研究論文

一般産業用空圧シリンダの位置決め制御*

京和泉 宏 三**, 藤田 行 茂**, 岩井 善 太***, 水本 郁 朗***

Positioning Control of Pneumatic Cylinder used in General Industries

Kozo KYOIZUMI, Yukishige FUJITA, Zenta IWAI, Ikuro MIZUMOTO

Calling it obsolete technology would be far too emphatic, but pneumatically operated cylindrical linear actuators draw the keen attention of engineers who are involved in the design of micro/nano positioning, where any electric or magnetic interferences are to be prohibited to secure a micro-machining in production of the latest μ -chips. This paper aims to describe our preliminary challenge to realize a precise pneumatic positioning system, which includes a very conventional pneumatic cylinder having inherent and tough stick-slips, a servo-valve with undesirable dead-zone and the Simple Adaptive Control Algorithm that accommodates non-linear functions to minimize the influence of stick-slip without risk of system instability. The stick-slip deteriorates both of transient and steady-state response, therefore the effectiveness of our proposal should have been confirmed by experiment in this paper.

Key words : Position Control, Pneumatics, Servo Valve, Stick-Slip, Adaptive Control, Nonlinear Function

1. 緒 言

電気・電子システムの、過去20年の飛躍的發展のために、本来フルードパワーシステムが得意にするメカトロニクス分野をACサーボモータやリニアモータが侵食しているように見える。また、この時期は現代制御理論の著しい進展もみて、現代制御との組合せによるシステムの電動化の声が喧しい。周知のごとくIT産業はLSIの更なる微細加工を要求し、電動アクチュエータの極限における動作の脈動あるいは加工自体に影響する電磁障害などの欠点を取除かねばならないと言われている。このような時代背景にあって榊ら¹⁻³⁾が高精度な空圧シリンダシステムを果敢に研究し成果を挙げていることは注目に値する。本研究を開始するに当たって、著者は過去10年の本誌に掲載された「空圧シリンダの位置決め制御」に関する論文を調査した⁴⁻²³⁾。これらの多くの研究結果を整理すると、従前の技術で製作されたシリンダでは $\pm 0.5\text{mm}$ 、低摩擦型シリンダを採用した場合で $0.1\sim 0.01\text{mm}$ の停止精度を得ており、制御則は適応制御、最適制御、ゲインスケジュール、ニューラルネット、LQI、I-PD、 H_∞ 制御とファジー制御など多様である。また、文献^{4,5)}は、10年前の論文とは言え、空圧シリンダに圧電装置や電気粘性流体を組合わせて $\pm 2\mu$

mの位置決め精度を得るなど、先見的研究であった。文献⁶⁾は空圧シリンダの制御に非線形制御が必要であることを強調している。

元来、空圧システムは、それを構成する機器の小型であること、適度な力を瞬時に提供しうること、動作媒体である圧縮空気が容易に得られることなどによって、さらには本質的安全性によって、自動生産機械に多用されるが、既知の特質から、位置決め制御ではEND to ENDの動作が専らであって、任意の中間位置決めへの応用は、先述のごとくこの分野の研究が多いとは言え、希少である。この意味で、先に述べた榊らの研究¹⁾は先駆的で、その進展を著者は期待する。さて、本論文では、比較的大きな固有のスティックスリップを有する空圧シリンダと市場で簡単に入手しうるコストパフォーマンスの優れた空圧サーボ弁¹⁵⁾を用い、プラントの詳細な数学的モデルを必須としない単純適応制御則²⁴⁾に非線形操作入力を加え、特別なハードウェアへの改良・工夫を用いず、どの程度の位置決め精度が得られるのか、実験的方法で検証することを目的とした。

2. 制御対象

Fig. 1に制御系のシステム図を示す。本論文では、良く知られた4方弁で空圧シリンダの位置決めをする方法を採用し、市販の空圧サーボ弁（定格入力 u ：0～10V、定格出力流量：0.35Nm³/min、フェスト社製MPYE-5-1/8F-010B、-3db at 100Hz）に見られるゼロ点近辺の不感帯の影響を少なくする3方弁圧力制御方式を採用しなかった。例えば前出の榊ら^{2,3)}は空圧シリンダのロッド側に一定供給圧を加え、ピストン側の圧力を3方弁方式のサー

*平成16年4月28日 原稿受付

**サントレスト(株)技術部

(所在地 〒554-8691 大阪市此花区常吉1丁目1の60)

