

空気圧モータを用いた高速位置決め制御

堂田周治郎・松下 尚史・渡辺 雄己*

岡山理科大学工学部機械工学科

*岡山理科大学大学院工学研究科

(1991年9月30日 受理)

1. 緒 言

流体アクチュエータの一種である空気圧モータは小型軽量で比較的大きな出力が得られるが、空気の圧縮性や電空制御弁に介在する無視できない動作遅れ¹⁾などの原因により制御性は電気式、油圧式に比べ最も劣るといふ欠点がある。したがって、空気圧モータの使用はこれまでオンオフ制御等の単純な作業に限られていた。しかし、空気圧モータは、電気モータに比べ起動や停止時の衝撃が小さく間欠運転に適している、過負荷時の危険性が少ない、油圧モータに比べ清潔である、空気圧シリンダに比べ閉じ込み空気容積が小さいので圧縮性の影響が小さいなど多くの利点を持っている。これらの利点を生かすためにも空気圧モータの制御性を高め、電気モータのように複雑かつ高精度な制御系での使用を検討する必要がある。著者らは、これまで2重倒立振子の安定化制御および振り上げ制御を高精度な制御系の一例と見なし、これらの制御を空気圧モータを用いて実現することを目的とした実験を行い、電空制御弁の動作遅れや機械システムに存在する非線形摩擦を補償することにより電気モータと同じ様な良好な制御結果を得ている^{2),3)}。

本研究では、空気圧モータの小型軽量・耐衝撃性に着目して、高速位置決め制御系への適用について検討する。空気圧シリンダを用いた高速あるいは高精度位置決め制御に関する研究^{4),5)}はこれまでにかなり報告されているが、空気圧モータを用いた1 m以上の長距離高速位置決め制御に関する研究はほとんどない。本論文では、まずベーン型あるいはラジアルピストン型空気圧モータ、電空制御弁、台車、プーリ・ベルト、パーソナルコンピュータなどから成る台車の位置決め制御システムを試作する。そして、比較的簡単な制御アルゴリズムをもつポジカスト制御則^{6),7)}やPID制御則を用いて実時間制御を行い、制御則やモータ種類の違いが制御性能に及ぼす影響を明らかにする。最後に、現在、高速と考えられる平均位置決め速度2 m/sを越える高速制御を試みる。

2. 位置決め制御システム

Fig. 1に本研究で使用する位置決め制御システムの概略を示す。制御系はベーン型空気圧モータ（太陽鉄工製：TAV1R-20 最大出力時のトルク0.56 N・m, 回転数2,250 rpm,

