多角形表示による射出成形機のパターン制御[†]明 石 友 行^{*}・小 林 洋 二^{*}・谷 村 正 喜^{*}

Pattern Control of Injection Molding Machine with Polygon Graph

Tomoyuki AKASHI^{*}, Yohji KOBAYASHI^{*} and Masayoshi TANIMURA^{*}

The pattern of molding conditions and state variables, which consists of injection speed, pressure, specific volume and temperature of resin, determines the quality of moldings in an injection molding process. The demand for the pattern control is increasing in the field of the precise moldings. On the other hand, a desired value of the control system is too complicated to select automatically for several moldings to realize the precise pattern control.

The purpose of the study is to design a man-machine system in the injection molding process using a polygon graph, which is transformed from the desired value and the control value. The polygon graph is displayed as an operator can easily set and correct the value. The characteristics of resin and the dynamical model of the control system is also obtained for the transformation from the desired value to the polygon graph. The desired value is set and corrected, using the polygon graph through intuition and experience of an operator, and the method is effective for such a complicated control system as the molding process.

Key Words: pattern control, polygon graph, man-machine system, injection molding machine, process control

1. はじめに

Fig. 1 に射出成形機と制御装置の概略図を示す。加熱熔融された樹脂は、スクリーで押されて金型に射出、充填され、保圧、冷却後成形品として取り出される¹⁾。射出速度や圧力はマイクロコンピュータによって構成された制御装置により、サーボバルブを操作

して制御する。この成形プロセスでは射出速度、保圧、樹脂の温度さらに間接的には樹脂の比容積が制御のための変数としてきわめて重要である。筆者らは精密成形のためこれら個々の変数の制御について研究を進めてきた。先には樹脂の温度を制御するため加熱シリンダの非干渉化について²⁾、最近は射出速度、保圧の切り換えプロセスについて発表した^{3), 4)}。

精密な制御になると射出成形機の機体の温度や樹脂の状態、環境などの諸元の時間的変化があるため、上述の射出速度、保圧、樹脂温度の設定の頻繁な変更を必要とする。特に成形プロセスの立ち上がり時はこの巧みな設定いかんが精密成形の鍵となる。このためにはやはり相当程度フェジィな要素、すなわちオペレータの経験や勘を取り入れなければならない。本論文ではその設定法について新しい提案を試み、それが制御にいかに関係するかについて述べる。

従来はオペレータがデジタルスイッチにより設定値の修正を行っていたが、最近各制御量の時間的過程を直接に表示し、それを見ながら設定値の修正を行う試みもなされている。しかし、樹脂の特性や制御系の動特性に対する知識のない通常のオペレータにとっては、設定と修正に関する負担は必ずしも軽減されたとはいえない。

本論文の目的は設定値をディスプレイ装置の画面上に正多角形のグラフで表示し、オペレータが成形品の

Fig. 1 Schematic diagram of the injection molding machine and the control system

[†] 第 24 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 60・7)

^{*} 住友重機械工業(株)システム研究所 田無市谷戸町 2-4-15

^{*} System Engineering Laboratory, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Tanashi

(Received July 17, 1987)

(Revised November 5, 1987)

「フローマーク」や「ひけ」(注1)などの外観をみて圧力や温度などの設定値で構成された図形を修正し、目標パターンに合せた設定値変更を行うことにある。複雑な評価法をもつシステムでは、ある程度までオペレータの図形感覚にうたえる設定法を取り入れることがシステムにとって有効であると考えられる。

本文では多角形グラフを用いた設定値の修正手順を説明し、目標となる状態量から設定値を生成する方法を示す。つぎに成形プロセスの動特性を表わすモデルを求め、検出値の多角形図形表示に用いる変換係数の計算方法を説明する。最後に実際の成形例によってここで提案する設定値の修正方法の有効性を確かめる。

2. 多角形グラフによる設定値の修正と生成

2.1 多角形グラフによる設定値の修正方法

Fig. 2 によりパターン制御における設定値の修正方法と手順を説明する。次節で説明する Fig. 4 の目標の状態量 r に対して射出、保圧プロセスにおいて、オペレータは成形に先立ち製品ごとに適当にプロセスを分割し、その分割数を n とする（通常 n は5～6である）。つぎに $n+1$ 個の時刻 $t_k (k=0, 1, \dots, n)$ での初期設定値 $x_0(t_k)$ を決める。 x_0 の添字0は初期設定値を意味し、修正のたびに添字は増加していき第 i 回目の設定では $x_i(t_k) (k=0, 1, \dots, n)$ とする。ただし、 $t_0=0$ であり、 x は射出プロセスにおいては射出速度 $\dot{x}$ 、保圧プロセスにおいては樹脂の圧力 p_r を表わす。

