学習ポジカスト制御法による空気圧 ロボットの高速位置決め*

則 次 俊 郎^{*1}, 朴 最 圭^{*2}

High-Speed Positioning of Pneumatic Robot Using Learning Posicast Control

Toshiro NORITSUGU and Jung-Gyu PARK

In this study our objective is high-speed positioning of a pneumatic robot. To realize a high-speed drive, the control algorithm should be as simple as possible to reduce the calculation time of control input. A posicast control scheme may be considered an effective control strategy which satisfies such a requirement. However, the original scheme is not sufficient for a pneumatic drive system which is usually of an order higher than the second, and has an operating delay in the electro pneumatic valve, etc. We improve the original posicast control scheme so that it can be applied to positioning of the pneumatic robot. In this control scheme, the regulation of both the height and the switching time of reference input is important. Thus, we provide a learning function which can regulate these parameters with respect to the configuration of the last response during repeated operation. We describe the proposed control algorithm and discuss its availability through simulations and experiments.

Key Words: Transient Response, Learning Control, Computer Control, Posicast Control, Pneumatic Robot, High-Speed Positioning

1. 結 言

軽荷重部品の搬送や組立作業用ロボットには高い出力-重量比と高速性が要求される。ロボットの軽量化と高速化を実現するためには、アクチュエータの選定が重要である。この点で空気圧式は電気式あるいは油圧式に比べ優位であり、小型軽量化が容易である。反面、空気の圧縮性による低剛性や制御弁の動作遅れなどにより任意の点に対する位置決め制御は困難とされている。このような問題に対処するため、動作条件の変動などに対応できる適応可変構造制御法⁽¹⁾や外乱推定オブザーバ⁽²⁾により空気の圧縮性と摩擦の影響を補償する制御法などが提案されている。実験を通して、それぞれの有効性は確認されているが、空気圧の特長の一つである高速性についての考察は不十分である。

本論文では空気圧ベーンモータを用いた小型ロボットを試作し、その高速位置決め制御を実現するとともに動作条件の変動などに対応できる新たな制御法を提案する。

ロボットの高速位置決めを可能にするとともに制御

用計算機の負担を軽減するためには、制御アルゴリズムはできるだけ単純なことが望ましい。ポジカスト制御法はその一つの方法として有効であると考えられる。この制御法によれば、制御系が線形な2次振動系の場合には、行き過ぎがなくかつ速応性の優れた有限時間整定応答が得られる⁽³⁾。しかし、一般に、空気の圧縮性による圧力の応答遅れや制御弁の動作遅れにより空気圧系は高次振動系となり、さらに、各部の摩擦などによりパラメータの変動が生じる。このような環境の下では、ポジカスト制御において重要である目標入力の高さやその切換え時間の最適値が一律に定まらない。ポジカスト制御法を空気圧ロボットの位置決め制御に効果的に利用するためには、これらの値を可変にできる適応的な制御アルゴリズムが必要である。

そこで、本研究では、繰返し動作を前提として、前回の応答波形に基づいて、目標入力の高さとその切換え時間を逐次更新する学習機能を元来のポジカスト制御法に付加する。目標入力高さの学習則は文献(4)と同様とし、本論文では、過渡応答波形のピーク値に注目した切換え時間の学習則を新たに提案する。本学習則はピーク値の大小関係から切換え時間の適否を判断するとともに、これに基づいて切換え時間を修正するものである。提案する制御法を記述した後、シミュレ

* 平成4年6月17日 ロボティクス・メカトロニクス講演会'92において講演,原稿受付 平成4年12月4日。

^{*1} 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 岡山大学大学院。

ーションおよび実験を通してその有効性を明らかにする。

2. ポジカスト制御の原理

伝達関数が次式で表される2次振動系を考える。

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

これに単一ステップ入力 θ_r が加えられたときのステップ応答を図1(a)に示す。理想的な2次振動系においては、ピーク時間 t_p とピーク値 θ_p について次の関係が成立する。

$$t_p = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\gamma = \frac{\theta_r}{\theta_p} = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ポジカスト制御法においては、式(3)を用いて目標入力 θ_{r1} と θ_{r2} を次式のように定める。

$$\theta_{r1} = \gamma\theta_r \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta_{r2} = \theta_r - \theta_{r1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