***熊本大学工学部知能生産システム工学科

(所在地 〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

Fig. 1 Pneumatic System

ボ弁で制御する方式を採用している。

この方式では、基本的に流量ではなくピストン側の圧力を制御すれば良く、サーボ弁のスプールのオーバーラップを余り気にする必要はない。また、目的を達成するための動作圧力を最適に選べる利点もある。しかし、本研究では、追従誤差に対し適応的に変化する非線形要素の効果を明示したいがため、実験で用いる機器や回路構成に特段の配慮をしなかった。 r は参照信号でファンクションジェネレータから与え、コントローラ(32bitDSP: サンプル時間 $100\mu\text{sec}$)の中でA/D変換し、 y は空圧シリンダの位置信号で、分解能 $6.25\mu\text{m}$ のインクリメンタル・リニアエーノコーダにより検出してフィードバック信号(300mm が 10V に相当)にした。

後述するが、パルス出力型のフィードバックセンサを採用したので、時間的差分を計算することによって容易に状態変数である速度と加速度を得ることが出来るシステムになっている。供給圧力 P_s は 0.6MPa で、空圧シリンダはストローク: 200mm 、ピストン側受圧面積: 8.04cm^2 、ロッド側受圧面積: 6.13cm^2 である。写真1に見るようにピストンの先端にリニアテーブルを取付け最大 10kg の質量を搭載出来るようにした。

また、実験で用いた空圧シリンダのスティックスリップ特性をFig. 2に示すが、典型的なStribeck曲線^{5,25,26)}を呈している。本研究における制御対象は、サーボ弁の入力電圧 u とリニアテーブルの変位 y の関係で示されるダイナミカルシステムであるが、前出の参考文献⁴⁻²³⁾の大部分では線形の伝達関数で近似し、次数の最も多いものは積分・2次遅れ・無駄時間要素のカスケード結合であった。しかし、則次⁶⁾の指摘するように、強い非線形性を持つ空気圧駆動系において制御対象の数学モデルを線形近似で求めることは殆ど無意味である。そこで、著者はFig. 1のコントローラを単純な比例制御で構成し、直結フィードバック系で制御対象の特質を見ることにした。Fig. 3は、比例ゲイン2, 2.38と3の場合のステップ応答を示し、無駄時間が約 20msec 、シリンダの移動方向で動特性が大きく異なること、もし線形近似すれば積分を有する制御対象であるにも拘らず、シリンダの摩擦の影響によって、定常偏差を残していることなど、数学的解析の容易でないことを明らかに示している。言を待たぬが、比例ゲインを3よりも大

きくすれば、システムの発振を招来する。Fig. 4は、参照信号 r を三角波状にした時の応答を示す。いずれの比例ゲインでも、シリンダ固有のスティックスリップの影響を除去することが出来ない。(ゲインが大きくなると、当然の事ながら、位置信号 y の平均的追従特性は良くなるが、階段状のコギングを除去し得ない。付言するが、三角波状 r の場合、ゲイン7でもシステムは不安定に成らなかった。)

Photo. 1 Test Apparatus

Fig. 2 Stick-Slip in Cylinder

Fig. 3 Step Response

3. 制御システムの構成

前節で述べたように、本論文では制御対象の数学的モデルを求めず、構築されたシステムに要求されるコントローラのパラメータを実験装置の反応を見ながら、当然、制御対象が積分・遅れ要素・無駄時間とFig. 2で示されるスティックスリップを有するものと先験的に知っているとした前提で、試行錯誤により決定した。単純適応制御²⁴⁾の詳細

Fig. 4 Trigon Tracking

Fig. 5 Local Feedback

細を本論文で述べないが、この制御則は制御対象の概略構造さえ分かれば、試行錯誤に基づく現場でのパラメータ設定が可能である特徴を持つ。この工学的優位性を横田らは電気油圧シリアルマニピュレータで確認しているので文献²⁷⁾を参照されたい。既に明らかな様に制御対象 G_p はスティックスリップによるジャークモーションを呈するので、Fig. 5に示すごとくシリンダの位置信号 y から速度と加速度を得て、局部フィードバックを施し、本来の制御対象の特性を改善した $\hat{G}_p$ を新たな制御対象とした。 G_f は時定数3 msec, ゲイン1のローパスフィルターで、 k_v , k_a はそれぞれ0.01, 0.5とした。

3.1 制御アルゴリズム 1

制御アルゴリズム 1 に基づくシステムのブロック図をFig. 6に示す。本実験ではモデルの伝達関数 G_m を時定数50 msecの1次遅れ要素にしたので、通常の単純適応制御に見られるモデルの状態変数のフィードフォワード²⁴⁾は図示しない。図の中のPFCは並列フィードフォワード補償器^{24, 27)}で、(1)式で示す2次の伝達関数にした。

$$\text{PFC} = \frac{0.01T_s + 0.11}{(T_s + 1)^2}, \quad T = 0.02\text{sec} \quad (1)$$

