ヒステリシスフィードバックによる
位置決めサーボ系の有限整定補償[†]

中野道雄*・小口俊雄**・広松敬士**・古賀高志***

Finite Time Settling Compensation of Positioning Servo-System
Using Hysteresis Element[†]

Michio NAKANO*, Toshio OGUCHI**, Takashi HIROMATSU** and Takashi KOHA***

In a positioning servo-system, the ideal response can be obtained through Posicast control or Bang-bang velocity feed-back control. But the perfection of that response depend entirely upon stability of the magnitude of the input signal.

Then, in this work, a new control algorithm (we call hysteresis control) is proposed to eliminate the influence of the input signal.

In this algorithm, a velocity feedback through a hysteresis element is introduced in a servo system modeled by a "second order system" to accomplish the Posicast control principle without influence of the input signal.

Several simulations were carried out to evaluate the effectiveness of the hysteresis control in real positioning servo-systems, and the following points were noted:

—For servo-systems with higher order-lag system which can be approximated by a "second order-lag system with deadtime", it is also possible to accomplish the Posicast control principle without influence of the input signal (finite time settling response without oscillations is obtained).

—Even in systems with saturation features, it is possible to accomplish the Posicast control principle without influence of the input signal.

Finally, some experiments were done in a

servo-system control for DC servo-motor to confirm that the proposed method generates a simple control structure with good response features.

Key Words: time optimal control, hysteresis control, finite time settling compensation, servo control, learning design

1. はしき

ステップ状に変化する入力印加されるサーボ系において、行き過ぎがなくかつ速応性の優れた応答を得るために、種々の制御手法が提案されている。その一つに入力波形を操作し系の出力が極大をとる時点で目標値を切り替えることで有限時間整定応答を実現する制御手法があり、これがポジキャスト制御である。しかしながら、この方法は後に述べるようにフィードフォワード的な手段で入力波形を操作しており、実用上からは数々の制約をうけることになる。

これに対して、著者らはこれまでに、速度信号をバンバン要素を通して入力端にフィードバックすることによって、入力波形の切替えのタイミングを自動的に求めることを提案した¹⁾。更にシステムの伝達関数が未知であっても目標値が一定の場合、フィードバックパスのバンバン素子の高さに関する最適値は、試行を繰返すことで学習的に求められることを見出し実用化に向けての検討をすすめてきた²⁾。この結果、本制御手法は、一例として1個の入力パルスに対して常に一定角度の回転が対応するステッピングモータの制御に極めて有効であることを確認した³⁾。以上の結果をふまえ、本制御手法をさらに広く適用しようとする場合、なお残された問題点は、目標値の高さが変化する系においては変化に応じて、そのつどバンバン素子の

[†] 第26回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭62・7)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** いすゞ自動車(株) 川崎市川崎区殿町 3-25-1

*** 東洋電機製造(株) 東京都中央区八重洲 2-7-2

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

** ISUZU Motors Ltd., Kawasaki

*** Toyo-Electric Mfg. Co. Ltd., Chuuou-ku, Tokyo
(Received July 14, 1987)

(Revised November 18, 1987)

最適な高さを設定し直さなければならない点である。このプロセスは入力の高さを検出しこれに応じてシステムを調整することに相当し、フィードフォワード的な手法といえる。

ところが、今回、モータの最大速度が入力ステップの高さに関する情報をもつことに注目し、速度帰還パスにモータ速度の最大値を記憶させる特性をもたせ、これとバンバン素子のもつ機能とを組み合わせることによって、自動的に最適値が設定できることを見出した。さらにこの考え方の実用化にあたっては、速度帰還パスに簡単なヒステリシス要素を挿入するだけでよく、実現がきわめて容易であることもわかった。そこで以下本論文ではこの補償方式をヒステリシスフィードバック制御とよぶことにする。上記の考え方をシミュレーションとDCサーボモータを用いた位置制御系に応用した結果、優れた補償法であることを確認することができた。