制御装置の内部では設定した $n+1$ 個の $x_0(t_k)$ と d 次の B スプライン関数 $N_{dk}(t)$ を用いて時刻 $t (0 \leq t \leq t_n)$ における最初の制御系の目標値 $x_{r_0}(t)$ を

$$x_{r_0}(t) = \sum_{k=0}^n x_0(t_k) N_{dk}(t) \quad (1)$$

によって計算する。ただし $N_{dk}(t)$ は

$$N_{1k}(t) = \begin{cases} 1: t_k \leq t \leq t_{k+1} \\ 0: t < t_k, t > t_{k+1} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{dk}(t) = \frac{t - t_k}{t_{d+k-1} - t_k} N_{d-1,k}(t) + \frac{t_{d+k} - t}{t_{d+k} - t_{k+1}} N_{d-1,k+1}(t) \quad (3)$$

で定義される⁵⁾。 d は近似関数のなめらかさを示し、 d 次の微係数まで $x_{r_0}(t)$ が連続となり、 d を大きくすることによって区間分割の不連続性を修正することができる。

$x_{r_0}(t)$ を目標値とした最初の成形が終了したとき

Fig. 3(a) のようにディスプレイ装置の画面上に正

Fig. 2 Flow chart of the set and correction method of a desired value in the pattern control system

$n+1$ 角形のグラフを表示する。オペレータは成形品を点検して、「フローマーク」、「ひけ」などの欠陥を見て $n+1$ 個の設定値 $x_0(t_k)$ の良否を判定する。欠陥がある場合は正多角形の頂点 P_k をライトペンなどの入力装置を用いて修正する。図で Q_k が修正点である。

制御装置内部では画面上の修正量 $P_k Q_k$ を設定値の修正量 $\Delta x_1(t_k)$ に変換して $x_1(t_k) = x_0(t_k) + \Delta x_1(t_k)$ として、再び(1)式によって新たな目標値 $x_{r_1}(t)$ を計算する。以下同様に良い成形品とオペレータが判断するまで成形と修正が繰返される。ただし画面上の図形は制御装置内での単純な計算による半径方向の軸の縮少または延長により、常に正多角形に保たれる。そしてこの正多角形を基準に毎回の修正量 $\Delta x_i(t_k)$ が計算される。なお、Fig. 2 で x_i, x_{r_i} などの添字 i は修正回数を示し、オペレータの設定、修正、成形品の良否の判定の動作には OP の印を付け、その他の処理はすべて制御装置内部の計算を表わす。

つぎに制御装置内部で行う、設定値と画面上の座標との間の変換 (Fig. 2 の f_p で f_p^{-1} はその逆変換)

(注1) 「フローマーク」は金型の成形面で樹脂が急冷されるために生じる波状の模様であり、「ひけ」は成形品の冷却時に生じる部分的な収縮現象である。

(a) Polygon graph for the correction of a desired value

(b) Example of desired value

Fig. 3 Desired value and polygon graph in the pattern control system

について説明する。Fig. 3(b)の点 $A_0 \sim A_n$ で表わされる設定値を(a)の正多角形の頂点 $P_0 \sim P_n$ に対応させ、オペレータが P_k を Q_k に修正した場合を考える。ただし P_k の画面上の座標を (u_k, w_k) 、 Q_k の座標を $(u_k + \Delta u_k, w_k + \Delta w_k)$ とする。これらの座標と設定値 $x_i(t_k)$ の修正量 $\Delta x_i(t_k)$ の関係を

$$u_k + \Delta u_k = e^{c \Delta x_i(t_k)} \cos \omega_k \quad (4)$$

$$w_k + \Delta w_k = e^{c \Delta x_i(t_k)} \sin \omega_k \quad (5)$$

とする。ただし表示画面上で $\overline{OP_k} = 1$ とし、

$$c = c_k [T_r(t_k) + 273] \quad (6)$$

$$\omega_k = -2\pi k / (n+1) \quad (7)$$

とする。ここで $c_k(>0)$ は定数で、 T_r は摂氏 $^{\circ}\text{C}$ 目盛による樹脂の温度である。 c_k はオペレータが画面上で楽に修正できる量を $\overline{P_k Q_k} = h(>0)$ としたとき、修正量の必要な精度 $\Delta x(>0)$ に対して $h = e^{c \Delta x} - 1 = e^{c_k h T_r} (e^{c_k} + 273) \Delta x - 1$ によって決める。

