ソフトウェア曲線に従った空気圧シリンダの
速度および位置制御*山藤和男^{*1}, 岩田元昭^{*2}, 中野祐治^{*3}Velocity and Position Control of a Pneumatic Cylinder
following the Software Curves

Kazuo YAMAFUJI, Motoaki IWATA and Yuhji NAKANO

In order to apply pneumatic cylinders to actuators of machines and equipments for flexible automation such as the robots, accurate velocity control together with precise position control is indispensable. The electric servomotors utilized in advanced robots are controlled by computers following excellent software curves through which smooth starts and stops as well as high-speed driving and accurate positioning of the robot manipulators, are achieved. Software servocontrol of a pneumatic cylinder was investigated in this study. As a reference curve for velocity and position, the modified trapezoidal curve was chosen and stored in the computer's memory cells in a digital system. In addition to PD and PID feedback control of the position and velocity deviation, the feedforward control method for velocity and acceleration of the cylinder was examined. It is confirmed experimentally that the software servocontrol applied in this study is applicable for the advanced control of the pneumatic actuators.

Key Words: Pneumatic Cylinder, Velocity and Position Control, Software Servocontrol, Modified Trapezoidal Curve

1. 緒 言

空気圧シリンダをロボットや各種自動機のアクチュエータとして広く利用するためには、シリンダについて高精度な位置制御のみならずストローク途中の速度制御を十分に行うことが必要である。以前、筆者らは滑らかな加減速を行うことのできる曲線をもつ板カムを用いてシリンダ駆動系の速度制御弁(スピードコントローラ)を制御することにより指令速度曲線に対する比較的良好な速度追従性と停止位置精度を得た¹⁾。

しかし、板カムを用いる限り、制御できるストロークは1つであり、速度と位置が高精度に制御ができたとしても任意の位置に任意の速度で駆動するという要求には対応できない。空気圧シリンダのサーボ制御を完全に行うには電気サーボモータと同じく、起動から停止までの加速度、速度および位置の変化を考慮して制御を行うことが必要である。

現在、大部分の産業用ロボットに使用されている電気アクチュエータ(主として、DCおよびACサーボモータ)では加速度までを考慮した速度曲線と変位曲線がソフトウェアの形でコンピュータのメモリに格納されており、移動距離、最高速度および制御(駆動)時間などを指定すればロボットアームはそのソフトウェア曲線に従って滑らかに高速で動作し、高精度で停止することができる。ロボットの駆動においては、要求される動作(作業)に従ってロボット・ハンド中心の座標と速度を指定すれば、滑らかな動作軌道の発生から各軸アクチュエータの移動量、速度または制御時間まで実時間で計算され、次にメモリ中の曲線に従って時系列的に出力される各状態変数の指令値によりソフトウェア的に駆動される。

本研究は板カム=ハードウェア・カム曲線に代わってソフトウェア・カム曲線を速度と変位の指令曲線として用いて空気圧シリンダの速度および位置制御を行うことを目的とする。制御実験結果によれば、ピストン速度の指令曲線への追従性と停止位置精度はかなり良好であり、この方式は将来的に非常に有望なものであることを確かめた。

* 昭和63年11月18日 昭和63年秋季油空圧講演会において講演、原稿受付 平成元年3月17日。

^{*1} 正員、電気通信大学(〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

^{*2} (株)小金井製作所(〒184 小金井市緑町3-11-28)。

^{*3} NTTシステム技術(株)(〒100 東京都千代田区千代田1-1-6)。

2. ソフトウェア・カム曲線

ソフトウェア・サーボ制御はロボットやNC工作機械の駆動にみられるように、アクチュエータをコンピュータのソフトウェアにもとづいて駆動し、一般に閉ループ制御により駆動される機械体の速度と位置を高精度に制御するために用いられている。代表的なソフトウェア指令曲線にはカム機構の高速駆動に関する研究から生まれた変形台形曲線、変形正弦曲線、サイクロイド曲線など多くのものがあり^{2,3)}、それらを発展させたNC-2曲線は日本の代表的なロボットであるSCARA型ロボットに多く用いられている⁴⁾。

本研究では空気圧機器と配管における空気圧縮性と摩擦特性を考慮し、最大加速度が小さな変形台形曲線（付録参照）をソフトウェア曲線として選んだ。駆動時間の配分を決める無次元時間のうち、加速度の立ち上がり時間を $T_a = 0.125$ とし、変形台形曲線の変位、速度、加速度をソフトウェアの形で与えた。

