電磁弁を用いた空気圧シリンダの 学習的位置決め制御*

松井 隆*¹, 石本 英司*²

LEARNING CONTROL FOR POSITIONING OF A PNEUMATIC CYLINDER DRIVEN BY A SOLENOID-OPERATED VALVE

Takashi MATSUI and Eiji ISHIMOTO

This paper describes a new method of position control of a pneumatic cylinder of which motions are simply repeated. A concept of time-optimal control and learning is introduced in the control method to realize high speed and a good transient response. The pneumatic system is basically composed of a pneumatic cylinder with a brake, a three-position solenoid-operated valve, a relay, a position sensor and a personal computer. Switching time of the valve is updated by learning after every repeated motion of the cylinder so that the piston rod has zero velocity at a desired position. Newton-Raphson's method and/or fuzzy reasoning are used as the learning methods. Experiments show that the learning is effective to make the cylinder motions converge to the desired steady ones and that the positioning accuracy of about 0.3 mm can be attained at the average velocity of the piston rod below about 1 m/s.

Key Words: Computer Control, Control Device, Mechatronics, Automatic Control, Pneumatic Cylinder, Learning, Fuzzy Reasoning, Positioning

1. ま え が き

空気圧シリンダの中間停止位置決めに関しては様々な制御方式が提案され実用化されている。それらはサーボ弁を用いるものとオンオフ電磁弁を用いるものに大別されるが、前者はフィードバック制御⁽¹⁾⁽²⁾であり、後者にはPWM方式⁽³⁾を用いたフィードバック制御とブレーキ機構を利用した開ループ制御がある。これらの方式を高速性の観点から比較した場合安定性の問題を生じない点で開ループ制御が有利である一方、制御精度の点で一般的には閉ループ制御が有利である。しかし単純な繰り返し動作をする場合には学習性を取り入れることによって開ループ制御の精度を補うことが可能である。実際、後藤⁽⁴⁾はブレーキ付き空気圧シリンダの位置決め制御をオンオフ電磁弁による開ループ方式で実現したことを報告している。しかしこの方法は高速動作中にブレーキをかけるためブレーキの耐久性の点で問題があり、また開ループ制御であるにもかかわらず状態の連続的かつ高速な検出を必要とす

る点で無駄もある。

本研究においては繰り返し動作をするブレーキ付き空気圧シリンダの位置決め最短時間制御と学習の概念を導入することによって開ループ制御で高速性と良好な過渡応答を実現することを目的としている。一般に空気圧シリンダ駆動系において弁、空気圧シリンダ、負荷質量系の動特性を考慮した系のモデルは高次系となりまた弁の流量特性などの非線形性も含まれるため厳密な最短時間制御を実現することは困難である。しかし終端状態として目標位置と目標点への到達時点における速度(=0)のみをとりそれ以後はブレーキによって状態を保持するものとして問題を単純化すれば、その場合の制御入力は一ピストンを加速および減速する区間をそれぞれ1つずつ持つBang-Bang形になると考えられる。そこでオンオフ電磁弁を用いることとし、弁切り換え時間を試行動作あるいは繰り返し動作の結果に基づく学習によって補正し位置決め制御を実現する方法を検討する。

* 平成元年10月15日 第67期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年3月15日。

*¹ 正員、静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。 *² 学生員、静岡大学大学院。

2. 学習による電磁弁切り換え時間の補正法

空気圧シリンダを3位置オープンセンタ形電磁弁で駆動するものとする。いま制御入力を弁印加電圧 E とみなし図1に示すような加速区間と減速区間を1つつもつ Bang-Bang形とする。ただし便宜的に $E = 24$ V でピストンロッドは前進し $E = -24$ V で後退するものとする。以下に加速、減速区間長 T_1, T_2 [以後、切り換え時間と呼ぶ] を反復動作または切り換え時間を一定微小量だけ変化させた試行動作に基づく学習により補正する方法について述べる。