射出プロセスの目標の状態量はFig. 1に示す金型内の樹脂の流れの先端速度 $q(t)$ と温度 $T_r(t)$ により、設定値は射出速度 $\dot{z}(t)$ (スクリューの前進速度)に相当する。射出速度が一定でもFig. 12に示すように樹脂の流路が長い場合は樹脂温度の低下が大きく粘性抵

抗が増し、圧力損失も大きくなるので q が急激に減少する。そこでオペレータにとっても修正しやすいように樹脂の温度 T_r に対する粘度 μ の式⁶⁾

$$\mu = \mu_0 e^{-b(T_r - T_{r0})} \quad (8)$$

に合せて指数関数を用いた変換を行っている。粘度はせん断速度によっても変化するが、ここではより影響の大きい温度のみを考える。ただし q は $1/\mu$ にほぼ比例すると考え $c_k > 0$ としてある。(8)式の μ_0 は温度 T_{r0} のときの粘度で $b(>0)$ とともに樹脂の種類によって決まる定数である。そして時間の経過にしたがって金型で冷却されて T_r が下がっていくので、温度 $T_r(t_k)$ に応じて(6)式のように係数 c を計算する。このように c を決めると h に対して温度によらず q の変化量が等しくなり修正しやすい。

保圧プロセスでの目標の状態量は樹脂の圧力 $p_r(t)$ 、比容積 v (密度の逆数)および $T_r(t)$ であり、設定値は $p_r(t)$ に相当し、変換にはやはり(4)~(7)式を用いる。ただし(6)式に対して

$$c = c_k [T_r(t_k) + 273] \quad (9)$$

とし、射出プロセスとは異なる定数 c_k' を用いる。 p_r が増加したときキャビティに充填される樹脂の重量は、温度が高く粘度が低いと樹脂が流れやすくなるため急激に増加する。このとき $p v T$ の関係(次節の(10)式)から圧力は高めに設定する。そして射出プロセスと同様に(4)、(5)式のように指数関数で表現すれば h に対して温度によらず重量が同じだけ変化するのでオペレータにとって修正しやすい。成形品の重量はゲートシール(成形品の流入口で樹脂が固化する状態)⁷⁾などの要因によっても変化するが、ここでは最も支配的な温度のみを考える。

2.2 目標の状態量と設定値の生成⁸⁾

はじめに成形プロセスでの樹脂の状態量の関係を表わす式としてつぎのスペンサーの式⁹⁾を導入する。

$$(p_r + \pi)(v - \omega) = R_m(T_r + 273) \quad (10)$$

ここで p_r (kgf/cm²)は樹脂の圧力、 v (cm³/g)は比容積を表わし、 π (kgf/cm²)、 ω (cm³/g)、 R_m (kgf·cm/(g·°K))はそれぞれ樹脂の種類によって決まる定数である(注2)。(10)式の関係を表わしたのがFig. 4の $p v T$ 線図である¹⁰⁾。 $p v T$ 線図は樹脂の状態変化が一目でわかるように圧力、温度、比容積を軸に3次元の座標で表わす。ただし、(10)式の関係によって樹脂ごとに可能な状態が曲面 Q として決まる。成形プロセス中樹脂はその状態に応じてこの曲面

(注2) 通常(10)式の定数は kgf/cm²などの旧式の単位系で求められているので、ここでもそれに従った。ただし、1 kgf = 9.8 N である。

Fig. 4 p - v - T -diagram of polystyrene and a desired state change r in a molding process

