負荷の質量と粘性摩擦を表している。

バルブの動特性は次式で表される。

$$T_v s F(s) + F(s) = K_v e^{-L_v} U(s) \quad (2)$$

ここで $U(s)$ はバルブへの指示電圧をラプラス変換したものである。また、 T_v 、 L_v 、 K_v はそれぞれ、バルブの時定数、むだ時間、ゲインを表している。すなわちシステムのむだ時間には、バルブのむだ時間と配管を圧縮空気が伝わることによるむだ時間が含まれることになる。

(1) 式と (2) 式より、制御対象は次式で記述できるとする。

$$Y(s) = \frac{e^{-L_v} K_v}{s(Ms + C)(T_v s + 1)} U(s) \quad (3)$$

この空気圧システムの制御においては、積分要素やむだ時間要素が位相を遅らせるため、安定した制御を行うことが困難になると考えられる。

2.3 バネを追加した制御対象の特性

制御対象の位相特性を改善するには制御対象に制御器に位相進み特性を持たせることが考えられる。また、他の方法として、Fig.2 に示すように空気圧シリンダにバネを取り付けることでも同様の特性を得ることができる。これらのうち後者は、システムの安全性を改善することにも効果がある。すなわち、システムに不具合が生じると空気圧シリンダ内の圧縮空気を抜いてシステムを停止させることがあるが、前者では負荷は異常時の位置で停止してしまうが、後者の方法では負荷は元の位置に戻ることができる。



Fig.2 Spring added air cylinder

このようにバネを追加すると、(1) 式はバネ（バネ定数 K ）の影響を受けて次式となる。

$$Ms^2Y(s) + CsY(s) + K\{Y(s) - Y_0\} = F(s) \quad (4)$$

ここで、 Y_0 はバネの自然長である。よって、(3) 式は次式のように表される。

$$Y(s) = \frac{e^{-L_v s} K_v}{(Ms^2 + Cs + K)(T_v s + 1)} U(s) + D \quad (5)$$

ただし、 D はバネの自然長に関する定数を表している。このとき、(5) 式には積分項が無く、漸近安定なシステムである。

2.4 離散時間化

本研究では計算機を使った離散時間制御を考察する。 z^{-1} を $y(t) = y(t-1)$ を意味する時間遅れ演算子とすると、サンプリング周期 T_s で離散時間化後の (5) 式は次式となる。

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + d \quad (6)$$

ただし、定数項については定常状態のみを考慮した。多項式 $A(z^{-1})$ と $B(z^{-1})$ はそれぞれ次式であり、次数は (5) 式より決定される。

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

また、 k はむだ時間であり、 $(L_v + L_p)/T_s$ を超えない正の整数となる。しかし、実際のシステムで k の正確な値を事前に知ることは困難であり、そのときは $B(z^{-1})$ にむだ時間が含まれると考え、 k を小さめとして十分大きな m を設定する。このため、(7) 式において、 b_i ($i = 0 \sim m$) のうち、 i の値がある値より小さいものについて $b_i \approx 0$ となる場合がある。この項は、むだ時間として振舞う。 d は (5) 式の D に対応する定数を表している。

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + d \quad (8)$$

3 前向き補償器を用いたセルフチューニング極配置制御則

ここでは説明を簡単にするため、まず、(8) 式の各パラメータは既知として考察する。その後、制御系を Explicit 型 STC に拡張する。

3.1 拡大形的设计

まず制御対象に前向き補償器を挿入し、これを拡大系とする。この拡大系を Fig.3 に示す。

ここで、拡大系に零点があると制御系設計が複雑となることから、零点を除去する。具体的には、 $B(z^{-1})$ の代わりに $B(1)$ とできるように前向き補償器 $H(z^{-1})$ を設計する。

$$H(s) = z^{-1}B(1) - z^{-k}B(z^{-1}) \quad (9)$$

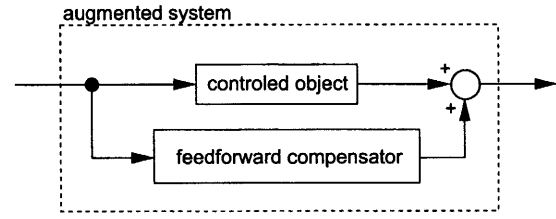


Fig.3 Augmented Controlled object by using a parallel feedforward compensator

さらに、拡大系の出力を $y_a(t)$ し、 $y_a(t)$ を次式とする。

$$y_a(t) = y(t) + \frac{H(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(t) \quad (10)$$