図1 制御入力（電磁弁印加電圧）

2.1 ニュートン-ラフソン法を用いる方法

制御目的はある初期位置に静止するピストンロッドを目標位置 X_d に、しかも目標位置への到達時点で速度 $V_d = 0$ となるように移動させることである。いまロッド先端部の位置を x 、速度を v とし、終端状態の位置と速度の目標値 $X_d, V_d (= 0)$ からの偏差を $x = X - X_d, v = V - V_d$ で表せばこの問題は初期偏差 $x(0) = -X_d, v(0) = 0$ から終端偏差 $x_f = x(T_f) = 0, v_f = v(T_f) = 0$ に Bang-Bang 制御により移す問題である。終端の位置偏差 x_f 、速度偏差 v_f の値は切り換え時間 T_1, T_2 に依存するので x_f, v_f を T_1, T_2 の関数と見なした次式を満足する T_1, T_2 により電磁弁を切り換えれば上記の制御目的を達成できることになる。

$$x_f(T_1, T_2) = 0, \quad v_f(T_1, T_2) = 0 \quad (1)$$

いま x_f, v_f が T_1, T_2 に関し 1 階微分可能と仮定すれば、ニュートン-ラフソン法 [以後 N-R 法と呼ぶ] により式 (1) の解は次式の反復計算によって求められる。

$$[T_1^{k+1}, T_2^{k+1}]^T = [T_1^k, T_2^k]^T - D^k [x_f^k, v_f^k]^T \quad (2)$$

$$D^k = \begin{bmatrix} \partial x_f / \partial T_1 & \partial x_f / \partial T_2 \\ \partial v_f / \partial T_1 & \partial v_f / \partial T_2 \end{bmatrix}^{-1}$$

ここに上付き添字 k は数値計算の反復回数を表し、 T は転置を表す。しかし実際には x_f, v_f の関数形は与え

られていないので試行動作により T_1, T_2 の微小変化 $\Delta T_1, \Delta T_2$ に対する x_f, v_f の変化量 $\Delta x_f, \Delta v_f$ を求め D^k を次式で近似する。

$$D^k = \begin{bmatrix} \Delta x_f / \Delta T_1 & \Delta x_f / \Delta T_2 \\ \Delta v_f / \Delta T_1 & \Delta v_f / \Delta T_2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

式 (2), (3) を用いて切り換え時間の補正を行う。

2.2 ファジィ推論法を用いる方法

前項の N-R 法を用いた場合弁切り換え時間の初期近似値が収束値とかけ離れていると数値計算が発散あるいは振動的となり動作が収束しないことがある。このような事態を避けるため初期学習段階にファジィ推論法を用いて切り換え時間を推定し、ある収束基準を満足した後 N-R 法に切り換える方法を検討した。

ファジィ推論法を適用するに当たります図1の制御入力における加速、減速区間 T_1, T_2 の変化と終端偏差の変化との定性的な関係について考察する。図1の制御入力の意味は加速区間でロッドを目標点の方向に移動させ減速区間でロッド速度を零とすることである。加速区間がある程度の長さを持つ場合その区間の終点においてはロッドはほとんど一定速度となることを考慮すると減速区間長 T_2 は T_1 と独立に終端速度偏差 v_f が正のとき増大、負のとき減少させればよいと考えられる。一方加速区間 T_1 も基本的には終端位置偏差 x_f が正のとき減少、負のとき増大させればよいが、 T_2 の修正が位置偏差に影響をおよぼすのでこれを考慮して T_1 を補正した方がよい。そこで T_2 の変化量 ΔT_2 による x_f の変化を $v_f \Delta T_2 / 2$ 、即ち $t = T_1$ における速度 V_1 が直線的に変化し $t = T_1 + \Delta T_2$ で零となると仮定し、この間の移動量を加えた位置偏差の推測値 $\bar{x}_f$ 、即ち

$$\bar{x}_f^k = x_f^k + v_f^k \Delta T_2^k / 2 \quad (4)$$

に対して T_1 の補正量を決定する。以下においてはまず概略の設計動作条件として、目標変位 $X_d = 200$ mm、ピストン平均移動速度 $V_d = 50$ cm/s、負荷質量 $m = 2$ kg として基本的な推定規則 R1~R8 を試行錯誤的に決定し、その規則に基づいて切り換え時間の補正量 $\Delta T_1, \Delta T_2$ を柳下ら¹⁵⁾の方法を用いて推定した後、さらに実際の動作条件を考慮してその値を修正することとする。

上記の考察に基づき、まず T_2 を T_1 と独立に修正することとしその推定規則 R1~R4 を次のように定めた。

R1: if $v_f = NB$, then $\Delta T_2 = NB_2$

R2: if $v_f = NS$, then $\Delta T_2 = NS_2$

R3: if $v_f = PS$, then $\Delta T_2 = PS_2$

$$R_4: \text{if } v_1 = PB, \text{ then } \Delta T_2 = PB_2$$

ここにファジィ変数を表すNB, NS, PS, PBにおける文字は"N"=負, "P"=正, "B"=大, "S"=小を意味しており, 以後の変数についても同様とする. また添字1は v_1 に関する変数を表し添字2は ΔT_2 に関する変数を表す. また本実験に用いた各ファジィ変数のメンバーシップ関数の形を図2(a)に示す.