上を移動し、 p 、 v 、 T のうち二つの状態が決まれば残り一つの状態が決まる。Fig. 4 には Fig. 5 に示すスパイラル状の成形品を成形した場合のキャビティ各部での樹脂の圧力、温度を測定して得られた実験結果を示してある。図中の数字 s_i の s は Fig. 5 の測定点 P_i ($s=0 \sim 5$) に対応し、 l は時刻 t_l ($l=0 \sim 7$) のサンプリング番号を示す。この成形品では、圧力、温度、比容積は金型の中の場所によって大きく異なる。一方、制御系に与える設定値は状態変化の一部に着目したものになり、Fig. 4 には着目する状態 r の変化を太線で示してある。その決め方はつぎのとおりである。

射出プロセスでは金型と樹脂が接触する成形面で、流れの進行と同時に冷却によって成形品の表面が形成され、表面の形状を一樣にする目的で樹脂の流れの先端速度 $q(t)$ (m/s) を一定にする必要がある。この条件は Fig. 4 では r 上の②'~②''に相当する。ただし設定値は射出速度 $\dot{v}$ であり、つぎのように成形品の形状

を分類して $q = \text{一定}$ となる $\dot{v}$ を決める。

(1) Fig. 5 のように断面形状が一定で1次元流れとみなせる場合、(2) Fig. 6 のディスク状の成形品のように断面形状が2次的に増加する場合、(3) Fig. 7 の成形品のように3次元流れであり、一定の絞りとみなせる場合の3種類である。キャビティが曲線になったり分岐する場合は、1次元または2次元流れで断面形状が変化したものとする。3次的にキャビティが広がる場合は、空間が大きくなるので粘性抵抗は入口の部分のみを考えればよく、(3)の場合に分類される。上記三つの分類に対してノズルと樹脂の流れの先端の間の流路の粘性抵抗

は、(1)ではノズルからの距離によって粘性抵抗が決まり、 $q = \text{一定}$ とすると距離が時間に比例して増加し粘性抵抗も時間に比例して増加する。(2)ではたとえば Fig. 6 では $q = \text{一定}$ とすると流路の側面積が粘性抵抗に比例すると考え、粘性抵抗は時間の2乗に比例して増加する。(3)では粘性抵抗は一定である。

以上の分類に基づいてオペレータが成形品ごとにつ

Fig. 6 Schematic diagram of a disc type molding

Fig. 5 Schematic diagram of a spiral type molding

Fig. 7 Schematic diagram of a volumetric type molding

ぎのような ε を初期設定する。(1)では ε ＝一定とし、 t に比例して増加する粘性抵抗による q の低下(Fig. 12)は成形品を見ながら修正する。(2)では t^2 に比例して粘性抵抗は増加するが急激な圧力上昇を避けるため ε は t に比例する形で設定する。(3)では粘性抵抗は一定であるから ε ＝一定に設定する。

Fig. 3(b)はディスク状の成形品の ε の設定例を示す。 $n=5$ で $A_2 \sim A_3$ が上記の説明による設定である。 $A_0 \sim A_2$ はFig. 4の②～②'に相当し、射出開始時にノズル部の開放のために必要な圧力上昇を起す ε を設定し、 $A_3 \sim A_5$ はFig. 4の②'～③に相当し、射出から保圧プロセスへの移行段階で樹脂の流れが乱れたり圧力上昇が大きくならないように ε を設定する。

保圧プロセスでの設定値の作成は直接(10)式の関係を用い、キャビティ内の樹脂を一体とみなして集中化して考える。ただし樹脂温度については通常直接測定することが不可能なのでつぎの近似式を用いる。

$$T_r(t) = T_m + a_1(T_c - T_m)e^{-t/\tau_1} + a_2(T_c - T_m)e^{-t/\tau_2} \quad (11)$$

ここで $T_m(^{\circ}\text{C})$ は金型の温度、 $T_c(^{\circ}\text{C})$ は充填する樹脂の温度、 $\tau_1 = t_f(\text{s})$ は射出時間、 $\tau_2 = t_f + t_H(\text{s})$ で t_H は保圧時間を表す。係数 a_1, a_2 は $t=0$ (射出開始時)で $T_r = T_c$ 、 $t = \tau_2$ のとき $T_r = T_g$ の条件より

$$a_1 + a_2 = 1 \quad (12)$$

$$T_g = T_m + a_1(T_c - T_m)e^{-\tau_2/\tau_1} + a_2(T_c - T_m)e^{-1} \quad (13)$$