位置制御のために指定する変数は、変位（初期値と目標値）と駆動時間の2つとしたが、これより速度曲線、変位曲線ならびに最大速度は自動的に決まる⁵⁾。実際の制御では変位、速度あるいは加速度の指令値と実測値の偏差などから制御入力を計算し、それをコンピュータよりサーボアンプへ出力する。

3. 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。空気圧シリンダは片ロッド形、ストローク300mm、内径35mmでメタルシールのものを用い、水平に設定した。ピストンの駆動には2個の電気空気圧力比例制御弁（以下、比例弁という）を用いた。ピストンロッド先端には位置検出のため、デジタル式リニアスケール（分解能20 μ m）の読み取り用光センサが取り付けられている。

制御用コンピュータとして、パーソナルコンピュー

図1 空気圧サーボ制御実験システムの概要

(a) 比例弁の入出力特性

(b) ピストン停止位置と指令電圧の関係

図2 比例弁の諸特性

タ（PC-9801VM II、数値演算プロセッサ8087付き）を使用し、制御プログラムはC言語により記述した。本実験で使用した比例弁の入出力特性、ピストン停止位置とバイアス電圧の関係を図2に示す。参考文献6)、7)には、この同じ比例弁を別の空気圧サーボ制御装置へ適用した例が述べられている。

4. 指令曲線に沿ったPID制御

本研究においてはピストンの位置、速度および加速度の指令値として X_r 、 $\dot{X}_r$ 、 $\ddot{X}_r$ を前記、変形台形曲線を与え、それらの実験値 X （ピストンが出る方向を正とする）、 $\dot{X}$ および $\ddot{X}$ の偏差を用いてPIDフィードバック（以下、FBという）制御を行うものとする。両比例弁に対する制御入力（電圧）をロッド側 U_a 、ヘッド側 U_b 、 K_1 、 K_2 、 K_3 をそれぞれFBゲイン

とし、次式で与える。

$$U_a = U_{a0} - K_1 (X_r - X)$$

$$- K_2 \sum_0^k (X_r - X) - K_3 (\dot{X}_r - \dot{X}) \quad (1)$$

$$U_b = U_{b0} + K_1 (X_r - X)$$

$$+ K_2 \sum_0^k (X_r - X) + K_3 (\dot{X}_r - \dot{X}) \quad (2)$$

U_{a0} , U_{b0} は弁に対するバイアス電圧であり、位置の指令値を入力すれば図2の関係を利用して、それに対応する値がコンピュータにより出力される。速度の実験値はリニアスケールから検出された位置の値を数値微分することにより求めた。制御系のブロック線図を図3に示す。図中の G_a , G_b はそれぞれ、次式で表されるが、詳細は文献7)を参照されたい。

$$G_a = B_1 / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$$

$$G_b = B_2 / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$$

5. 実験方法

パーソナルコンピュータにより、ソフトウェア化された変形台形曲線の位置、速度または加速度をサンプリング時間2msごとに計算し、これを指令値とする。両比例弁のバイアス電圧として、位置指令値に対応するものが与えられる。ロッド側のバイアス電圧はピストンの摺動抵抗による不感帯を少なくするため、前進時と後退時でわずかに変化させている。ヘッド側のバイアス電圧は位置指令値に対応するものだけとした。

ピストンの変位 L は後退端より50mmから250mmまでの $L=200$ mmと100mmから200mmまでの $L=100$ mmの2種類について実験を行った。各ゲインの決定においては速度制御では K_3 、位置制御では K_1 , K_2 に重みをおいて実験を数回行い、指令値への追従がよいものを選んだが、これは一度このように設定しておけば指令位置を変化させた場合でもそのまま使用できる。実験は空気圧シリンダを水平にして、ほとんど無負荷状態で行った。

6. 速度のフィードフォワード制御実験結果

速度の開ループ・フィードフォワード(以下、FFという)制御では比例弁A, Bに対する制御入力電流として、速度指令値 $\dot{X}_r$, 加速度指令値 $\ddot{X}_r$ およびバイアス電圧 U_{a0} , U_{b0} からなる次式を与える。

$$U_a = U_{a0} - K_3 \cdot \dot{X}_r - K_4 \cdot \ddot{X}_r \quad (3)$$

$$U_b = U_{b0} + K_3 \cdot \dot{X}_r + K_4 \cdot \ddot{X}_r \quad (4)$$

最高速度を200, 400mm/s, 制御時間をそ

図3 制御システムのブロック線図

図4 ソフトウェア・カム曲線による速度制御の一例($K_3=1.0$, $K_4=0$)