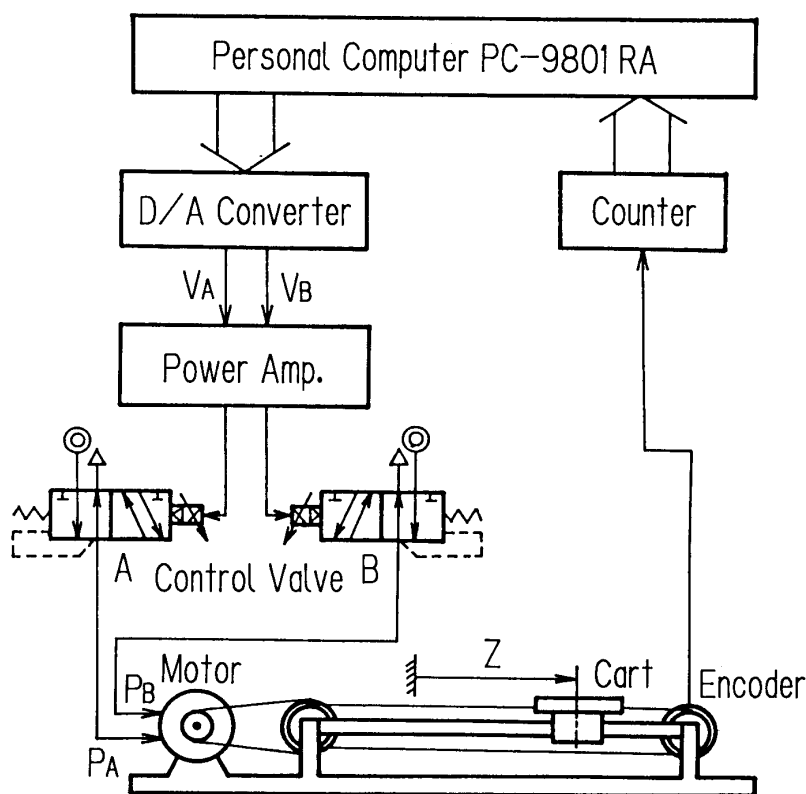


Fig. 1 Control system of a cart positioning

以下ベーン型モータと呼ぶ)あるいはラジアルピストン型空気圧モータ(太陽鉄工製:TAM4-010 最大出力時のトルク $0.637 \text{ N}\cdot\text{m}$, 回転数 $1,100 \text{ rpm}$, 以下ピストン型モータと呼ぶ), A, B 2つの5ポート電空制御弁(SMC製:VER2000)および長さ 1.8 m の2本の平行丸棒レール上を走行する台車(質量 約 1.5 kg)から構成される。台車の変位はロータリエンコーダ(オムロン製:E6B-CWZ)および24ビットカウンタ(CONTEC製:CNT24-4(98))を用いて検出され, パーソナルコンピュータ(NEC製:PC-9801RA)へ入力される。それに基づいて最適な制御入力電圧が計算され, D/A変換器(I・Oデータ機器製:PIO-9035)を介して弁駆動回路(SMC製:VEA250)へ送られる。そして, 電空制御弁より入力電圧に比例した圧力の圧縮空気がモータのA, B両ポートに供給され, 台車の位置が制御される。なお, 台車の位置検出分解能はカウンタを含めて 0.08 mm である。

3. 制御方法と性能評価

高速位置決め制御の方法として, 最短時間制御を含めいくつかの方法が考えられるが, 本研究では比較的簡単な制御アルゴリズムをもつPID制御法とポジカスト制御法を用いることにする。なお, Bang-Bang制御等の最短時間制御法も現在試みており, これを用いた位置決め制御が実現すれば, 平均位置決め速度で 25% 程度の向上が期待できる⁹⁾が, 電空制御弁の動作遅れやモータ摺動部の非線形摩擦の存在により停止位置精度がきわめて悪く,