によって求められる。 $T_g(^{\circ}\text{C})$ は結晶性の樹脂の場合は融点を、また非晶質の樹脂の場合はガラス転移点を表す。(12)、(13)式の意味は射出開始時($t=0$ のとき)に温度 T_c の樹脂は、保圧プロセス終了時に樹脂が固化する温度 T_g に等しくなるという条件である。

つぎに保圧プロセスでの状態量の目標をFig. 8によって説明する。保圧プロセスのはじめには温度が急激に下がり樹脂が収縮するため、温度の高い③～④の間に圧力を一定に保ちながらFig. 1に示すリザーバから樹脂を補う。つづいて樹脂の収縮に合せて圧力を下げ、その間室温での比容積 v_0 に保つ(④～⑤)。オペレータが成形品を見ながら逐次修正していくための設定点の数 n は③、④、⑤の三つと④～⑤の間をさらに細分して決める。細分数は成形品ごとに冷却過程で温度などの樹脂の状態が一様に変化する区間に分割して決める。⑤はキャビティの入口で樹脂が固化するゲートシールの状態でこれまでに保圧を終了しなければならない⁷⁾。実際にオペレータが初期設定するのは、近似式を用いる場合は n と t_k および射出から保圧へ切り換わる圧力 $p_r(t_0)$ (③での圧力)で、その他の

Fig. 8 State transition of resin in a holding pressure process

$p_r(t_k)$ は制御装置内部で(11)式によって $t=t_k$ での T_r を計算し、 $v=v_0$ とともに(10)式に代入して計算する。なお、Fig. 4と8の①～②は可塑化プロセス¹¹⁾、⑤～⑦は冷却プロセスを示す。

3. 成形プロセスの動特性と表示のための変換係数

3.1 成形プロセスの動特性とそのモデル⁴⁾

Fig. 1を参考にまず制御対象のモデルを求める。油圧駆動系の動特性は

$$q_a = k_1 i_a - k_2 p_a \quad (14)$$

$$q_a = A_a \frac{dz}{dt} + \frac{V_a}{\beta_a} \frac{dp_a}{dt} \quad (15)$$

$$M_a \frac{d^2 z}{dt^2} + B_a \frac{dz}{dt} = A_a p_a - A_s p_0 \quad (16)$$

と表わされる。ただし $q_a(\text{m}^3/\text{s})$ は射出シリンダに流れ込む作動油の体積流量、 $p_a(\text{Pa})$ は射出シリンダの駆動圧力、 $i_a(\text{A})$ はサーボバルブの操作電流で制御系の入力に相当する。 $k_1(\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{A}))$ 、 $k_2(\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa}))$ はサーボバルブの特性を表す定数、 $A_a(\text{m}^2)$ は射出シリンダの受圧面積、 $V_a(\text{m}^3)$ は射出シリンダおよび配管内の作動油の体積、 $\beta_a(\text{Pa})$ は作動油の体積弾性係数、 $M_a(\text{kg})$ は射出シリンダの可動部スクリーウの質量の和、 $B_a(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$ はスクリーウと加熱シリンダの内壁との間の粘性抵抗係数、 $A_s(\text{m}^2)$ はスクリーウの断面積、 $p_0(\text{Pa})$ はリザーバ部の樹脂の圧力を表す。リザーバ部の樹脂を一体とみなして集中定数系で表わすと、

$$q_0 = \alpha_0 e^{T_0/T_0} (p_0 - p_1) \quad (17)$$

$$q_0 = A_s \frac{dz}{dt} - \frac{V_0}{\beta_0} \frac{dp_0}{dt} \quad (18)$$

となる。ここで $q_0(\text{m}^3/\text{s})$ はノズルから射出される樹脂の体積流量、 $V_0(\text{m}^3)$ はリザーバ内の樹脂の体積、 $T_0(^{\circ}\text{C})$ は樹脂の温度、 $p_1(\text{Pa})$ は金型内のスプル部分の樹脂の圧力を表わす。 $\alpha_0(\text{m}^3/\text{s})$ 、 $\gamma_0(1/^{\circ}\text{C})$ は樹脂の種類によって決まる定数である。