よって、拡大系は次式と表される。

$$A(z^{-1})y_a(t) = z^{-1}B(1)u(t) + d \quad (11)$$

この拡大系を Fig.4 に示す。図中では、 (z^{-1}) の表記は省略している。

この拡大系の制御性能は次式で評価することとする。ここで、 $r(t)$ は制御系の目標値を表している。

$$J = \sum \{P(z^{-1})y_a(t+1) - P(1)r(t)\} \quad (12)$$

ここで、

$$P(z^{-1})y_a(t+1) - P(1)r(t) = 0 \quad (13)$$

のとき J が最小化されることから、 J が最小化されると、次式が成立することとなる。

$$y_a(t) = \frac{z^{-1}P(1)}{P(z^{-1})}r(t) \quad (14)$$

すなわち、 $P(z^{-1})$ を特性方程式とする極配置制御系が構成できる。

3.2 拡大系に対する制御系的设计

まず、(11) 式の両辺に差分演算子 $\Delta = 1 - z^{-1}$ を乗じると次式を得る。

$$\Delta A(z^{-1})y_a(t) = z^{-1}B(1)\Delta u(t) \quad (15)$$

このうち右辺の Δ は制御則内の積分項として現れる。この項の働きにより、(8) 式の定数項 d の影響が除去され、ステップ関数で与えられる目標値変化に対して定常状態で制御誤差を 0 にすることができる。

次に、次式で表される Diophantine 方程式

$$P(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1}) + z^{-1}F(z^{-1}) \quad (16)$$

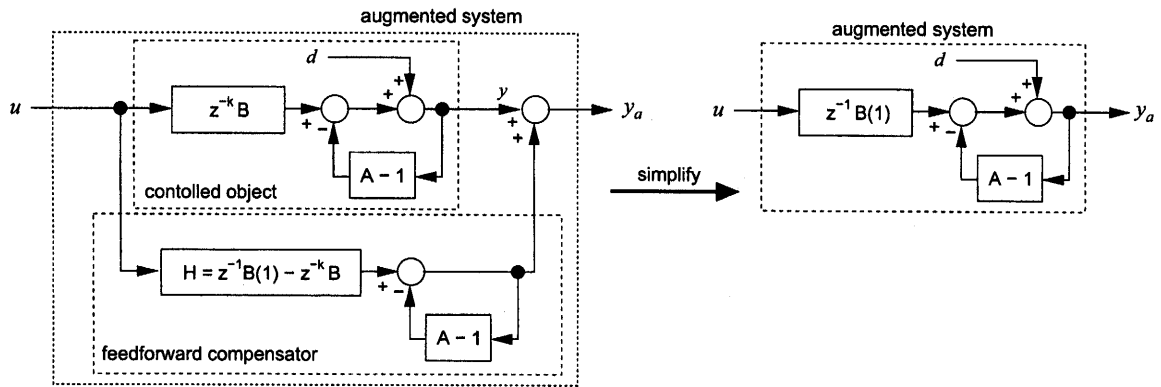


Fig.4 Compensation of zero point

を満たす $E(z^{-1})$ と $F(z^{-1})$ を解き、(11) 式の両辺に $E(z^{-1})$ を乗じると次式を得る。

$$\Delta A(z^{-1})y_a(t) = z^{-1}B(1)\Delta u(t) \quad (17)$$

これを整理すると次式となる。

$$P(z^{-1})y_a(t+k) = B(1)\Delta u(t) + F(z^{-1})y(t) \quad (18)$$

ここで、(12) 式を最小化するために、

$$P(z^{-1})y_a(t+1) - P(1)r(t) = 0 \quad (19)$$

を満たすように $u(t)$ を導出すると、次式で表される制御則となる。

$$u(t) = u(t-1) + \frac{1}{B(1)} \{P(1)r(t) - F(z^{-1})y_a(t)\} \quad (20)$$

3.3 目標値 $r(t)$ から制御量 $y(t)$ までの閉ループ伝達関数

(8) 式、(10) 式および (20) 式より、 $r(t)$ から $y(t)$ までの閉ループ伝達関数を求めると次式となる。

$$y(t) = \frac{z^{-k}P(1)B(z^{-1})}{P(z^{-1})B(1)}r(t) \quad (21)$$

これより、拡大系のみならず制御量に対しても極配置制御系が実現できていることがわかる。

3.4 適応制御系への拡張

前節で既知としたパラメータ a_i 、 b_i および d は実際には未知である。そこで、逐次型最小 2 乗法を用いて a_i 、 b_i および d を逐次推定し、このうち、 a_i 、 b_i 、 d に対応するパラメータを真の値として (20) 式のパラメータを毎時刻修正することで適応制御系に拡張できる。