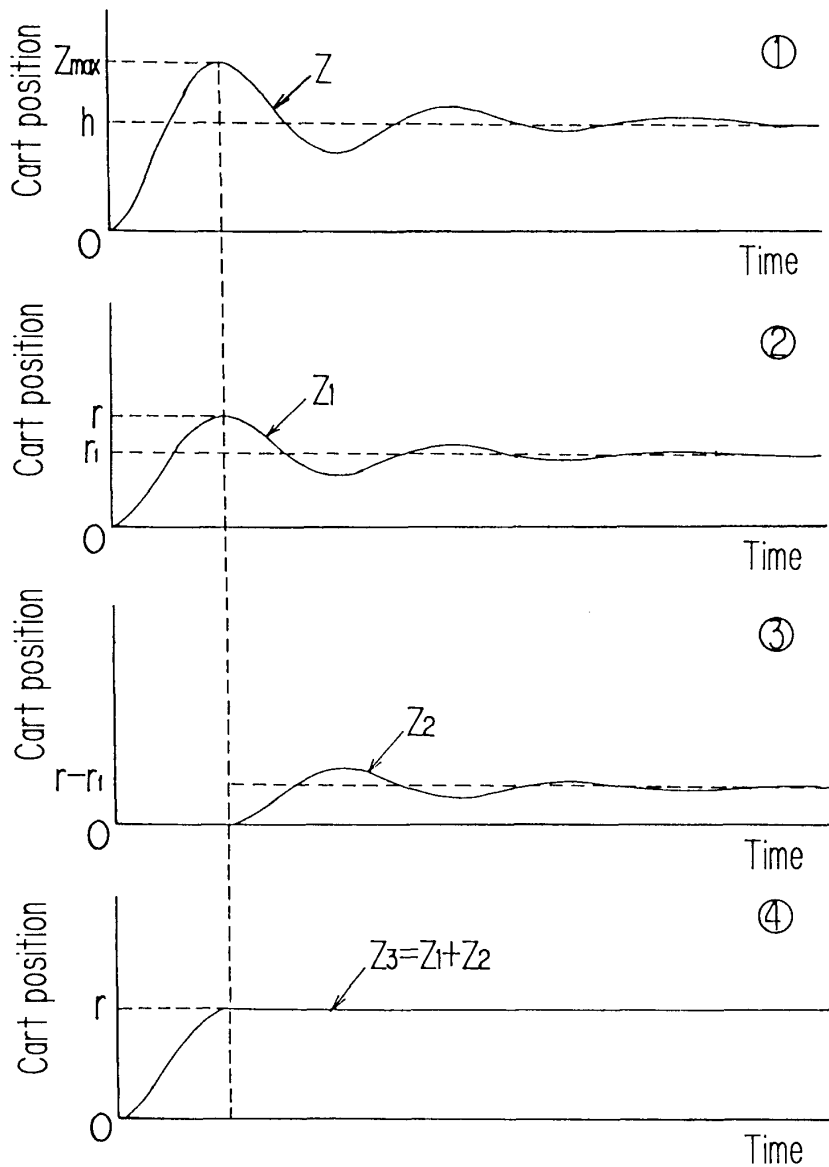


Fig. 2 Principle of posicast control

制御弁の動作遅れや非線形摩擦を考慮した制御法を工夫する必要がある。ここでは、ポジカスト制御の原理^{6,7)}や本研究で用いた性能評価基準について述べる。

ポジカスト制御は1950年代に Calvert が創始し、Smith が命名した制御法であり⁷⁾、制御系が純粋な2次振動系であれば目標入力のステップ高さと切り換え時間を適切に設定することにより行き過ぎがない速応性に優れた有限時間整定応答が実現できる。

制御対象の伝達関数 $G(s)$ が次式で表される2次振動系について考える。

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

ここで、 Z は出力 (例えば台車の変位)、 U は入力 (例えば制御弁駆動回路への電圧)、 $\zeta (0 < \zeta < 1)$ は減衰係数、 ω_n は固有角周波数である。

この系に初期状態 $t = 0$ において大きさ h のステップ入力 $U(s) = h/s$ を加えると、その応答は Fig. 2 の①のようになり、次式で表される。

$$z = h \left\{ 1 - \frac{\exp(-\zeta\omega_n t)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \phi) \right\}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$$
(2)

この応答の最大振れ z_{max} は(2)式において $dz/dt = 0$ 、すなわち $t = \pi/\omega_d$ のとき起こり、次式で表される。

$$z_{max} = h \left\{ 1 + \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \right\}$$
(3)

理想的な線形系においては最大振れの起こる時間および目標値に対する最大振れの割合は目標値によらず一定である。

さて、目標値を r として、 z を 0 から r にするポジカスト制御を考える。まず、制御系に $t = 0$ において大きさ $r_1 = r \cdot h/z_{max}$ のステップ入力を加える。この入力に対する応答 z_1 は、

$$z_1 = r_1 \left\{ 1 - \frac{\exp(-\zeta\omega_n t)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \phi) \right\}$$
(4)

となる。この応答の最大振れ z_{1max} は、

$$z_{1max} = r_1 \{ 1 + \exp(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}) \}$$

$$= r$$
(5)

となり r に等しくなり、Fig. 2 の②に示すように応答 z の場合と同時刻に起る。

応答 z_1 が最大振れ z_{1max} に達する瞬間に、大きさ $r - r_1$ の第 2 のステップ入力を第 1 のステップ入力に加える。第 2 の入力に対する応答 z_2 は

$$z_2 = (r - r_1) \left\{ 1 - \frac{\exp(-\zeta\omega_n(t - \pi/\omega_d))}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\left(\omega_d\left(t - \frac{\pi}{\omega_d}\right) + \phi\right) \right\}$$
(6)

となる。ただし、 $t \geq \pi/\omega_d$ である。これは Fig. 2 の③に示すように応答 z_1 よりも半周期遅れることになるので応答 z_1 と応答 z_2 の振動は互いに相殺される。したがって、全応答 $z_3 = z_1 + z_2$ は、(4)~(6)式より $z_1 + z_2 = r$ となる。このことは、Fig. 2 の④に示すように $t \geq \pi/\omega_d$ において目標のレベル r を保持することを意味している。

また、本空気圧制御システムのように、制御系に動作遅れ(むだ時間 L) が存在しても、

応答が全体に時間 L 遅れるだけであり、第2のステップ入力を加える時刻は変わらない。ここにもポジカスト制御の利点がある。

高速位置決め制御の制御性能を評価する何らかの基準を設ける必要がある。本研究では速応性の評価基準として整定時間（台車位置が目標位置の $\pm 1.2\%$ 以内に入るまでの時間）を、定常特性の評価基準として定常偏差（制御開始から5秒後の台車位置と目標位置との差）を用いることにする。

4. 実験結果および考察

4.1 制御方法が制御性能に及ぼす影響

ベーン型モータを使用し、サンプリング時間を0.004 s、目標値を0.8 mとした時のPID制御とポジカスト制御の実験結果を比較する。

Fig. 3にPID制御法を用いたときの台車の変位、速度および入力電圧の時間変化を示す。比例ゲイン $K_P = 1.50$ v/m、積分ゲイン $K_I = 5.00 \times 10^{-5}$ v/m、微分ゲイン $K_D = 4.50 \times 10$ v/mである。これらのゲインは台車変位が行き過ぎ量なしに、すみやかに目標位置に整定するように試行錯誤的に決定した。このゲイン調整は比例ゲインを重点的に40~50回程程度の試行で得られた。台車変位の応答波形に注目すると、すみやかに目標値に整定していることがわかる。また入力電圧は飽和状態からゆっくり低下した後、モータを反転させる負の電圧をわずかに発生し、台車が目標位置に到達する直前に初期電圧に落ち着いている。なお、このときの台車の整定時間は0.81 sであった。