(1)式の求め方についても文献²⁴⁾に詳述されているからそれを参照されたい。時定数 T は、制御対象から積分要素を取

Fig. 6 Control Algorithm 1

除いた伝達関数の折点周波数を求め、その逆数にすれば良いが、厳密に一致させる必要はなく、既に述べたように試行錯誤で決めることができる。(単純適応制御の眼目は、拡張系プラントの概強正実性を求めるところにあって、あくまでも“概ね”であり、それが求めればコントローラのゲインを大きくするとシステムが強正実になる。) ²⁴⁾ また、 K_e はモデルの出力 y_m と拡張系プラント (Augmented Plant) の出力 y_a の誤差 e_y で決まる適応ゲインで(2)式に定義される。

$$K_e = -K_{fx} - \Gamma_{pe} e_y^2(t) \quad (2)$$

$$K_{fx} = 30, \quad \Gamma_{pe} = 10$$

(2)式右辺第一項のゲインは、 σ 修正項を含む積分的動作をする適応ゲインであるべきだが、誤差 e_y がゼロになる定常時に小さくなると制御対象に作用する外乱に対してシステムが敏感になる。これは、実用的観点から望ましくなく、固定値の $K_{fx} = 30$ にした。

図中の u_r は、スティックスリップ現象を最小限にするために設けた非線形操作入力で、拡張系プラントの上流から与えられていることに留意してほしい。PFCを制御対象に施して、拡張系プラントに概強正実性^{24, 27)}を与えたのであるから、この特性を乱さないために拡張系の外部から u_r を与えた。 u_r は(3)~(6)式に定義される。

$$u_r(t) = \begin{cases} -\beta(t) \text{sgn}(e_y(t)) & |\beta(t)| > \varepsilon \\ -\beta(t)^2 e_y(t) & |\beta(t)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta(t) = \beta_i(t) + \beta_r(t) \quad (4)$$

$$\dot{\beta}_i(t) = \Gamma_i |e_y(t)| - \sigma \beta_i(t) \quad (5)$$

$$\beta_r(t) = \Gamma_r |e_y(t)| \quad (6)$$

$$\Gamma_i = 10, \quad \Gamma_r = 0.5, \quad \sigma = 0.01, \quad \varepsilon = 0.0001$$

上記の(3)~(6)式からも明らかなように、制御アルゴリズム 1 は比較的穏健な非線形操作である。

3.2 制御アルゴリズム 2

制御アルゴリズム 2 に基づくシステムのブロック図をFig. 7に示す。この構成の特徴は、非線形操作入力 u_r を拡張系の中に取り込み、本来の制御対象である G_p に u_r を直接印加しうるようにした点にある。また縷述した如く、制御対象に積分要素が存在するように見えるが、それは数学的純粹な積分ではないこと、拡張系の出力フィードバックは本来の出力フィードバックではないことによって定常偏差が残るため²⁷⁾、図に示すように「比例+積分」要素 (PI) を追加した。このPI要素は参照信号 r と位置信号 y の誤差を入力とするので、システムが安定であれば定常偏差はゼロになる。

このアルゴリズム 2 における u_r は(7), (8)式に定義される。

$$u_r(t) = \begin{cases} -\alpha(t) \text{sgn}(e_y(t)) & |u_p| > DB \\ 0 & |u_p| \leq DB \end{cases} \quad (7)$$

$$\dot{\alpha}(t) = \Gamma_{12} |e_y(t)| - \sigma \alpha(t) \quad (8)$$

$$DB = 0.03, \quad \Gamma_{12} = 20, \quad \sigma = 0.01$$

u_r は上式に見るように、Fig. 7に示した u_p のあらかじめ定められたデッドバンド DB に対する大小で動作するリ

Fig. 7 Control Algorithm 2

レー出力を持ち、その出力の大きさが誤差 e_y に応じて変化する。(8式のように σ 修正項を持つので、誤差 e_y がゼロになれば u_r の出力はない。制御アルゴリズム2はこのようにリレー型であるので、アルゴリズム1に比べて強健な非線形操作である。