まず、 $t=0$ において θ_{r1} を加える。そのステップ応答 θ_1 を図1(b)に示す。ピーク値 θ_{p1} は $t_p = t_{p1}$ において生じ θ_r と一致する。次に、 $t=t_p$ において θ_{r2} を加える。図1(c)にそのステップ応答 θ_2 を示す。 t_p より半周期遅れてピーク θ_{p2} が生じる。 θ_1 と θ_2 を加えたものが実際に得られる応答であり、図1(d)に示すように振動成分が相殺され、 t_p 以後は目標値 θ_r に保持される。

3. 学習ポジカスト制御法

空気圧駆動系は制御弁の動作遅れや各部の摩擦や空気の圧縮性による圧力の応答遅れなどにより厳密には3次以上の高次振動系となり、さらに、負荷によるパラメータ変動がある場合、最適な γ と t_p の値を理論的に求めることは難しい。本論文では、これらの問題に対処するため目標入力およびその切換え時間を適応的に修正できる学習機能を元来のポジカスト制御法に付加する。なお、以下の理論的考察においては、対象とする制御系は近似的に2次振動系に近い挙動を示すものと仮定し、理論的考察は式(1)より計算される応答に基づいて行う。

3.1 目標入力の学習 図2は k サイクルにおける目標入力およびこれに対する応答を示す。式(3)に従い $k+1$ サイクルめの目標入力 $\theta_{r1}(k+1)$ を次式により更新する⁽⁴⁾。

$$(1) \quad \frac{\theta_{r1}(k)}{\theta_{p1}(k)} \geq 0.5 \text{ の場合}$$

$$\theta_{r1}(k+1) = \frac{\theta_{r1}(k)}{\theta_{p1}(k)} \theta_r \quad \dots\dots\dots (6\cdot a)$$

$$(2) \quad \frac{\theta_{r1}(k)}{\theta_{p1}(k)} < 0.5 \text{ の場合}$$

$$\theta_{r1}(k+1) = 0.5\theta_r \quad \dots\dots\dots (6\cdot b)$$

式(6・a)は k サイクルめの応答特性から $k+1$ サイクルめの目標入力を修正し、ピーク値 $\theta_{p1}(k+1)$ を θ_r に一致させようとするものである。理想的な2次振動系のステップ応答における $\theta_{p1}(k)$ はその目標入力 $\theta_{r1}(k)$ の2倍より大きくなることはありえないことを考慮して式(6・b)の条件を設ける。

3.2 切換え時間の学習 θ_{r2} を付加する時刻を切換え時間 t_s と定義する。切換え時間が適当でない場合には、振動成分が相殺されず振動的な応答となる。そこで、何らかの方法により切換え時間の適否が判断できれば、繰返し動作のたびに、適当な学習則によってこれを修正することよりその最適値へ至ることができる。以下では、 t_p を最適切換え時間とする。

図1 ポジカスト制御の原理

(1) 切換え時間の適否の判断条件 最適な切換え時間に比べて目標入力 of 切換えが早過ぎた場合 ($t_s < t_p$) および遅過ぎた場合 ($t_s > t_p$) の応答の例を図 2 (b) および (c) に示す。 k サイクルめの応答において生じるピーク値を $\theta_{p1}(k)$, $\theta_{p2}(k)$, $\theta_{p3}(k)$ とし, ピーク差 $\theta_{e12}(k)$, $\theta_{e13}(k)$, $\theta_{e23}(k)$ を次式のように定義する。

$$\theta_{e12}(k) = \theta_{p1}(k) - \theta_{p2}(k) \quad \cdots \cdots (7 \cdot a)$$

$$\theta_{e13}(k) = \theta_{p1}(k) - \theta_{p3}(k) \quad \cdots \cdots (7 \cdot b)$$

$$\theta_{e23}(k) = \theta_{p2}(k) - \theta_{p3}(k) \quad \cdots \cdots (7 \cdot c)$$