金型内の樹脂のモデルを Fig. 1 のようにキャビティを m 分割して集中定数系として扱う。そして第 j 番目のブロックについて (17), (18) 式と同様に

$$q_j = \alpha_j e^{\gamma_j T_j} (p_j - p_{j+1}) \quad (j=1, 2, \dots, m-1) \quad (19)$$

$$q_{j-1} - q_j = \frac{V_j}{\beta_j} \frac{dp_j}{dt} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (20)$$

が成り立ち、 $q_m=0$ である。(17), (19) 式は樹脂の流量と圧力損失の関係を表わし、(18), (20) 式は樹脂の圧縮性を表わす式である。 $q_j, \alpha_j, \gamma_j, T_j, p_j, V_j, \beta_j$ は (17), (18) 式と同様の第 j ブロックの変数および定数を表わす。樹脂を金型内に充填する射出プロセスでは樹脂の流れの先端が第 j ブロックに到達するごとに添字 j が増加する。系の次数をなるべく小さくするため射出中は金型内の樹脂を一体とみなして

$$q_{A_j} = \alpha_{A_j} e^{\gamma_{A_j} T_{A_j}} (p_{A_j} - p_0) \quad (j=1, 2, \dots, m-1) \quad (21)$$

$$q_{A_j} = \frac{V_{A_j}}{\beta_{A_j}} \frac{dp_{A_j}}{dt} \quad (j=1, 2, \dots, m-1) \quad (22)$$

と表わす。 $q_{A_j}, \alpha_{A_j}, \gamma_{A_j}, T_{A_j}, p_{A_j}, V_{A_j}, \beta_{A_j}$ は (17), (18) 式と同様の変数と定数を表わす。樹脂がキャビティに充填されると冷却過程に合せて圧力を調整する保圧プロセスに移る。このときもキャビティの樹脂を一体とみなして動特性を表わす。

以上の近似モデルによって射出、保圧プロセスを通じて制御対象の動特性をつぎの 4 次系で表現する。

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_a \\ \dot{z} \\ \dot{p}_0 \\ \dot{p}_{A_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\beta_a k_2/V_a & -2\beta_a A_d/V_a & 0 & 0 \\ A_d/M_a & -B_d/M_a & -A_s/M_a & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ z \\ p_0 \\ p_{A_j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_a k_1/V_a \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_a \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{32} &= \beta_a A_s/V_0, & a_{33} &= -\beta_0 \alpha_0 e^{\gamma_0 T_0}/V_0 \\ a_{34} &= \beta_0 \alpha_0 e^{\gamma_0 T_0}/V_0, & a_{43} &= \beta_{A_j} \alpha_0 e^{\gamma_0 T_0}/V_{A_j} \\ a_{44} &= -\beta_{A_j} (\alpha_0 e^{\gamma_0 T_0} + \alpha_{A_j} e^{\gamma_{A_j} T_{A_j}})/V_{A_j} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

成形プロセスの進行中の樹脂の流動特性の変化、成形品や樹脂の種類の違いによる動特性の変化すべてを (24) 式の五つのパラメータの変化として表わす。また (23) 式では状態量として温度や比容積 (v と β の関係は $\beta = \partial v / \partial p|_{T=\text{一定}}$ である) が係数の中に含まれているが、前章の $p-v-T$ 線図を用いた設定値にこれら

状態量の関係を反映させ、変換係数の計算には (23) 式のように区間 j ごとに定係数のモデルを用いる。

3.2 検出値の表示のための変換係数の計算

ここでは上記のモデルを用い、検出値を多角形図形で表示して 2 章の修正で得られた設定値を精度よく修正する。成形機のオペレータは制御に関する知識をもっていないので、修正の結果状態量がどのようにに変化するかわからず試行の回数も多くなる。そこで制御量を検出しディスプレイシステムの助けをかりて、設定値との偏差を 2 章で説明した正多角形の頂点を基準に多角形で表示する。2 章の方法で得られた最終の設定値 $x(t_k)$ と検出値 $y(t_k)$ から偏差 $e(t_k)$ を

$$e(t_k) = x(t_k) - y(t_k) \quad (25)$$

によって計算し、頂点 P_k からの表示画面上の距離 $e_d(t_k) = \overline{P_k P_{d_k}} (P_{d_k}$ は Fig. 3(a) の画面上の検出値を表示する点) は

$$e_d(t_k) = K_e e(t_k) \quad (26)$$

により計算する。 K_e は変換の係数でオペレータが h の修正を行った場合設定値の修正量 $\Delta x(t_k)$ に対して

$$e_d(t_k) = \Delta x(t_k) = h \quad (27)$$

の関係にある。そして $e(t_k)$ の偏差に対して $\Delta x(t_k) = K_e e(t_k)$ の修正を行ったとき、修正の試行回数 $i-1$ 回目より i 回目の偏差の 2 乗積分値のほうが小さくなる範囲で K_e を決める。