4. 実験結果

制御アルゴリズム1の実験結果をFig. 8に示す。参照信号 r に60mmの振幅を持つ0.1Hzの三角波状信号が与えられ、そのときの位置信号 y 、空圧サーボ弁への操作入力 u と追従誤差(Tracking Error)が図示される。Fig. 2で示した比例制御の結果に較べて、試験開始直後の若干の階段状応答が見られるものの、三角波状参照信号 r の一周期を過ぎるとスティックスリップ現象の大きな低減を観察でき、追従誤差も適応制御則(3)~(6)式によって時間の経過に伴い改善されるが、試験開始後37secのときの三角波切返し時の偏差($r-y$)は約3mmに留まっている。また、シリンダ引込み動作時はほぼ $r=y$ を得ているが、伸び側で大きな偏差を生じ、制御アルゴリズム1は目的を達することに対し未だ不十分であることが判明した。

Fig. 9は制御アルゴリズム2による実験結果で、Fig. 7に図示されるPI要素の無い場合の実験結果である。Fig. 8の結果に較べて、さらに改善を加えることができたが、三角波切返し時の偏差($r-y$)は約1.5mm程度でしかない。しかし注意深くFig. 9をFig. 8に比較すると、シリンダの移動方向にかかわらず、同様な非線形操作入力の効果を見てとれる。Fig. 10は制御アルゴリズム2でPI要素($K_p=20$, $K_I=100$)を図示の通りに作用させた場合の実験結果を示す。追加的積分要素の効果で、三角波切返し時の偏差($r-y$)を約0.22mmまで改善することが出来た。参照信号 r の3周期目で実用上参照信号 r と出力 y は一致していると見て良い。この実験では参照信号 r を $\pm 12\text{mm/sec}$ で変化させたが、試験開始後30~40secの適応動作で $\pm 1.2\text{mm/sec}$ の追従誤差を示している。Fig. 11は制御アルゴリズム2のステップ応答を示す。参照信号 r は2V(60mmに相当)のステップ状信号である。Tracking Errorのデータから明らかな様に、定常偏差はフィードバックセンサーの分解能である $6.25\mu\text{m}$ 以下であった。

但し、Fig. 11で示される制御結果は、(7)式の $\alpha(t)$ を

Fig. 8 Test Result on Algorithm 1

Fig. 9 Test Result on Algorithm 2 without PI

Fig. 10 Test Result on Algorithm 2 with PI

Fig. 10の試験開始40秒後に得られた $\alpha(40)=0.5$ の固定値とし $DB=0.03$ として、同様に(2)式の $K_c(t)$ も $K_c(40)=30$ の固定値とした。

以上述べたように、(3)(7)式で提案した非線形操作入力で一定の効果を得ることができたと考える。本提案は、出力誤差 e_y を非線形動作の基準にしているの、Fig. 2に見る静止摩擦と動摩擦を判別して制御しているわけではなく、あくまでも e_y が小さくなるように、非線形の大きく変化する操作入力が印加され、換言すれば従前からよく用いられる一般的ディザ信号の振幅や周期を適応的に変化させ、その結果、シリンダの滑らかな動作と定常偏差の改善が得られたと思われる。

5. 結 言

制御対象の概略構造が分かっているならばオンラインでシステムのパラメータを調整できる単純適応制御を用い、さらにスティックスリップ現象による影響を減じる非線形操作入力を追加する方法で、一般的な産業用空圧シリンダであっても、その位置決め精度を数 μm 程度に成しうる事を実験で検証した。しかしながら、本論文における実験で観測された $\pm 1.2\text{mm/sec}$ の速度偏差には不満が残る。もし制御対象が積分要素を有するのであれば、Fig. 7に見るように追加的積分が制御則に存在するのであるから、制御アルゴリズム 2 は 2 重積分系になって、定常偏差のみならず速度偏差もゼロになって然るべきである。従って、制御対象が限りなく純積分に近いハードウェアの研究・開発が著者らの次の課題になると思われる。その場合、前出の榊らの研究¹⁾の様に、静圧軸受を用いて構成された空圧シリンダと精巧なサーボ弁が必要になるかも知れぬが、著者らが提案した制御方法がシステム全体の低廉化に役立つものと希望的観測を持っている。(例えば参考文献^{7,11)}の低摩擦型空圧シリンダを用いて、著者らの方法で制御したとき、 $\pm 0.25\mu\text{m}$ の位置決め精度を得た。) また、吉満ら²⁸⁾は空気圧シリンダシールの摺動・非摺動をニューラルネットで判別し優れた結果を得ているが、この方法を著者らのシステムに組み入れて、たとえばFig. 10に見るようなサーボ弁への操作入力の高周波成分の軽減を図れぬか検討を進めたい。なお、本論文では、単純適応制御におけるPFCの効果、即ちPFCの付加による拡張系の概強正実性に依存して実験を進め、既述の様な結果を得たのであるが、Fig. 7