2. バンバンフィードバック制御²⁾

Fig. 1 は特性根 r_0, r_0^* として

$$r_0, r_0^* = (-\gamma_0 \pm j)\omega_0 \quad (1)$$

をもつ2次の線形サーボ機構で、これに高さ R のステップ入力が入力されるようすを示している。この系の速度信号を高さ

$$R \exp(-\gamma_0 \pi) / (1 + \exp(-\gamma_0 \pi)) \quad (2)$$

のバンバン素子を通して入力端に帰還する場合を Fig. 2 に示す。このフィードバックにより高さ R の

Fig. 1 Second order system

Fig. 2 Bang-bang feedback compensation

Fig. 3 Control input wave form at point N in Fig. 2

Fig. 4 Optimal feedback value for the reference input

ステップ入力が入力された場合、Fig. 2 の点 N には等価的に Fig. 3 に示す波形が入力されることになる。すなわち

(a) モータ速度が正の区間 AB では、フィードバックにより(2)式の値が目標値 R より差し引かれるため、高さ

$$R / (1 + \exp(-\gamma_0 \pi)) \quad (3)$$

をもつ仮の目標値が入力され、

(b) モータ速度が零の時点 B において波形は本来の目標値 R に切り替わる、

という波形であり、このときポジカスト制御の原理により、制御量の位置に関しては時刻 t_B で有限時間整定応答が得られる。ここで t_B は Fig. 1 に示す補償前の系のステップ応答が最初に極値をとる時点で

$$t_B = \omega_0 / \pi \quad [\text{s}]$$

となり、モータ速度が零になる時点に注目することにより自動的に求められる。これに対して(2)式で与えられる最適フィードバック量 F_B にはステップの高さ R が含まれるため、 R の値に応じて F_B を Fig. 4 のように変化させなければならないことになる。

3. ヒステリシスフィードバック制御の原理

(1)式の特性根をもつ線形の2次サーボ系に高さ R のステップ入力が入力されたとき、最大速度 V_M はつぎのように与えられる。

$$V_M = R \omega_0 \exp(-\gamma_0 \tan^{-1}(1/\gamma_0)) \quad (4)$$

すなわち、(4)式よりシステムの定数に変化せず γ_0 と ω_0 が一定ならば最大速度 V_M と目標値の高さ R とは1対1の対応関係をもつことがわかる。これより Fig. 4 で示した最適フィードバック量 F_B と入力の高さ R との関係は、Fig. 5(a)に示すように最適フィードバック量 F_B と最大速度 V_M との関係に置き換えられることがわかる。

また、最大行き過ぎ量 Θ_M は

$$\Theta_M = R \exp(-\gamma_0 \pi) \quad (5)$$

で与えられるため、最大速度 V_M と最大行き過ぎ量 Θ_M との関係も、Fig. 5(b)のように一義的に与えら

れる。

工学的に見れば、Fig. 4 の関係を用いた場合、変化した目標値の高さ R を検出して、これに基づいてバンバン素子の高さを修正するといういわばフィードフォワード的な手法であるのに対し、Fig. 5(a) はモータの最大速度 V_M で修正が可能であることを意味しておりフィードバック的な考え方となる。

具体的には、速度ループに挿入すべき補償要素として、Fig. 2 に示したバンバン要素に、Fig. 5(a) で求めた特性を加味した Fig. 6 に示すようなヒステリシス要素を導入する。これによって

(a) モータの加速中は、その速度に応じた行き過ぎ量を目標値 R より線形的に減じ、

(b) 最大速度 V_M に達した後、速度零になるまでは、その V_M で与えられた行き過ぎ量（一定値）を目標値 R より減じ

(c) 速度零の点で、本来の目標値 R に切り替わることになり、ポジカスト制御の場合と同様に有限整定応答が実現される。

(a)

(b)

Fig. 5 Optimal feedback value and overshoot to maximum velocity

Fig. 6 Hysteresis element in feedback loop

以下、シミュレーションにより検討を行う。

Fig. 7(a) は特性根が $(-0.4 \pm j) 4.0$ であるシステムについて、変位の初期値 Y_0 を $-0.2R$ から $0.8R$ まで $0.2R$ おきに変えた場合の応答である。すべて有限時間で整定する応答が得られている。