図 3 は t_s に対するそれぞれの値の変化を付録の式 (21) を用いて計算したものである。ただし, $0 \leq t_s \leq 2t_p$ とする。目標入力の切換えが早過ぎる場合には, 式 (8・a), 切換えが遅過ぎる場合には式 (8・b) の関係が成立する。

$$\theta_{e13}(k) > 0 \quad \cdots \cdots (8 \cdot a)$$

$$\theta_{e13}(k) < 0 \quad \cdots \cdots (8 \cdot b)$$

当然のことながら, $t_s = t_p$ の場合には, 各ピーク値は目標値 θ_r に一致する。式 (8) の証明は付録に示す。

(2) 切換え時間の学習則 次式が成立するとき応

答が振動的であると判定し, その他の場合には振動的でないとする。

$$\theta_{e12}(k) > \varepsilon \text{ or } \theta_{e23}(k) > \varepsilon \quad \cdots \cdots (9)$$

ここで, ε は振動振幅の許容値である。

図 3 に基づいて次式のような切換え時間の学習則を提案する。

$$t_s(k+1) = t_s(k) + \alpha \theta_{e12}(k) \text{sgn}\{\theta_{e13}(k)\} \quad \cdots \cdots (10)$$

式 (9) より k サイクルめの応答が振動的であると判定された場合には, 式 (10) により $k+1$ サイクルめの切換え時間を修正する。

図 4 は切換え時間の収束性を示す。 $\alpha > 0$ は学習ゲインであり, α を大きくするにつれて収束は速くなるが, 大き過ぎると収束しなくなる。収束のための条件は

図 3 切換え時間と各ピーク差の関係

(a) k サイクルめにおける目標入力

(b) 切換えが早過ぎる場合 ($t_s < t_p$)

(c) 切換えが遅過ぎる場合 ($t_s > t_p$)

図 2 応答波形に及ぼす切換え時間の影響

(a) 発散

(b) 収束

図 4 切換え時間の学習過程

$$\frac{\theta_{e12}(k+1)}{\theta_{e12}(k)} < 1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。図4(a)は α を大きく設定した結果、式(11)が満足されず切換え時間が発散する場合、図4(b)は式(11)が満たされて最適な切換え時間へ収束する場合について、それぞれの学習過程を示す。設定できる α には上限が存在する。

以下では、提案した制御法の有効性を検討する。

4. 制御系の構成

4.1 実験装置 図5は1自由度ロボットアームの制御回路を示す。計算機からの出力信号は制御弁ドライバを通してPCM弁および3ポート電磁弁を駆動する。PCM弁⁽⁵⁾は n 個のオンオフ電磁弁を並列に接続し、それぞれの開口面積の比が $S_1:S_2:S_3:\dots:S_n=2^0:2^1:2^2:\dots:2^{n-1}$ となるように絞りを調節したものである。これにより、アクチュエータチャンバからの排気流量を 2^n 段階に調整でき、メータアウト方式による多段階の速度調整ができる。本研究では、 $n=6$ とした。3ポート電磁弁は空気の給排気の方

向を制御する。回転角は関節に取付けられているロータリエンコーダにより検出され、また、両チャンバに圧力センサを取付けている。アクチュエータ両チャンバの容積が同

じになる位置を原点とする。ロボットアームおよびコントローラの主なパラメータを表1に示す。

図6はロボットアームの基本制御系であり、 C, P はそれぞれコントローラおよび駆動系の特性を示す。 $|u|$ はPCM弁の制御入力であり、表1に示すように整数信号となる。 u の符号は3ポート弁の切換えによって表現する。目標入力 θ_r とその切換え時間 t_s は3章で示した要領で与える。