の非線形操作入力 u_r と追加的PIが上記の概強正実性を損なわぬか、今後の理論的展開を試みるべきであり、成果が出れば別稿で報告したい。

参 考 文 献

- 1) 榊：精密位置決め用空気圧アクチュエータ，フルイドパワーシステム学会誌，31-5，382/386 (2000)
- 2) エアアクチュエータ，住友重機械工業株式会社製品カタログ
- 3) 位置と荷重 1 軸制御，日刊工業新聞，Nov. 27 (2003)
- 4) 中野，堀川，浅蔭，田中：空気圧・圧電超音波複合形アクチュエータによる精密位置決めシステム，日本油空圧学会論文集，24-3，394/398 (1993)
- 5) 斎藤，池田，杉本，池辺：空気圧シリンダの低速度制御に関する研究，日本油空圧学会論文集，26-6，804/810 (1995)
- 6) 則次，福藪，高岩：ファジィ制御を用いた空気圧サーボ系の動特性改善，日本油空圧学会論文集，25-6，733/738 (1994)
- 7) 勝間田，石田，遠藤，能登山：ニューラルネットワークを用いた空気圧シリンダのモデル規範型I-PD制御，日本油空圧学会論文集，26-4，504/509 (1995)
- 8) 小山，吉満：空気圧シリンダサーボ適応制御系における適応ゲインの切換え制御，日本油空圧学会論文集，27-2，293/298 (1996)
- 9) 勝間田，藤原，石田，能登山：ニューラルネットワークを用いた空気圧シリンダのLQI制御の一方法，日本油空圧学会論文集，27-3，403/409 (1996)
- 10) 楊，川上，河合：パルス幅変調方式による空気圧シリンダの位置制御に関する一考察，日本油空圧学会論文集，27-6，803/809 (1996)
- 11) 藤原，勝間田，石田，能登山：外乱オブザーバを併用した空気圧シリンダの最適制御，日本油空圧学会論文集，27-6，796/802 (1996)
- 12) 宋，石田：適応むだ時間補償器による空気圧サーボ系の特性改善，日本油空圧学会論文集，27-7，933/940 (1996)
- 13) 楊，川上，河合：摩擦力補償を用いた空気圧シリンダの位置決め制御，日本油空圧学会論文集，28-2，245/251 (1997)
- 14) 張，香川，藤田，大隈：静圧軸受け機構を利用した高速・精密位置決め用エアサーボテーブルの開発，日本油空圧学会論文集，28-4，451/457 (1997)
- 15) 城平：「空気圧の現状と動向」空気圧サーボシステム，日本油空圧学会誌，28-7，748/752 (1997)
- 16) 門脇，猪鼻，石田，能登： μ シンセシスを用いた空気圧シリンダのロバスト制御，日本油空圧学会論文集，29-1，1/8 (1998)

Fig. 11 Step Response : with Nonlinear Function

- 17) 山田, 田中, 清水: 空気圧サーボ系の適応極配置制御, 日本油空圧学会論文集, 29-7, 137/142 (1998)
- 18) 橋本, 石田, 能登山: 空気圧シリンダの周波数領域における適応型I-PD制御, 日本油空圧学会論文集, 30-3, 61/66 (1999)
- 19) 前田, 川上, 中野: 空気圧リフタの位置制御, 日本油空圧学会論文集, 30-4, 89/95 (1999)
- 20) 橋本, 今枝, 岡, 三浦, 喜羽: 2自由度制御法を用いた空気圧モータ駆動系の位置制御, 日本油空圧学会論文集, 31-5, 145/150 (2000)
- 21) 塚本, 川上, 中野: 空気圧サーボ系へのゲインスケジューリング制御の適用について, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 33-1, 15/20 (2002)
- 22) 山田: 空気圧サーボ系に対する知能化適応制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 34-1, 1/7 (2003)
- 23) 木村, 藤岡, 渡海, 高森: サンプル値 H_∞ 制御による空気圧シリンダの制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 34-3, 62/65 (2003)
- 24) 岩井: 適応制御の実用に向けての新しい動向—単純適応制御 (SAC) 法, システム制御情報学会誌, 37-5, 277/283 (1993)
- 25) Stribeck R: Die Wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Pollenlager, V.D.I., (1902)
- 26) Sato K et al: Adaptive Positioning Control for Linear Slider with Friction Compensation, Proceeding of SICE 3rd Annual Conference on Control Systems, 293/296, (2003)
- 27) 塚本, 横田: 並列フィードフォワード補償器を応用した2自由度制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 34-6, 126/133 (2003)
- 28) 吉満, 小山: 空気圧シリンダシールの摺動・非摺動状態の判別と制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 33-3, 57/62 (2002)