さらに、速度の初期値 V_0 を $-1.0R$ から $5.0R$ まで $1.0R$ おきに変えた場合の応答を Fig. 7(b) に示す。速度の最大値が初期値より大きい場合は有限時間整定となるが、($V_0 = 5.0R$) のケースのように初期

Fig. 7 Simulation results of the second order servo system

Fig. 8 Relation between bang-bang control and hysteresis control

速度がそのまま最大速度である系の場合、行き過ぎが生じている。これはこのときの最大速度が目標入力に関する情報を含んでいないため、当然予想される結果である(注1)。

また Fig. 7 のシミュレーションでもちいた系につき従来のバンバン制御による応答と今回のヒステリシス制御による応答とを比較すると Fig. 8 が得られた。この結果、ヒステリシス制御のほうが若干速応性の良い応答が得られている。これは、応答の立ち上がり近辺でのフィードバック量が、バンバン制御に比べヒステリシス制御のほうが少ないことによるためである。

4. ヒステリシスフィードバック制御の応用

4.1 飽和サーボ系への適用

実際の位置決めサーボ系では、サーボモータの速度は常に定格値で決められる値以下で使用しなければならない。そのために、系は前向きパスに飽和特性をもつことになる。対象とするサーボ系のブロック線図を Fig. 9 に示す。モータの速度が飽和している場合、行き過ぎ量は入力ステップの高さには依存せず、最大速度に依存することになるため、常に最大速度に注目して補償を行うヒステリシス制御はきわめて有効な手段となる。

十分大きな目標値が印加された場合であっても、最終値の近辺、すなわち制御偏差が Fig. 9 に示す D (飽和要素の線形幅) 以下では常に線形サーボ系として動作するとき (具体的には 2 次の飽和サーボ系において線形部の特性根の減衰度 γ_0 が 0.3 以上のとき¹⁾)、Fig. 7(b) のシミュレーション結果からも明らかなように、補償用ヒステリシス要素は Fig. 5(a) を用いて同様に設計することができる。

以下シミュレーションによる結果を示す。まず前向きパスにおける飽和要素に関し線形区間の幅 D が 1 で飽和の高さ H を 20 とし、さらに線形部での特性根

Fig. 9 Hysteresis control of servo-system with Saturation amplifier

(注1) $t=0$ で V_0 が最大値であっても、この時点での加速度が零であれば問題を生じない。

について $\gamma_0=0.304$, $\omega_0=4.359$ とする。このとき Fig. 6 の立ち上がりの直線部分の傾き k_u は、目標値 R が D 以下の線形サーボ系とみなしたときの最適値に設計し、この状態で R を D から $4D$ おきに $29D$ まで変えた場合について、シミュレーションを行った。その結果を Fig. 10 に示す。ただし図では、速度については絶対的な値で示し、位置に関しては基準化して高さを揃えて示してある。この結果、すべての目標値につき有限時間で整定する応答が得られることが確認された (付録参照)。

4.2 高次サーボ系への適用

実際のサーボ系では高次の伝達関数となることも多いが、この場合でも、2次振動系の応答で近似される場合が普通である。このとき、高次系に固有の遅れが問題になる。その対策として、遅れに相当する時間だけフィードバック量を切り替えるタイミングを早めることにする²⁾。そのために速度帰還パスに挿入するヒステリシス要素を Fig. 11 のように修正する。

Fig. 10 Simulation results of servo-system with saturation amplifier

Fig. 11 Hysteresis element for the higher-order servo system

Fig. 12 Block diagram of the higher-order servo system

Fig. 13 Simulation results of the higher-order servo system

Fig. 12 に示すブロック線図の線形 3 次系にヒステリシス制御を適用した場合について検討する。遅れによる影響を除去するため修正した Fig. 11 の形のヒステリシス要素を用いたシミュレーション結果を Fig. 13 によって示す。ただし Fig. 13 は Fig. 10 と同様に、速度については絶対的な値で示し、位置に関しては基準化して高さを揃えて示してある。入力を変化させたとき、いずれの入力に対しても振動が完全に取り除かれていることが確認できた。