(a) $K_3=1.0$, $K_4=0$

(b) $K_3=1.0$, $K_4=1.0$

図5 ソフトウェア・カム曲線による速度制御

れぞれ2, 1秒として開ループで速度のFF制御を行った結果を図4および5(a)に示す。この場合 $K_3=1.0$, $K_4=0$ としている。立ち上がり部分には

ムダ時間があるが、指令曲線への速度追従性は低速時（図4）にはかなりよい。K3のほかに加速度のゲイン K4 (= 1.0) も考慮した結果を図5 (b) に示すが、図5 (a) に比べて追従性が改善されている。

7. 速度と位置の同時制御結果

指令曲線のFFによる開ループ制御〔式(3)〕、(4)〕のほかに、式(1)〕、(2)〕のうち変位とその積分値だけをFBして、速度と位置の同時制御を行った結果を図6に示す。

この場合、速度の迅速な応答を目的として指令速度の比例ゲインを0.85、指令加速度に対するゲインを0.05とし、位置制御のために位置偏差のゲインを0.4、その積分ゲインを4.0とした。これらのゲインはそれぞれのゲインだけを用いて実験を行った結果のうち、良好な結果を与えるものを用いたが、図6によれば各項のみを単独に用いた結果を加えて制御入力とすることにより、速度も位置もかなりよく制御されていることがわかる。

(a) 変位曲線

(b) 速度曲線

図6 指令値に従った速度と位置の同時制御結果

8. 位置の積分なしFB制御結果

(a) 変位曲線

(b) 速度曲線

図7 積分なし比例FBおよび指令値の直接FF制御を適用した場合の制御結果

図8 定常位置偏差の分布

式(1)〕、(2)〕において K2=0として制御した結果を図7に示す。図7によれば、速度と位置のFBにより、空気圧シリンダとしては各指令に対する速度と位置の追従性はかなり改善されている。各ゲインの選択基準は前節と同様である。

L = 200 mmでバイアス電圧が最適なものについて50回実験を行った結果を図8に示す。ロッド側のバイアス電圧を最適バイアス電圧から-1%および+2%だけ変化させた結果をそれぞれ、図9 (a) および (b) に示す。図8、9を比較すれば、バイアス電圧変化の影響を検証することができる。この結果を利用してロッド側バイアス電圧を制御することにより、位置決め精度を高めることができる。

(a) 最適値より1%減少した場合

(b) 最適値より2%増加した場合

図9 ロッド側バイアス電圧を最適値から微小量変化させたときの定常位置偏差の分布

9. 積分付き位置制御結果

位置の積分付きFB制御では、速度制御中は式(1)、(2)で積分ゲインを $K_2 = 0$ とおき、停止位置が最終目標値の ± 0.3 mm以内になったときには制御を終了し、それ以外の場合には $K_3 = 0$ 、 $K_2 \neq 0$ として積分制御をかける。 $L = 200$ mmについて50回実験した結果を図10に示す。図から確かに目標値近傍での積分制御の効果が認められる。

10. 位置制御における学習効果

シリンダの制御に学習効果を導入するため、8章の位置の積分なしFB制御が終わった段階で、位置偏差の大きさを調べて、 0.05 mmごとに圧力に換算した電圧を前回のロッド側バイアス電圧から変化させて連続的に実験を行った。図11には $L = 100$ mmに対する50回の実験結果を示す。50回の試行によって得られた位置偏差の時間的変化の例を図12に示す。図よりヘッド側バイアス電圧を一定にして、ロッド側バイアス電圧を変化させて停止位置の微調整を行うと

図10 定常位置偏差の分布(位置決め点近傍での積分制御付き)

図11 定常位置偏差の分布(学習効果あり)

図12 学習効果による定常偏差の時間的減少

いうこの方式の学習効果が認められる。

この方式を用いれば、負荷が変化する場合にも数回の実験を行うだけで一定の位置決め精度は確保できる。しかし、本空気圧サーボ系ではバイアス電圧変化の最小設定値は位置換算で 0.05 mmであるので、定常位置偏差 ± 0.05 mmというのが本実験システムで得られる限界と考えられる。