さてある初期近似値を与えてk回目の反復動作を終了したときの偏差が図2(a)中に示す v_1^k であったとすると上記の規則 $R_1 \sim R_4$ に基づき補正量 ΔT_2^k のファジィ集合のメンバーシップ関数 $\omega(\Delta T_2^k)$ を次式により求める.

$$\omega(\Delta T_2^k) = NB_2^* \cup NS_2^* \cup PS_2^* \cup PB_2^* \quad (5)$$

ここに*印を付したファジィ変数は*の付かない同名の変数に各規則のグレードを一樣に乗じたもので図2中に破線で示されている. 結局 $\omega(\Delta T_2^k)$ は図2(a)においてすべての規則について描かれる破線の稜線を連結したものとなる. 切り換え時間 T_2 の補正量 ΔT_2^k として $\omega(\Delta T_2^k)$ の重心[図中陰影部の図心]における値をとれば

$$\Delta T_2^k = \frac{\sum_1 \omega(\Delta T_{2,1}) \Delta T_{2,1}}{\sum_1 \omega(\Delta T_{2,1})} \quad (6)$$

となる.

次に加速区間 T_1 の補正量を式(4)の偏差の推定値 $\bar{x}_1^k$ に対して次の推定規則を適用して求める.

$$R_5: \text{if } \bar{x}_1 = NB, \text{ then } \Delta T_1 = PB_1$$

$$R_6: \text{if } \bar{x}_1 = NS, \text{ then } \Delta T_1 = PS_1$$

(a) ΔT_2^k の推定

(b) ΔT_1^k の推定

図2 規則 $R_1 \sim R_4$ に基づく推論過程

$$R_7: \text{if } \bar{x}_1 = PS, \text{ then } \Delta T_1 = NS_1$$

$$R_8: \text{if } \bar{x}_1 = PB, \text{ then } \Delta T_1 = NB_1$$

ここにファジィ変数に付した添字xは $\bar{x}_1$ に関する変数, 添字1は ΔT_1 に関する変数を示し, また各変数のメンバーシップ関数を図2(b)に示す. 上式の推定規則に基づき加速区間 T_1 の補正量 ΔT_1^k を前述の T_2 の場合と同様の手順で決定する.

次に上述の推定規則 $R_1 \sim R_8$ によって決定された切り換え時間の補正量 $\Delta T_1^k, \Delta T_2^k$ に設計動作条件と実際の動作条件との相違を考慮して修正係数 ξ_1 および ξ_2 あるいは ξ_3 をかけて切り換え時間を次式のごとく修正する.

$$\begin{aligned} T_1^{k+1} &= T_1^k + \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \Delta T_1^k \\ T_2^{k+1} &= T_2^k + \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \Delta T_2^k \end{aligned} \quad (7)$$

ここに修正係数 ξ_1, ξ_2, ξ_3 は次の規則 $R_9 \sim R_{11}$ に基づいて求める. 規則中に用いたファジィ変数のメンバーシップ関数および命題のグレード ω に対して ξ_1, ξ_2, ξ_3 を決定するための関数 $F(\omega), G_1(\omega), G_2(\omega)$ を図3(a), (b)に示した.

$$\begin{aligned} R_9: & \text{if } (V_1 = PB_1) \text{ or } \{ (X_1 = PS_1) \text{ and } (|x_1| = PS_1) \} \\ & \text{then } \xi_1 = F[PB_1(V_1) \vee (PS_1(X_1) \wedge PS_1(|x_1|))] \\ R_{10}: & \text{if } m = PB_m \text{ then } \xi_2 = G_1(PB_m(m)) \\ R_{11}: & \text{if } m = PB_m \text{ then } \xi_3 = G_2(PB_m(m)) \end{aligned}$$