Fig. 4はポジカスト制御法を用いたときの台車の変位、速度および入力電圧である。比例ゲイン K_p は試行錯誤により3.78 v/mとした。ポジカスト制御の場合もPID制御の場合と同様に台車がすみやかに目標位置に整定している。しかしポジカスト制御における入力電圧の時間的変化に注目すると、PID制御の場合とはあきらかに異なっている。すなわち、飽和状態から低下し、そのままの変化率でモータを反転させる電圧がかかる。台車が

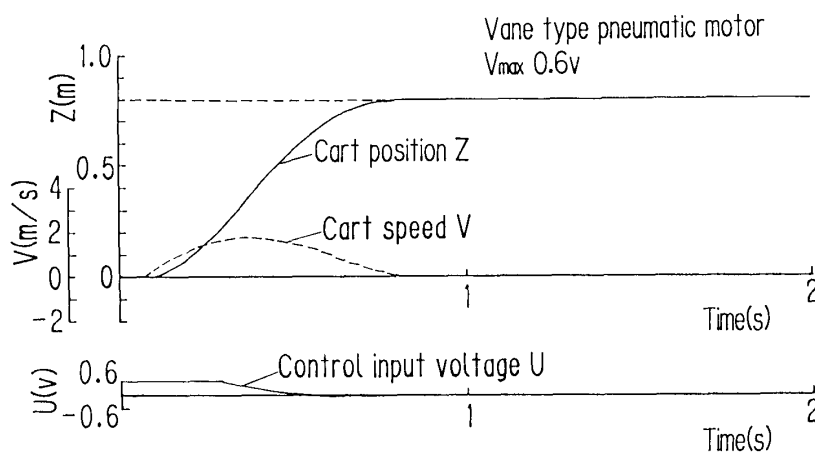


Fig. 3 Transient response of a cart position, speed and input voltage using PID control scheme

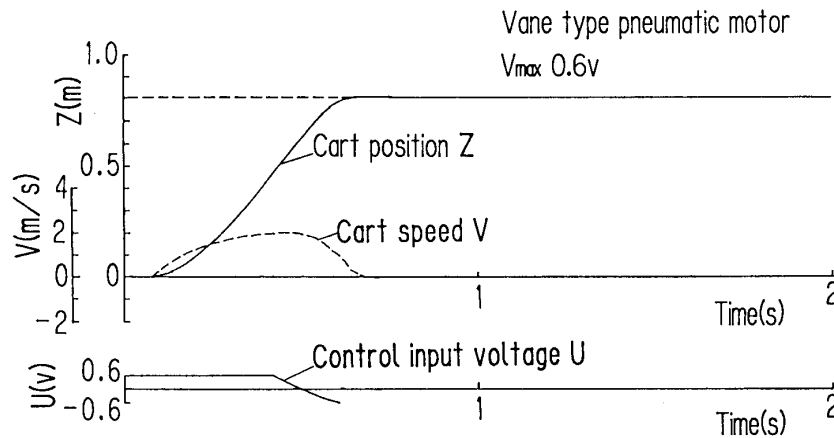


Fig. 4 Transient response of a cart position, speed and input voltage using posicast control scheme

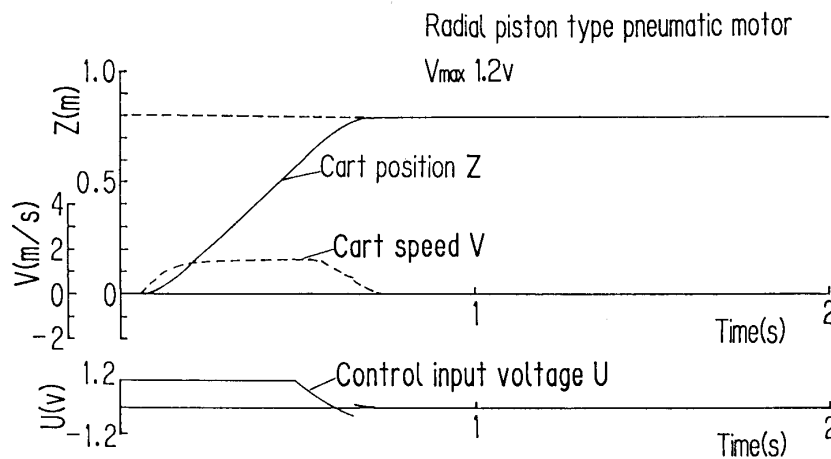


Fig. 5 Transient response of a cart position, speed and input voltage with a radial piston motor