5. 実験

実際の応用例として、ヒステリシス制御を DC サーボモータによる位置決めサーボ系に適用し実験を行った。

5.1 実験装置

Fig. 14 に実験装置の概略図を示す。位置決めサーボ系は、20 W の DC サーボモータに、ポテンシオメータ（抵抗値 10 k Ω /rev）による位置フィードバック

Fig. 14 Schematic diagram of experimental equipment

Fig. 15 Experimental results

をほどこし 315 g $\cdot$ cm² の慣性負荷を加えた。サーボアンプのゲインを調整し線形閉ループ時に 50% のオーバーシュートをもつシステムとした。

ヒステリシスフィードバックはつぎのようにして実現した。まず速度フィードバック量を、5,000 pulse/

rev のパルスエンコーダと up-down カウンタ (8 bit) により計測し、これを 6809 cpu ボードに組まれたヒステリシス要素に入力し補償信号を求めた。この結果を 8 bit D/A コンバータ (± 5 V) によりアナログ量に変換し、サーボ系に加えた。なお、上記の計算は、100 マシンサイクル (0.1 ms) で計算できるがエンコーダの精度の制限から 1 ms のサンプリングタイムとした。

5.2 実験結果

Fig. 14 のシステムは負荷軸での回転角が 2π 以下の目標値に対しては常に線形のサーボ系として動作することを確認したので、以下に述べる実験をおこない Fig. 15 に示す結果を得た。

すなわち Fig. 15(a) は目標値が $3\pi/4$ の場合の応答で①補償前の系の応答、②ヒステリシスフィードバック制御による補償後の応答、を示している。補償に用いたヒステリシス要素は、Fig. 12 において横軸の速度を [rad/s]、縦軸のフィードバック量を [rad] で表わしたとき $K_U=0.017$ [s]、 $K_D=0.048$ [s] のものであった。

つぎに、目標値を π および $\pi/2$ に変えた場合の応答結果を Fig. 15(b)(c) に示す。

以上の結果目標値の高さには影響されないヒステリシスフィードバック制御により、約 0.08 s の整定時間 (セッティングタイム) をもつ応答が得られることが確認できた。

6. あとがき

本研究では、ヒステリシス要素による速度フィードバックを用いると、目標値の高さには影響されず理想的な応答が得られることを提案し、この制御手法を実際のサーボ系に应用することを前提に種々のシミュレーションと実験によって検討した。この結果、つぎに示すような理由により、実用上優れた補償方式であることを確認した。

(1) 飽和特性をもつ位置決めサーボ系に対して

も、入力の高さに依存しないポジキャストの原理が実現できる。

(2) 2次減衰振動系の挙動をもつ高次サーボ系においてもヒステリシス要素に、予測機能をもたせることにより、2次系の場合と同様の補償結果を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 中野：位置決めサーボ機構におけるバン-バンフィードバック補償，計測自動制御学会論文集，9-1，58/63 (1973)
- 2) 中野，今井：位置決めサーボ系の学習的設計法，計測自動制御学会論文集，21-6，619/623 (1985)
- 3) M. Nakano, et al.: Bang-Bang Feedback Control and Its Learning Type Design Method for Step Motor Positioning Servo Systems, 15TH Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, 103/109, Univ. of ILL. (1986)
- 4) B. C. Kuo: Incremental Motion Control (Step Motors and Control Systems), 226/227, SRL Publishing Company (1979)

《付 録》

飽和サーボ系において γ_0 が 0.3 以下の場合、目標値近辺で常に線形サーボ系として動作するという条件は満たさなれない。一例として Fig. 10 で用いた系につき、飽和要素の形は同一とし、線形系での特性根を $\gamma_0=0.229$ ， $\omega_0=4.279$ に変えた場合、ヒステリシス要素は Fig. 16 に示すような修正が必要になる。

Fig. 16 Hysteresis element for the servo-system with saturation amplifier