4.2 制御アルゴリズム 図7は提案する学習アルゴリズムを示す。 k サイクルめの応答について、各ピーク値を測定し、ピーク間の差を求める。これらを用いて、式(9)に従って応答が振動的であるかどうか判定する。振動的でないと判断された場合には k サイクルめのパラメータを保持して $k+1$ サイクルめの位置決め制御を実施する。

振動的であると判断された場合には、式(8)を用いて切換え時間の適否を判定する。切換えが遅過ぎる場合、式(10)に基づいて $k+1$ サイクルめの切換え時間を次式により更新する。

$$t_s(k+1) = t_s(k) - \alpha \theta_{e12}(k) \quad \dots\dots\dots (12)$$

一方、式(8・a)が成立すれば、切換えが早過ぎると判定される。しかし、実際の制御系においては、アクチュエータの摩擦などの影響により $\theta_{p3}(k)$ が減少し、切換えが遅過ぎるにも関わらず誤って早過ぎると判断される場合も起こり得る。このような判定ミス为了避免するため、 $\theta_{p1}(k)$ に次のような制限を設ける。

$$\theta_{p1}(k) > \theta_{ae} \quad \dots\dots\dots (13)$$

上式が成立すれば、当初の判定通り切換えが早過ぎるとし、次式より $k+1$ サイクルめの切換え時間を修正する。

$$t_s(k+1) = t_s(k) + \alpha \theta_{e12}(k) \quad \dots\dots\dots (14)$$

その他の場合には、遅過ぎると判定し、式(12)を用い

表1 基本パラメータ

Arm length	$q=0.15 \text{ m}$
Arm mass	$m=2.5 \text{ kg}$
Control input	$0 \leq u \leq 64$
Maximum drive angle	90 deg
Supply pressure	$P_s=0.49 \text{ MPa}$
Sampling period	$T_s=1.3 \text{ ms}$

図5 空気圧ロボットアームの制御回路

て切換え時間を修正する。 θ_{ae} は適当に与える判定基準値である。

最後に、式(6)を用いて $k+1$ サイクルめの目標入力 $\theta_{r1}(k+1)$ を修正する。

5. 結果および考察

5.1 制御系の近似 図6において、 $C=1$ (比例ゲイン $K_p=1 \text{ deg}^{-1}$) として比例制御系を構成し、種々の目標入力に対してステップ応答を測定した結果を図8に示す。図中の近似曲線は次式において

$$\frac{\theta}{\theta_r} = \frac{\omega_n^2 e^{-Ls}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots (15)$$

$\zeta=0.55$, $\omega_n=11 \text{ rad/s}$, $L=0.078 \text{ s}$ とした場合のステップ応答の計算結果を示す。本実験で扱うロボットアーム制御系は2次遅れ要素とむだ時間要素の結合として表現できることがわかる。

5.2 シミュレーションによる考察 式(15)のモデルを用いて、シミュレーションにより学習効果について考察する。図9(a)は通常のプロポーション制御において、 $K_p=3 \text{ deg}^{-1}$, $\theta_r=40 \text{ deg}$ とした場合の応答である。図

9(b)は図9(a)の応答より θ_{p1} , t_{p1} を求め、これらに基づいて2章で示したポジカスト制御を実施した結果である。ここでは、パラメータ変動の影響をみるため、 $L=0.1 \text{ s}$ に増加させている。パラメータ変動によりポジカスト制御の機能が低下して振動的な応答となる。

図8 ロボットアーム駆動系の特性

図6 基本制御系

図7 学習ポジカスト制御法のアルゴリズム

(a) 比例制御

(b) ポジカスト制御

図9 ポジカスト制御におけるパラメータ変動の影響

(a) 3サイクルめ

(b) 4サイクルめ

図10 学習ポジカスト制御の効果 ($\alpha=0.005 \text{ s/deg}$)