目標位置に到達する直前になると突然、初期電圧に切り換わる。したがってポジカスト制御の場合、台車が目標位置に到達する少し前に最大速度に達しており、そこから急激な減速をしている。このときの台車の整定時間は0.64 sであった。

以上の実験結果から、整定時間について比較するとポジカスト制御の方が短く、速応性に優れていることがわかる。したがって高速位置決め制御にはポジカスト制御の方が適していると考えられる。以下の実験はすべてポジカスト制御法を用いて行った。

4.2 モータの種類が制御性能に及ぼす影響

ベーン型とピストン型の種類の違う空気圧モータが制御性能に及ぼす影響について述べる。Fig. 5にピストン型モータを用いてポジカスト制御法により位置決め制御を行った場合の台車の変位、速度および入力電圧の時間変化を示す。比例ゲイン K_p は台車変位の応答が適度に行き過ぎ量を持つように選んだ。最大入力電圧幅 V_{max} は最大速度が Fig. 4のベーン型モータのものと等しくなるように選んだ。Fig. 5を見るとピストン型もベーン型の場合と同様に台車がすみやかに目標位置に整定している。また台車速度の応答波形をみる

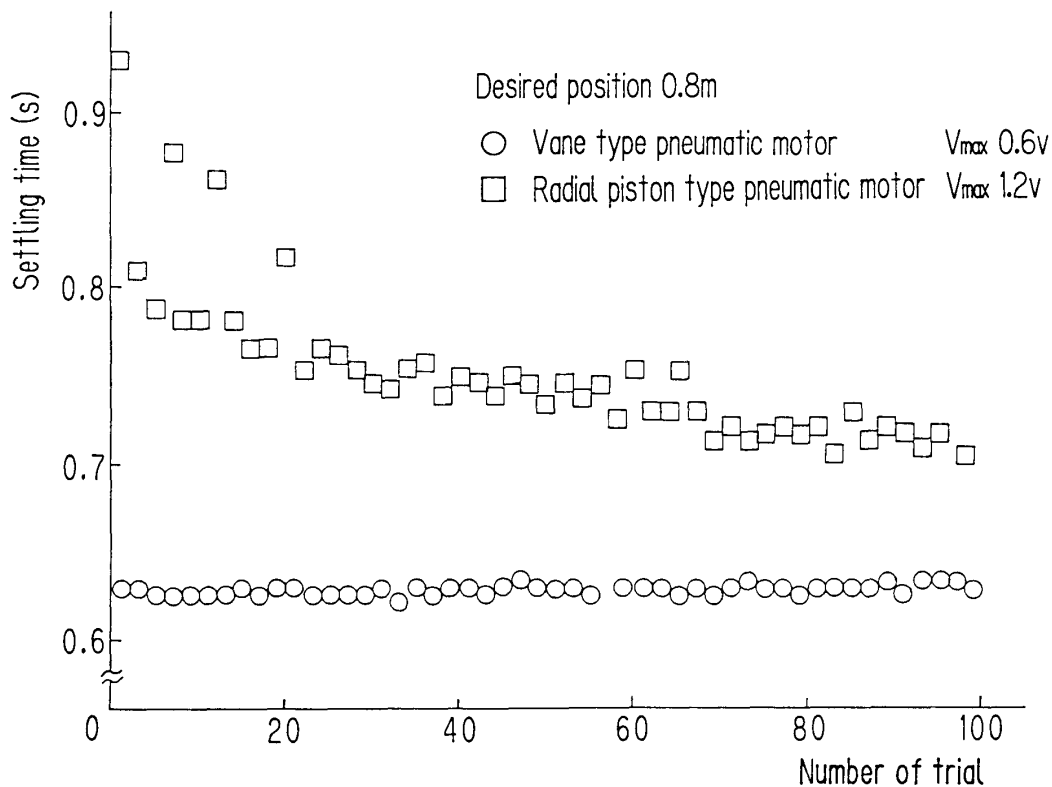


Fig. 6 Variations in settling time for two kinds of pneumatic motor

とベーン型の方はゆるやかに速度が増し、台車が目標位置に到達する少し前に最大速度に達しているが、ピストン型の方は速度の立ち上がりが速く台車が動き始めると直ちに一定の速度になる。これはピストン型モータの方が構造上、起動トルクが大きいためである。ここで、整定時間に注目すると、ピストン型の場合0.71 sであり、Fig. 4のベーン型モータの0.64 sに比べやや長い。