Fig. 9 には $i-1$ 回目の偏差 $e_{i-1}(t_k)$ に比例した修正量 $\Delta x_{i-1}(t_k) = K_e e_{i-1}(t_k)$ を $i-1$ 回目の設定値 $x_{i-1}(t_k)$ に加えて、 $y(t_k)$ を $x(t_k)$ に近づける学習制御系のブロック線図を示す。この系で

$$|1 - K_e H_k(j\omega)| < 1 \quad (28)$$

が K_e の最大値を決める条件である^{12), 13)}。Fig. 10 にはディスク状の成形品に対する $H_k(j\omega)$ のベクトル軌跡の例を示す。(28) 式の条件は $\omega < \omega_c$ の範囲 (図の点線の円内) で満足される。(23) 式の状態方程式 $j=k$ ごとに伝達関数 $G_k(s)$ を求め (射出プロセスの出力

Fig. 9 Block diagram of the iterative learning control system

Fig. 10 Vector locus of $H_k(j\omega)$ in the injection process of the disc type molding

は z , 保圧プロセスの出力は $p_{A_j} = p_r$), さらに閉ループ系の伝達関数 $H_k(s) = G_k(s)/[1 + G_k(s)]$ のベクトル軌跡を描き, 中心 $(1/K_k, 0)$, 半径 $1/K_k$ の円が制御系の注目する最大角周波数 ω_c 以下で $H_k(j\omega)$ を含むように K_k を選ぶ. 実用上はいくつかの典型的成形品に分類して K_k をテーブルとして準備しておく.

4. 実験および考察

(11)式の近似式と実験値を比較するため, Fig. 5の p_5 の位置に熱電対を挿入して樹脂温度を直接測定した. Fig. 11には測定結果を実線で示し, 近似式による計算結果を点線で示す. グラフの横軸は射出開始からの時間, 縦軸は温度を対数目盛で示す. 実験値の立ち上がりが遅れるのは樹脂が測定点に到達するまでの時間と熱電対の熱容量による. 実験値と近似式による計算値とは射出から保圧に移行する図のB点で比較的良好に一致する. そしてその他の点での近似式と意味はつぎのように説明される.

樹脂の流れの進行にともなって着目点は点A (射出開始時の樹脂温度で Fig. 5の p_1 の位置での測定値) から点Bの温度に移り (p_5 の位置), 樹脂が完全にキャビティに充填された時点で保圧プロセスとなる. 着目点は冷却につれて p_1 の位置に戻り, A' 点の温度で保圧を終了する. そして分布定数系を集中定数系で近似した誤差分だけオペレータが2章の方法で設定値を修正する. したがって(11)式の近似式の役割は概略の温度変化を計算しておくことによってオペレータの修正回数を減らすものである. なお, (11)式は(6)式の c を計算するための T_r を求める際にも利用する.

つぎに射出プロセスでの設定値の修正の影響を調べる. Fig. 12にはスパイラル状の成形品における樹脂先端速度 $q_{s,s+1}$ (m/s) と z の関係を実験によって求め

Fig. 11 Experimental and calculated temperature of resin in the cavity in the molding process

Fig. 12 Velocity $q_{s,s+1}$ of resin flow in the cavity of spiral type molding

ている. ただし $q_{s,s+1}$ ($s=1\sim4$) は Fig. 5の圧力 p_s と p_{s+1} の立ち上がり時刻の差でセンサ間の距離を割って求めている. z を一定にしたとき粘性抵抗の上昇により $q_{s,s+1}$ はしだいに遅くなる. そしてこの減少分も2章の方法によってオペレータが修正する.