これに対して、図10は図7の制御アルゴリズムを用いた場合の結果である。4サイクルめには、振動はほとんど消滅している。パラメータ変動に対する学習制御の効果は顕著である。

5.3 実験による考察

(1) 過渡応答 図11(a)は、通常のPI制御において、 $\theta_r=40\text{ deg}$ および 0 deg に対してオーバーシュートがなくできるだけ良好な応答が得られるように

ゲイン調整した場合の結果である。制御則は次式とし、

$$u = \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) e \quad \dots\dots\dots (16\cdot a)$$

$$e = \theta_r - \theta \quad \dots\dots\dots (16\cdot b)$$

$K_p=0.93\text{ deg}^{-1}$, $K_I=0.171/(\text{deg}\cdot\text{s})$ である。かなり良好な応答が得られるが、このような応答を得るためのゲイン調整にかなりの手間を要する。

(a) PI制御

(b) 学習ポジカスト制御 (θ_{oe} の考慮なし)

(c) 学習ポジカスト制御 (θ_{oe} の考慮あり)

図11 PI制御と学習ポジカスト制御の比較

(a) PI制御

(b) 学習ポジカスト制御

図12 負荷質量変化の影響

(a) PI制御

(b) 学習ポジカスト制御

図13 位置決め誤差

(a) PI制御

(b) 学習ポジカスト制御

図14 整定時間

図 11 (b) と (c) は $K_p=3 \text{ deg}^{-1}$, $\epsilon=0.05 \theta_r$, $\theta_{ae}=1.1 \theta_r$, $\alpha=0.005 \text{ s/deg}$ とした場合の学習ポジカスト制御による結果である。制御則は次式の比例制御とした。

$$u = K_p e \dots\dots\dots (17)$$

1 サイクルめは単一ステップ入力を加えたときの応答であり、ピーク値 θ_{p1} とピーク時間 t_{p1} を測定する。2 サイクルめは、測定した θ_{p1} を用いて目標入力 θ_{r1} , θ_{r2} を求め、さらに、 $t_s=t_{p1}$ とした通常のポジカスト制御による結果である。最適でない t_s と θ_{r1} を用いてポジカスト制御を実施したと考えられ、応答は振動的である。

3 サイクルめからは提案した学習アルゴリズムを用いて t_s および θ_{r1} を修正している。図 11 (b) は式 (13) の制限を考慮しない場合である。 $\theta_r=0 \text{ deg}$ の 2 サイクルめにおいて、 $\theta_{p1}>\theta_{p3}$ となり切換えが早過ぎると判定され、3 サイクルめの応答はより振動的になっている。これは前述したアクチュエータの摩擦の影響による判定ミスが原因と考えられる。これに対して、図 11 (c) においては、式 (13) を考慮した結果、良好な応答が得られている。

図 12 は 4 サイクルめに 1 kg の質量をアームの手先に付加した場合の結果を示す。図 12 (a) は図 11 (a) と同様な PI 制御による結果である。質量を付加することにより応答が振動的となっている。これに対して、図 12 (b) は $K_p=1.5 \text{ deg}^{-1}$ としたときの学習ポジカスト制御による結果である。質量が付加された直後は振動的となるが、学習の効果により数サイクル後には振動がほとんどない良好な応答が得られる。この結果は、本制御法がある程度のパラメータの変動に対応できることを示すものである。

(2) 位置決め性能 目標入力が増えられてから 2 秒後の偏差を位置決め誤差、応答が $\theta_{e12} \leq \epsilon$ の範囲内に収まるまでの時間を整定時間とする。図 13 は図 11 と同様の制御パラメータを用いて 25 回繰返し動作を実施した場合の位置決め誤差を示す。N は頻度である。PI 制御による位置決め誤差は $\pm 1 \text{ deg}$ 内において大きいばらつきを有する。これはコントローラが低ゲインであるため、摩擦力の影響が大きく現れるためであると考えられる。これに対して、学習ポジカスト制御による位置決め誤差は $\pm 0.4 \text{ deg}$ 内に収まり、PI 制御に比べて制御精度が向上する。これは、PI 制御に比べて高ゲインな制御を実現できるためである。