Fig. 6に目標値0.8 mに対して位置決め制御実験を100回繰り返したときの整定時間の変化を示す。これを見ると、ピストン型モータでは試行回数の増加にともない整定時間が短くなっているが、ベーン型モータにおいては試行回数に関わらず整定時間はほぼ一定で、全般にわたってピストン型よりも速く整定している。ピストン型モータの場合、試行回数の増加とともに整定時間が短くなるのは、ピストン摺動部の潤滑油温度が上昇し、摺動部の粘性摩擦が小さくなるためと考えられる。

以上のことから、ピストン型モータよりベーン型モータを用いる方が、整定時間も短く温度変化にも影響されにくい良好な高速位置決め制御が達成できることがわかる。

4.3 停止位置精度

前節までの実験および考察は位置決め制御の速応性に関するものであったが、本節では停止位置精度に注目する。Fig. 7はPID制御法を用いて目標値0.8 mに対する位置決め制御を100回繰り返したときの定常偏差のヒストグラムである。これを見ると、定常位置偏差は+1 ~ +3 mmの範囲でばらつくことがわかる。このときの平均定常偏差は+1.89 mm

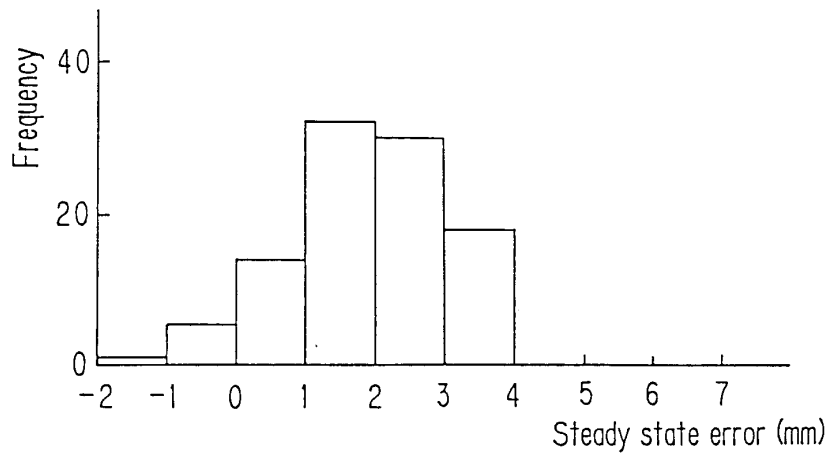


Fig. 7 Positioning accuracy of PID control

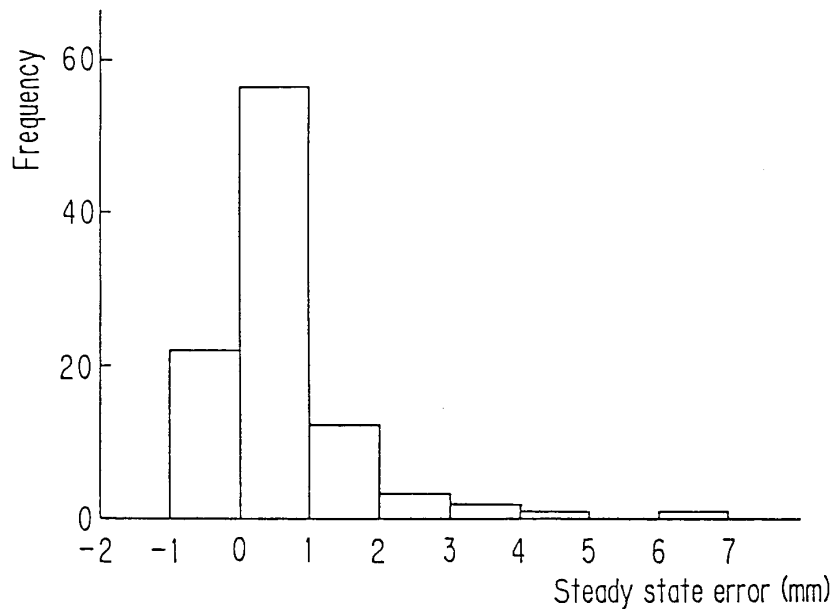


Fig. 8 Positioning accuracy of posicast control

であり、位置決め精度は良いとは言えない。

Fig. 8はポジカスト制御法を用いたときの定常偏差のヒストグラムである。この場合、定常偏差は、+6～+7 mmの範囲でばらついているが、ほとんどのデータは0～+1 mmの間にある。このときの平均定常偏差は0.68 mmであった。このように、停止位置精度においてもポジカスト制御の方が優れていることがわかる。