ただし上記の規則中において例えば $PB_m(V_1)$ は PB_m における V_1 のメンバーシップ値 $\omega_{PB_m}(V_1)$ を表す. 規則 R_9 はロッドの平均移動速度 $[V_a = X(T_1)/T_1]$ が大きい場合あるいは目標変位 X_1 が小さくか

(a) 規則 R_9 による修正係数 ξ_1 の決定

(b) 規則 R_{10}, R_{11} による ξ_2, ξ_3 の決定

図3 実験条件による $\Delta T_1^k, \Delta T_2^k$ の修正

つ終端位置偏差が大きい場合に偏差が振動的になり易いことを考慮して切り換え時間の補正量を縮小するものであり規則 R_{10} と R_{11} は負荷質量が大きい場合に慣性による遅れを補償する意味を持つ。なお PBA に関するメンバーシップ関数は次式のごとく目標変位 X_d の関数とした。

$$\omega = (V_d - 0.2 \cdot X_d - 10) / 60, \quad V_d [\text{cm/s}], X_d [\text{mm}]$$

ただし $\omega < 0$ のとき $\omega = 0$, $\omega > 1$ のとき $\omega = 1$ とする。図 3 (a) には $X_d = 30 \text{ mm}$ の場合の推論過程を示した。

3. 実験装置と実験方法

実験装置の概略図を図 4 に示す。供試空気圧シリンダはブレーキ付単ロッド復動シリンダであり内径 30 mm 、ストローク 300 mm である。空気圧シリンダ駆動用電磁弁として 3 位置オープンセンタ形を用い、その弁オリフィスの有効断面積は 3 mm^2 である。ピストンロッド先端部をリニアウェイの摺動部に取り付けその上に負荷質量 m を固定する。シリンダの移動速度は速度制御弁により調節するが、常に両側がほぼ同じ絞り特性となるように留意した。空気圧シリンダの供給圧力は通常 $P_s = 0.395 \text{ MPa}$ とした。またピストン初期位置はロッドが完全に引込められた状態もしくは完全に伸長した状態とした。電磁弁はパソコンに接続されたタイマで切り換え時間を設定しリレーによって切り換えられる。空気圧シリンダに装備されたブレーキもブレーキ用電磁弁によって駆動されるがブレーキ信号を出力するタイミングは通常、終端時間 $[t = T_c]$ とし行き過ぎ量を減少させる対策等においてこのタイミングを調整した。終端速度偏差は $t = T_c$ で電磁弁の中立信号 $[E = 0]$ を出力した直後とそれから 9 ms 後の時点においてそれぞれ位置 X を検出し数値微分によって求め、終端位置偏差はブレーキが作動

してロッドが完全に停止した状態で検出した。N-R 法によって切り換え時間を補正する場合、加速、減速区間長を微小変化させた試行動作を行う必要があるが、その場合切り換え時間の変化を 6 ms とした。なお使用したパソコンは PC-9801 Vm2, A/D コンバータは 12 ビット、タイマの分解能は 0.1 ms であった。また位置検出器は Wiedmann 効果を応用した非接触変位センサであり 1.5 ms のサンプリング時間で検出動作をする。この検出器の静止中の分解能は 0.03 mm 以下であるが総合的な分解能は A/D コンバータの分解能に支配されて約 0.07 mm 程度となる。ただし運動中の位置検出精度はサンプリング動作による遅れのために速度に依存して低下する。

4. 実験結果と考察

まず学習法として 2 元 N-R 法 [式 (2)] を用いた実験を行ったがその場合、弁切り換え時間の初期値が収束値と大きく異なると動作が収束しないことがあった。そこで初期値設定ルーチンを制御プログラムの最初に置くことによりこのような事態を避けることができた。このルーチンは弁を開いてからロッドが目標変位に達するまでの時間の測定と、この値を簡単な経験式に代入して初期値を計算する部分からなる。

さて 2 元 N-R 法による学習を行った場合、初期段階には終端偏差の急減が見られたもののその後は学習回数が増しても $\pm 1 \text{ mm}$ 程度の位置決め精度しか得られなかった。この理由は終端速度を 9 ms 間隔の運動中の位置検出値の単純な数値微分によって求めているので誤差が大きいこと、また動作が収束するにつれて速度が小さくなり 2 点間の変位が減少し相対的な検出精度が低下するため切り換え時間の補正が不正確になるためと考えられる。一方位置偏差は完全に静止した状態で検出しているので検出誤差は生じにくく、また本制御法においてはブレーキを使用するので終端付近で多少の速度偏差を持ってあまり問題はない。そこで評価指数 J が経験的に定めた次の中間的収束基準

$$J = 0.04 |x_c| + |v_c| < 15, \quad x_c [\text{mm}], v_c [\text{cm/s}], \quad (8)$$