1.1. 実験結果の検討と結論

- (1) 空気圧シリンダの制御に、変形台形曲線にもとづいた変位、速度および加速度曲線を指令値としてソフトウェアの形でパソコンからサンプリング時間ごとに出力するソフトウェアサーボ制御を提案し、実験を行った。速度の直接FF制御、位置偏差と速度偏差に関するPID・FB制御の双方について指令曲線に対する速度と位置の追従は良好であった。ピストン速度をこのように制御した例はない。
- (2) 本研究では空気圧シリンダにおける空気圧の圧縮性と摩擦特性を考慮して、最大加速度が小さな変形台形曲線をソフトウェア曲線として選んだ。実験結果によれば、加速度指令までも考慮すれば、起動時のムダ時間を小さくし、速度曲線への追従性がよくなることがわかった。
- (3) 制御実験の結果、位置偏差が生じた場合にはロッド側バイアス電圧を最初に設定したバイアスから、実際の偏差に対応する量だけソフトウェアにより、バイアス電圧を自動的に変化させることにより、積分なしFB制御においても位置決め精度を高めることができることを確かめた。この結果を利用して、位置決めの学習制御を行ったところ、試行を繰り返すごとに偏差を小さな値に収束させることができた。この方法は単純ではあるが、ピストンの負荷変動に対しても有効である。
- (4) ソフトウェア曲線に従った制御とPD・FB制御の適用で定常位置偏差±0.3mm以内の制御は容易に達成できる。PID・FB制御では±0.2mm以内、PID・FB制御に学習効果をもたせたものでは±0.1mm程度の位置決めが可能である。

付 録

変形台形曲線（付図1）の式を次に示す。

X , $\dot{X}$, $\ddot{X}$, T はそれぞれ、変位、速度、加速度、時間を無次元化したもの。

[定数の式]

$$Ta = 0.125, \quad \ddot{X}_m = 1 / (0.25 - Ta + 2Ta/\pi)$$

$$\dot{X}_a = 2Ta\ddot{X}_m/\pi$$

$$X_a = 2Ta^2\ddot{X}_m(1 - 2/\pi)$$

$$\dot{X}_b = \ddot{X}_m(0.5 - 2Ta) + \dot{X}_a$$

付図1 変形台形曲線

$$X_b = \ddot{X}_m(0.5 - 2Ta)^2/2$$

$$+ \dot{X}_a(0.5 - 2Ta) + X_a$$

$$X_c = 1 - X_b, \quad X_d = 1 - X_a$$

[変位の式]

○ 区間Ⅰ ($0 < T < Ta$) において、

$$X = 2Ta\ddot{X}_m [T - 2Ta/\pi \sin(\pi T/2Ta)] / \pi \quad (A)$$

○ 区間Ⅱ ($Ta < T < 0.5 - Ta$) において、

$$X = \ddot{X}_m(T - 2Ta)^2/2 + \dot{X}_a(T - Ta) + X_a \quad (B)$$

○ 区間Ⅲ ($0.5 - Ta < T \leq 0.5 + Ta$) において、

$$X = 4[Ta^2\ddot{X}_m\{1 - \cos[\pi(T - 0.5 + Ta)/2Ta]\} / \pi^2 + \dot{X}_b(T - 0.5 + Ta) + X_b] \quad (C)$$

○ 区間Ⅳ ($0.5 + Ta < T \leq 1 - Ta$) において、

$$X = -\ddot{X}_m(T - 0.5 - Ta)^2/2 + \dot{X}_b(T - 0.5 - Ta) + X_c \quad (D)$$

○ 区間Ⅴ ($1 - Ta < T \leq 1$) において、

$$X = 4Ta^2\ddot{X}_m\{\cos[\pi(T - 1 + Ta)/2Ta] - 1\} / \pi^2 + \dot{X}_a(T - 1 + Ta) + X_d \quad (E)$$

参 考 文 献

- (1) Kazuo Yamafuji and Takashi Iwagaya, Speed and Position Control of a Pneumatic Cylinder Using a Cam and Air Sensors, Proceedings of the Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, ASME (1979), 1275.
- (2) 牧野 洋, 自動機械機構学, 日刊工業新聞社 (昭51).
- (3) 牧野 洋, ユニバーサル・カム曲線とその応用, 山梨大学工学部研究報告, 第28巻 (昭52), 48.
- (4) 牧野 洋, SCARAロボットの設計思想, 日本機械学会誌, 86-773 (昭58), 367.
- (5) 山藤和男, 小嶺哲也, ソフトウェア・カム曲線によって駆動されるスライダ・振子型ローダアームの振動制御, 日本機械学会論文集, C編, 55-515 (平1), 1684.
- (6) 山藤和男, 小林義武, 石橋昌宏, 空気圧シリンダの最適制御, ibid, 53-487 (昭62), 757.
- (7) 山藤和男, 福島哲治, 空気圧シリンダの鉛直方向位置および力の同時制御, 油圧と空気圧, 19-3 (昭63), 226.