4.4 多点位置決め制御および高速制御

実際に物を搬送し位置決めを行う場合、目標位置は一定ではない。そこで、目標値が変化する多点位置決め制御について考察する。

ベーン型モータおよびポジカスト制御法を用いた場合の多点位置決め制御結果を Fig. 9に示す。ポジカスト制御において、制御入力に飽和がある非線形な場合、あらかじめ目標

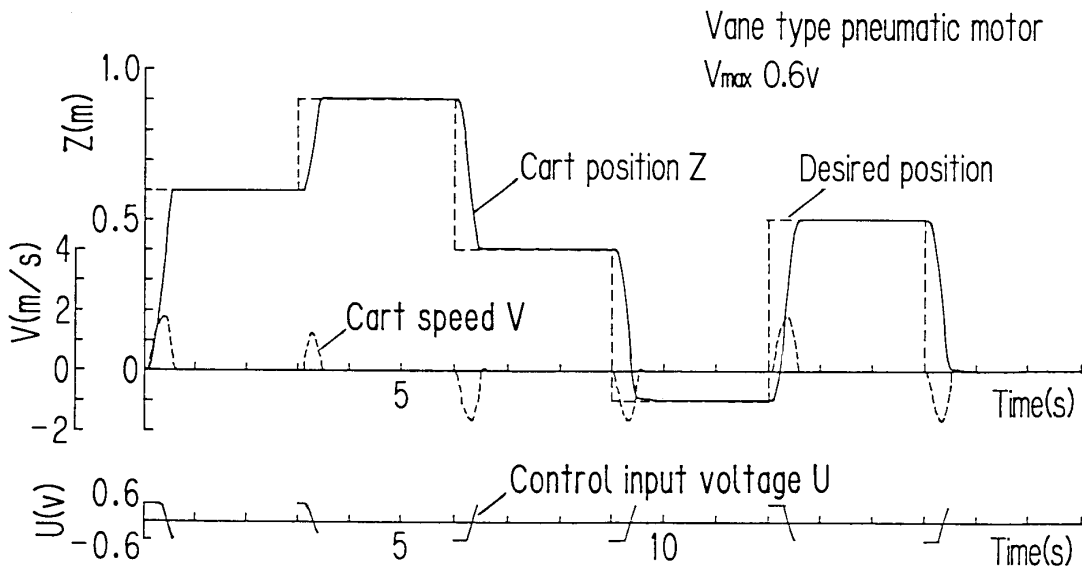


Fig. 9 Repeated positioning using posicast control scheme

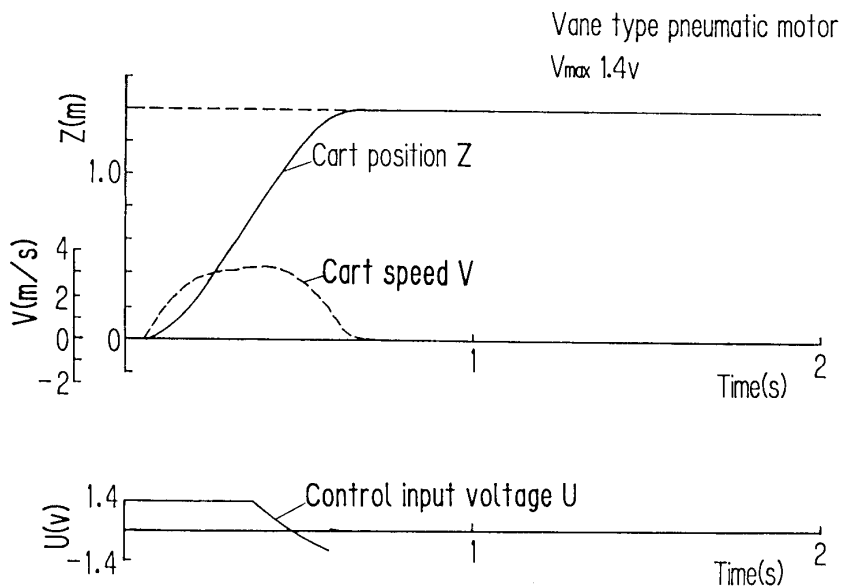


Fig. 10 Posicast position control with the average positioning speed of 2.3 m/s

値に対する最大振れを調べておく必要がある。Fig. 9では最大入力電圧幅 $V_{max} = 0.6$ v, 比例ゲイン $K_P = 3.78$ v/m としたときの目標値と最大振れの間を比例制御実験により求め、その関係を用いている。目標位置は $-0.1 \sim +0.9$ m の範囲で変えているが、どの目標値に対しても良好な位置決め制御が実現していることがわかる。