を満たすまでは 2 元 N-R 法による切り換え時間 T_c の補正によって位置と速度の偏差を減少させ、その後は速度偏差 $|v_c| = 0$ と近似して位置偏差のみを除去するために 1 元 N-R 法に基づく次式

$$T_c^{k+1} = T_c^k - x_c^k / a, \quad T_c^{k+1} = T_c^k \quad (9)$$

によって T_c のみを修正した。ここに a は T_c の変化に対する位置偏差 x_c の変化率であり実際には T_c を

図 4 実験装置概略図

図5 学習回数と終端偏差の関係

変化させた1回の試行動作から自動的にaの値を決定した。なお式(8)を満足するまでの過程を初期学習段階と呼ぶこととする。最終的には次の条件を満足した時点で動作が収束したものとみなした。

$$|x_f| < 0.2 \text{ mm}, \quad |v_f| < 5 \text{ cm/s} \quad (10)$$

ただし収束後も精度を維持するために式(9)による切り換え時間の補正は続行する。

図5は2つの負荷条件、即ち空気圧シリンダを水平設置し負荷質量の無い場合とシリンダを鉛直に設置し5.1 kgの負荷質量を付けた場合において、学習法を式(8)の基準によって2元N-R法から1元N-R法に切り換えた場合の結果を示している。この場合、2元N-R法のみを用いる場合に比べて位置決め精度は著しく向上し負荷条件が互いに異なる両場合にも±0.3 mm以下の精度が得られている。

次に本制御法を適用した場合の過渡応答について検討する。図6は終端偏差が十分低下した後の動作におけるステップ応答波形であり、負荷質量は $m = 5.1 \text{ kg}$ 、シリンダは水平設置でブレーキ信号を $t_f = T_f$ で出力した場合である。本研究における本来の制御方法は目標点で速度を零としその位置をブレーキで保持することであるため過渡応答は行き過ぎのない応答波形となるはずである。しかしながら図6(a)の応答波形には明らかに行き過ぎが生じている。ロッドの最大行き過ぎ時点で速度は零となるのでこの時点でブレーキが有効に作用しロッドを保持できれば行き過ぎは生じないが、実際にはブレーキ動作の遅れがありその間にシリンダ内の残留圧によってロッドが引き戻さ

図6 定常繰り返し動作中のステップ応答
(水平設置, $m = 5.1 \text{ kg}$)

れるため行き過ぎが生ずるものと考えられる。したがって行き過ぎをなくす、あるいは減少させるにはブレーキ信号を出すタイミングを早めればよいと推察される。そこでまずブレーキ動作の遅れを知るため、ロッドがある速度で移動中に電磁弁をオフとし同時にブレーキ信号を出力してからロッドが完全に停止するまでの時間を測定した。その結果ロッド移動速度がほとんど零の状態でも約28 msの遅れがありこの値は速度の増大に伴って漸増する傾向を示した。簡単のためにブレーキ動作の遅れを28 msで一定とした空気圧シリンダ駆動用の電磁弁の遅れ(約10 ms)を考慮してブレーキ信号の出力を18 msだけ早め図6(a)と同じ負荷条件下でステップ応答を記録した結果を図6(b)に示した。図に見るように行き過ぎ量が減少し良好な応答が得られていることがわかる。

次に弁切り換え時間の初期値を任意に与えた後の初期学習段階にファジィ推論を用いた場合について述べる。推定規則 $R_1 \sim R_8$ を用いて式(8)の条件を満たすまで学習させた後、式(9)の1元N-R法に切り換えて位置決め制御を実行した場合の第1回目の動作における終端偏差と式(10)の収束条件を満たす

図7 式(9)の収束基準を満たすまでのロッド往復回数 k_e と初期終端偏差との関係
(水平設置, 無負荷, $X_i = 100 \text{ mm}$)

(a) ロッド平均速度と精度の関係 (無負荷)

(b) ロッド平均速度と精度の関係 ($m = 5.1 \text{ kg}$) (c) 目標変位と精度の関係 (無負荷, $V_a < 90 \text{ cm/s}$)