この制御系の安定性に関する証明はほとんど²⁾と同じなので省略する。

4 制御実験

Fig.1 に対し、3 節で提案した制御系を構築したときの制御実験結果を示す。

4.1 設計

制御条件は次とした。

- 制御周期：20[msec]
- 負荷の位置の初期位置：140[mm] 程度
- 最小 2 乗法の誤差共分散行列の初期値：100I
- パラメータ a_i 、 b_i 、 d の推定値の初期値： b_0 に關して 0.1。その他は 0。
- $P(z^{-1}) = 1 - 1.871z^{-1} + 0.874z^{-2}$
- むだ時間に関する情報も無いとする： $k = 1$ 、 $m = 10$

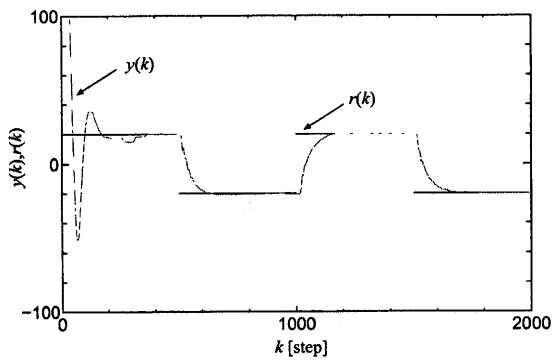
4.2 制御結果

以下に制御結果を示す。まず、Fig.5(a) に目標値 $r(t)$ に対する応答 $y(t)$ を示す。このときの操作量の推移を Fig.5(b) に示す。

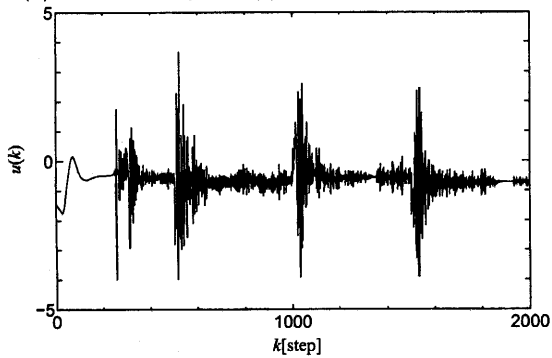
これより、制御開始時には使用しているパラメータの調整が十分でないため大きなオーバーシュートが出ているが、速やかに目標値に収束している状況が分かる。また、500[step] からの目標値変更では大幅に改善され、1000[step] からの目標値変更ではオーバーシュートほとんど無く良好に追従していることが確認できる。図より信号が振動しているが、安定に推移していることが確認できる。

Fig.6 にパラメータの推定結果を示す。

図より、最初に制御量が目標値に収束する 400[step] あたりまでに、 b_i と d の推定値ほぼ最終値に近い値に



(a) reference signal $r(t)$ and output signal $y(t)$



(b) control input signal

Fig.5 Control result

なっている。しかしまだ調整が十分でないため、Fig.5に見るように500[step]からの応答はオーバーシュートしている。これが500[step]以後は、 $u(t)$ と $y(t)$ の大きな信号の変化を利用してパラメータが最終値に向かい変化している。これ以後、Fig.5より制御応答は良好である。このことから、推定されたパラメータは真の値の近くに収束したと考えられる。

4.3 比較実験

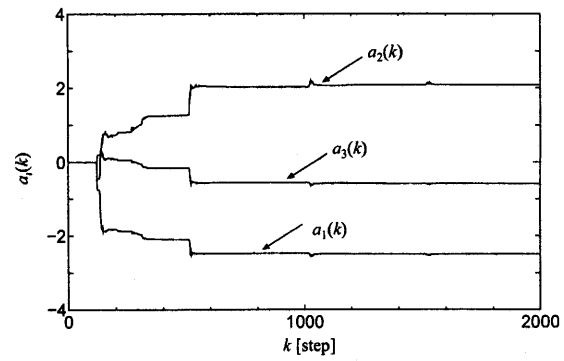
ここでは、提案手法との比較のために行った実験結果を示す。比較対象は、一般的なセルフチューニング極配置制御法の一つであるWellsteadらによる方法³⁾とした。Fig.7にこの手法による制御結果を示す。