さらに射出プロセスでの温度と設定値の修正の影響を調べるためディスク状の成形品で実験を行った. $n=3$ として Fig. 13には $p_0\sim p_3$, $p_{d_0}\sim p_{d_3}$ を示し, 同じ設定値の変更 (最大定格の $\pm 10\%$) を行ったときの z の検出値への影響を表わしている. ①が初期設定, ②が点 P_2 について $+10\%$, ③は -10% の設定値変更を行った結果である. ④, ⑤は点 P_3 について同様の修正を行った結果である. P_2 での樹脂温度は P_3 での値より最大 7.5°C 高く, 同じ z の修正量に対して P_2 のほうが変化が大である. また正の修正のほうが負の修正より変化が大きい. ディスク状の成形品は肉厚が薄く冷却が速いので, 温度の影響を受けやす

Fig. 13 Effect of set values of injection speed on polygon graph in the injection process of the disc type molding

Fig. 14 Effect of set values of holding pressure on the weight of the volumetric type molding

い。したがって多角形の各頂点でのバランスをよくするためには(4), (5)式のような温度に対して指数関数で表わされる変換が有効であると考えられる。

最後に保圧プロセスでの設定値の修正が成形品の重量に与える影響を調べるため3次元的な成形品 (Fig. 7 に示す) で実験を行った。Fig. 14 に結果を示し、グラフは横軸に圧力の設定値 P_{Rk} 、縦軸に成形品の重量をとってある。3本の線はそれぞれ $k=1, 2, 3$ に対する重量の変化を表わし、たとえば $k=1$ について $P_{R1}=80, 90, 100, 110 \text{ kgf/cm}^2$ の4種類の設定について重量を測定した結果を示す。実験結果から k が大きいほうが温度が低く同じ修正量に対する重量の変化が

小さい。3次元的な成形品のように保圧プロセスでの温度変化によって重量が大きく変わる場合も、多角形の各頂点のバランスをよくするためには、(4), (5)式のような温度に対して指数関数で表わされる変換が有効である。

5. おわりに

本研究では設定と修正の便宜のため多角形図形表示を用い、射出速度、保圧、樹脂温度などの状態量によって表示のための変換係数を求めているので、樹脂の特性や制御系の動特性についての知識のないオペレータにとっても修正しやすいマンマシンシステムを構成することができた。正多角形のように人間のバランス感覚を生かした図形を用いているため、オペレータの修正の負担は軽減され、このような設定と修正方法は他の複雑な制御対象にも応用されると思われる。

最後に、本研究で終始親身など指導をいただいた住友重機械工業(株)の上滝致孝博士に謝意を表する。

参考文献

- 1) I. I. Rubin: Injection Molding, Theory and Practice, 1, John Wiley & Sons (1972)
- 2) 明石：非干渉化の手法を用いた射出成形機の加熱シリンダの温度制御，計測自動制御学会論文集，22-2，230/237 (1986)
- 3) Y. Kobayashi and T. Akashi: A Multiprocess Control of Injection Molding Machine, IFAC 10th World Congress Preprints, Vol. 3, 51/56 (1987)
- 4) 小林，明石：射出成形機の射出，保圧プロセス制御，実システムのモデリングと制御系設計シンポジウム資料，59/64 (1987)
- 5) 市田，吉本：スプライン関数とその応用，132，教育出版 (1979)
- 6) Z. Tadmor and I. Klein: Engineering Principles of Plasticating Extrusion, 35, Robert E. Krieger Publ. (1970)
- 7) 山口章三郎：プラスチックの成形加工，171，実教出版 (1975)
- 8) 明石，小林：射出成形機における圧力-射出速度パターンの制御，第24回SICE学術講演会予稿集，421/422 (1985)
- 9) R. S. Spencer and G. D. Gilmore: Equation of State for Polystyrene, J. Appl. Phys., 20, 502/506 (1949)
- 10) 山口，大柳：熱可塑性樹脂の溶融状態における圧縮性に関する研究，工学院大学研究報告，16，17/27 (1964)
- 11) 明石，上滝：射出成形機の可塑化プロセスの解析，電気学会論文誌B，108-7，325/332 (1987)
- 12) 川村，宮崎，有本：学習制御方式のシステム論的考察，計測自動制御学会論文集，21-5，445/450 (1985)
- 13) 美多，加藤，青木：反復制御とロボットアームの軌道制御への応用，計測自動制御学会論文集，21-11，1223/1230 (1985)