図8 位置決め精度

までに要したロッド往復回数 k_e との関係を図7に示す。図中の各印は往復回数 k_e の範囲を表している。ファジィ推論法を用いることにより $N-R$ 法の場合と異なり収束値と全くかけ離れた T_1 , T_2 の初期値を与えても本実験の範囲内ではすべて動作は収束し、初期値設定のための試行動作は不要であり収束までのロッド往復回数も減少した。ただしファジィ推論のみによって1元 $N-R$ 法と同程度の位置決め精度を達成するためにはさらに綿密な修正規則の設定を要すると思われるが、初期学習段階にファジィ推論を用いる利点を確認された。

最後に位置決め精度の検討結果を示す。図8(a), (b)は空気圧シリンダを水平設置し目標変位 $X_d = 100 \text{ mm}$ とした場合のロッドの平均移動速度と位置決め精度との関係を示したものであり、(a)は無負荷の場合、(b)は負荷質量 $m = 5.1 \text{ kg}$ の場合である。ただし精度としては式(10)の収束条件を満足した後の20回の動作における位置偏差の正負の最大値間を線で結んで示してある。無負荷時の図(a)においては平均速度 $V_a < 100 \text{ cm/s}$ で $\pm 0.3 \text{ mm}$ の精度が得られている。一方図(b)の負荷質量 $m = 5.1 \text{ kg}$ を持つ場合には無負荷状態の場合に比べて精度の低下がみられるが、 $V_a < 70 \text{ cm/s}$ で $\pm 0.3 \text{ mm}$ の精度が得られていることがわかる。さらに図8(c)には目標変位の大きさと位置決め精度との関係を示したが、 5 mm 程度の小さな目標変位に対する制御も可能であることが確認され、また目標変位による精度の相違は小さいことがわかる。

本制御法は開ループ方式であるため到達可能な位置決め精度はロッドの移動速度が小さいうちは空気圧シリンダおよび負荷系の摩擦、弁動作、ブレーキ動作のバラツキに支配されると考えられる。しかしロッド速度が増大すると位置決め精度に対しこれらのバラツキの影響が増大し、さらに弁切り換え時間を設定するタイマの分解能による誤差も増大する。その結果、ロッドの平均速度の増大に伴って位置決め精度は悪化するものと考えられる。また負荷質量が増大すると静止状態から定常速度に達するまでの加速時間が長くなるため同じロッド平均速度に対して加速区間の終点 ($t = T_1$) における速度は負荷質量が大きいくほど大きくなり、その結果精度が低下するものと推察される。

5. あとがき

繰り返し動作をするブレーキ付き空気圧シリンダの位置決め単純化最短時間制御と学習の概念を導入して、オンオフ電磁弁を用いて開ループ方式で制御する方法を提案し制御実験を行った。

その結果、学習によって定常繰り返し動作に収束することが確認された。また初期段階に、ファジィ推論法を用いる学習法は学習動作回数が少く、弁切り換え時間の初期値設定ルーチンも不要であるなど2元 $N-R$ 法に比べ優れていることが示された。

位置決め精度は上記の初期学習段階の後、さらに位置偏差の除去を目的とした1元 $N-R$ 法に切り換えることによって向上した。本実験で得られた位置決め精度は無負荷時においてロッド平均速度 $V_a = 1 \text{ m/s}$ 以下で $\pm 0.3 \text{ mm}$ 、負荷質量 $m = 5.1 \text{ kg}$ を有する場合で $V_a = 70 \text{ cm/s}$ 以下で $\pm 0.3 \text{ mm}$ 程度であり、ロッド速度、負荷質量の増大によって低下する傾向を示した。

定常繰り返し動作におけるステップ応答には行き過ぎが見られたが、ブレーキ信号のタイミングを早めることによって行き過ぎ量の小さな良好な応答が得られることがわかった。本実験においてはブレーキ動作の遅れを一定としたが、実験条件によりこのタイミングを調整する方法を学習に組み入れることができれば行き過ぎの無い高速応答も可能になると思われる。

文 献

- (1)山藤・他2名, 機論, 53-487, C (1987), 757.
- (2)高木, 江崎, 機論, 50-489, C (1984), 2823.
- (3)則次, 花房, 油圧と空気圧, 14-7(1983), 505.
- (4)後藤, パワーデザイン, 26-3, (1988), 63.
- (5)柳下・他2名, システムと制御, 28-10, (1984), 597.