図 14 は整定時間を示す。学習ポジカスト制御による整定時間は PI 制御に比べて約 0.1 s 短く、高速な位置決めが実現できる。

6. 結 言

空気圧ロボットの高速度位置決め制御を実現するために、ポジカスト制御法を応用した。空気圧系は低剛性のためパラメータ変動や摩擦力の影響が大きく、ポジカスト制御において重要な目標入力の高さと切換え時間を理論的に定めることは容易でない。そこで、制御対象の特性にこれらのパラメータを適応させるための学習機能を従来のポジカスト制御法に付加した。本制御法によれば、高ゲイン制御が可能であるため、高速、高精度の位置決めが可能である。また、制御対象の特性を正確に知る必要がなく、パラメータ変動にも対応できることをシミュレーションおよび実験を通して確認した。本制御法はロボットの高速度位置決め制御に有効である。

付 録

任意の t_s において目標入力 θ_{r1} に θ_{r2} を加えたときのステップ応答 $\theta(t)$ は次のように表される。

$$\theta(t) = \theta_1(t) + \theta_2(t - t_s) \dots\dots\dots (18)$$

ステップ応答のピーク値を求めるために、 $\theta(t)$ を微分する。

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{\theta_r e^{-\zeta \omega_n t}}{K} H = 0 \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

$$N = \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

$$K = \sqrt{1 - \zeta^2} (1 + e^{-N\pi})$$

$$H = H_1 \{ H_2 \sin(\omega_d t - \omega_d t_s) + \sin(\omega_d t) \}$$

$$H_1 = \sqrt{\omega_d^2 + (\zeta \omega_n)^2}$$

$$H_2 = e^{-N(\pi - \omega_d t_s)}$$

ピークが生じる時刻 t_p は $H=0$ により

$$t_p = \frac{n\pi + Q}{\omega_d} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (20)$$

ここで

$$Q = \tan^{-1} \left\{ \frac{H_2 \sin(\omega_d t_s)}{H_2 \cos(\omega_d t_s) + 1} \right\}$$

式 (20) を式 (18) に代入すれば、ピーク値は次式となる。

$$\theta_p = \theta_r - (-1)^n H_3 e^{-N(n\pi + Q)} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (21)$$

ここで

$$H_3 = \frac{N}{\zeta} \{ \theta_{r1} \sin(\phi + Q) + \theta_{r2} e^{\zeta \omega_n t_s} \sin(\phi + Q - \omega_d t_s) \}$$

(1) 目標入力の切換えが早過ぎる場合 ($0 < t_s < t_p$)

式 (21) より $n=1$ と $n=3$ の場合におけるピーク値をそれぞれ θ_{p1}, θ_{p3} とすれば,

$$\theta_{p1} - \theta_{p3} = H_3 e^{-Nq} \{e^{-N\pi} - e^{-3N\pi}\} \geq 0 \quad \dots\dots\dots (22)$$

(2) 目標入力の切換えが遅過ぎる場合 ($t_p < t_s$)

θ_{r1} を加えたときの応答の最初ピーク値は θ_r に等しい。また、式 (21) で $n=3$ とすれば θ_{p3} が求められる。

$$\theta_{p1} - \theta_{p3} = -H_3 e^{-N(3\pi+q)} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

文 献

- (1) 則次・和田, 石田, 計測自動制御学会論文集, 25-2(1989), 200.
- (2) 松浦・梅田, 日本ロボット学会誌, 9-6(1991), 700.
- (3) G. G. Gorbatenko, *Control Eng.*, (1965), 74.
- (4) 則次・和田, 小原, 計測自動制御学会論文集, 28-5(1992), 587.
- (5) 則次・和田, 計測自動制御学会論文集, 23-3(1987), 253.