最後に、本制御システムを用いて平均位置決め速度 2 m/s 以上の高速位置決め制御ができることを示す。最大入力電圧幅および目標位置を大きくして位置決め制御実験を行った。Fig. 10にその結果である台車の変位、速度および入力電圧の時間変化を示す。最大入力電圧幅 $V_{max} = 1.4$ v, 比例ゲイン $K_P = 3.78$ v/m とした。目標位置 1.4 m に対して最大速

度3.27 m/s, 平均位置決め速度2.30 m/s, 整定時間0.6 s となり, 台車変位の応答波形も行き過ぎのない理想的なものであることがわかる。したがって, 当初の目的であった平均位置決め速度 2 m/s 以上の高速位置決め制御を実現することができた。

5. 結 言

ベーン型およびラジアルピストン型空気圧モータを用いて台車の高速位置決め制御を試みた。整定時間や定常偏差など制御性能に及ぼす制御方法やモータ種類の影響について調べた結果, 以下のことがわかった。

ポジカスト制御法は PID 制御法に比べ, より高速な位置決め制御が可能である。ベーン型モータはラジアルピストン型モータに比べ, 油潤滑部面積が小さく周囲温度の影響を受けにくいので, 良好な位置決め制御が実現できる。そして, ベーン型モータを用い, ポジカスト制御法による多点位置決め制御を行った結果, 追従性に優れた応答が得られた。さらに, 本制御システムは, 目標位置1.4 m に対して0.6秒の整定時間が得られ, 当初の目標であった平均速度 2 m/s 以上の高速位置決め制御を実現することができた。

最後に, 本実験に協力された本学卒業生の古市邦高氏 (現在, (株)日本電気ホームエレクトロニクスに勤務), ならびに本学学生の桑田義昭君に対し厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 則次俊郎, 和田 力, 伴野順一: 電空制御弁の動作遅れを考慮した空気圧サーボ系の最適制御, 計測自動制御学会論文集, 24-5, pp. 490-497 (1988)
- 2) 堂田周治郎, 東海正明: パーソナルコンピュータを用いた2重倒立振子の安定化制御, 岡山理科大学紀要, 24-A, pp. 307-330 (1989)
- 3) 堂田周治郎, 則次俊郎, 和田 力: 空気圧モータを用いた2重倒立振子の安定化制御, 平成元年秋季油空圧講演会講演論文集, 1, pp. 1-4 (1989)
- 4) 宮田慶一郎, 花房秀郎: 圧力制御を主体にした空気圧シリンダの速度制御, 計測自動制御学会論文集, 26-7, pp. 773-779 (1990)
- 5) J. E. Bobrow, F. Jabbari: Adaptive Pneumatic Force Actuation and Position Control, Trans. ASME, Journal of DSMC, 113-2, pp. 267-272 (1991)
- 6) G. G. Gorbatenko: Posicast Control by Delayed Gain, Control Engineering, February, pp. 74-77 (1965)
- 7) 高橋安人, 北森俊行: 制御と力学系, コロナ社, pp. 150-152 (1977)
- 8) 立石明生, 堂田周治郎, 松下尚史: ベーン型空気圧モータを用いた高速位置決め制御, 日本機械学会講演論文集, 915-1, pp. 405-406 (1991)
- 9) T. Noritsugu, H. Kobara and T. Wada: Posicast Control of a Pneumatic Servo System with Learning, FLUCOME' 91, 3rd Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, San Francisco, pp. 269-274 (1991)

High Speed Positioning Using Pneumatic Motors

Shujiro DOHTA, Hisashi MATSUSHITA and Yuuki WATANABE*

Department of Mechanical Engineering,

**Graduate School of Engineering,*

Okayama University of Science,

1-1, Ridai-cho, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1991)

There has been little study on the control system with pneumatic motors although pneumatic motors have some advantages : they are smaller and safer during times of overload than electric motors, cleaner than hydraulic motors and they have less effect of air compressibility than pneumatic cylinders because of smaller gass volume.

The purpose of this study is to investigate whether pneumatic motors can be used in a high speed positioning. The pneumatic servo system tested in this study consists of a cart, a vane type or a radial piston type pneumatic motor, two electro-pneumatic proportional pressure control valves and a personal computer PC-9801RA. The results obtained can be summarized as follows.

Posicast control scheme can give higher speed positioning than PID control scheme. The vane type pneumatic motor is better for a position control because its characteristics is not affected by a temperature compared to the radial piston type. The settling time of 0.6 second was obtained when the posicast position control was tested for the desired position of 1.4 m with the vane type motor. Thus we attained our desired end ; the average positioning speed higher than 2 m/s.