Fig.5とFig.7を比較すると、500[step]以降においてWellsteadらの手法では制御量が目標値付近で振動が残っているが、提案手法では振動していない。このことから、提案手法のほうが安定度が高いと考えられる。

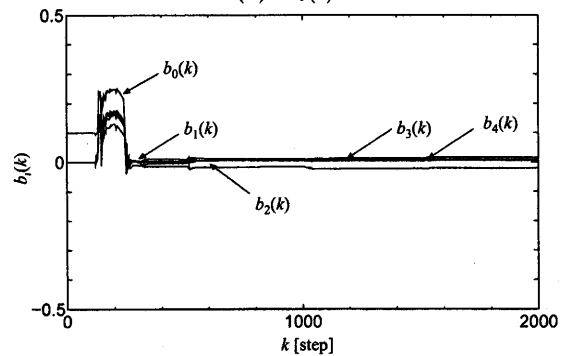
また、Wellsteadらの方法では、(16)式に対して、

$$P(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1})R(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})S(z^{-1}) \quad (22)$$

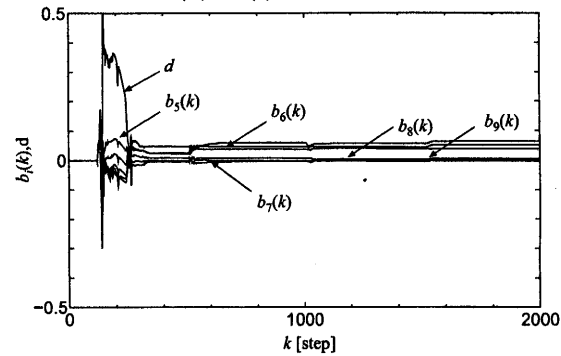
を満たす多項式 $R(z^{-1})$ と $S(z^{-1})$ を求める必要がある。これに対し、提案手法のほうが計算が簡単で計算量も少ないという利点もある。



(a) $a_i(t)$



(b) $b_i(t), i = 0 \sim 4$



(c) $b_i(t), i = 5 \sim 9$ and d

Fig.6 Parameter identification result

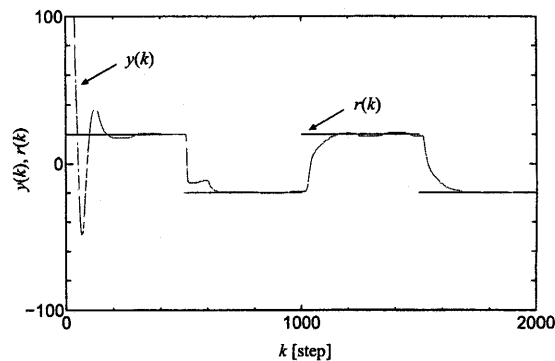


Fig.7 Control result by using Wellstead's method

以上より、提案手法で良好な制御を行うことが確認できた。

5 結言

本論文では、遠隔操作を前提とした空気圧駆動アクチュエータの構成法とその適応制御法を提案した。制御対象はまずバネによる物理的なフィードバックにより制御対象から積分要素を除去して安定性を確保した。次に、制御対象のモデルの不確かさに対して適応制御系を構成した。

本設計法の有効性は実験で確認した。さらに、設計における計算量を Wellstead らの手法と比較し、本手法の有利な点を明らかにした。

謝辞 このとき、実験装置を貸して下さいました山口大学電気電子工学科田中幹也教授に感謝いたします。

また、実験を行って下さいました早崎雄二君に感謝いたします⁴⁾。

参考文献

- [1] 大松, 山本 編: セルフチューニングコントロール, 計測自動制御学会学術図書, コロナ社 (1996)
- [2] 沖, 山本, 兼田: 前向き補償器を用いたセルフチューニング極配置制御系の一設計, システム制御情報学会論文誌, Vol.10, No.7, pp.351-360, (1997)
- [3] P.E.Wellstead and S.P.Sanoff: Extended self-tuning algorithm, Int.J.Control, Vol.34,No.3, pp.433-455 (1981)
- [4] 早崎: MRI 対応型空気圧アクチュエータに関する研究, 山口大学電気電子工学科卒業研究 (2002)