モードモデルにもとづく外乱オブザーバを用いた放電加工精度の改善†

今井 祥人*・三宅 英孝*・竹下 光夫**・

尾 籐 浩 司***・ビチャイ サエチャウ****・中 野 道 雄****

Improvement of Machining Accuracy in EDM Using Disturbance Observer Based on Modal Model

Yoshihito IMAI*, Hidetaka MIYAKE*, Mitsuo TAKESHITA**,
Hiroshi BITOH***, Vichai SAECHOUT**** and Michio NAKANO****

The Electrical Discharge Machine(EDM) which can process metals of any hardness, is generally used for making moulds and dies. During the process, because the process is non-contact, unlike milling, drilling or grinding, a large machining force does not seem to exist. However, when using a large electrode, a large machining force is generated by the viscosity of the dielectric liquid. Such force deforms the machine and makes the machined depth several tens to hundreds of micrometers less than the required depth. As a result, additional machining for the shallow areas is required, which obviously increases total machining time.

To cope with this problem, we have proposed a new method to utilize a disturbance observer to compensate for the discrepancy in the depth, according to the estimated value of the deformation. The disturbance observer is designed based on a mechanical model identified by modal analysis, in which a machining force is considered as step disturbance. With the proposed method in an actual machining, although the value of deformation is up to about two hundreds micrometers, the error in the depth is kept within a few micrometers. It does not need any additional machining for realizing the required depth, and the total machining time is about 40% shorter than for the conventional method. This result confirms that the proposed method is essential for accurate and fast machining where a large machining force is present.

Key Words : electrical discharge machining, disturbance observer, modal analysis, machining force, deformation

1. はじめに

放電加工機は、電極と被加工物を絶縁性加工液中に対向して配置し、それらの間にパルス状の電圧を印加して過渡アーク放電を発生させ、被加工物を熱的に熔融加工する。したがって、放電加工機は、硬度に関係なく導電性を有する材料に対して、所望の形状を有する電極を使用することで電極形状が転写される三次元形状加工が可能であり、主に金型の加工に利用されている。

このような特徴を持つ放電加工は、非接触加工であるため切削加工のように大きな加工反力は一般に発生しないと思われるが、ところが、電極面積が大きくなると、電極と被加工物の相対移動に伴う加工液の粘性に起因する力、放電

により発生する気泡に起因する力など^{1), 2)}、放電加工機に機械変形を生じさせるほどの大きな加工反力が発生する場合がある。その結果、実際の加工深さが指令した加工深さよりも数十 μ m以上も浅く仕上がってしまう。そのため、所望の加工深さを得るためには、熟練作業による機械変形量を見込んだ追加工が必要となり、加工精度・加工時間の点で問題となっている。

本研究では、このような問題点を解決するために上記のような加工反力を機械系への外乱とみなし、外乱オブザーバを構成することにより機械変形量を推定し、その推定値に基づき加工深さ指令値を補正することを試みる。以下、第2章では、従来の放電加工機における加工制御系の概略と、加工深さが浅くなる問題、およびここで提案する外乱オブザーバを利用した加工制御系について説明する。第3章では、外乱オブザーバを構成するに必要となる機械系モデルをモード解析により獲得した結果について示す。第4章では、第3章で決定したモデルに対して外乱オブザーバを設計し、そのオブザーバの性能をシミュレーションにより評価する。第5章では、実加工において機械変形の推定を行った結果、およびその推定値を用いて加工深さ指令値を補正した場合の加工深さ精度および加工時間の改善結果を示す。

† 第36回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1997・7)

* 三菱電機 (株) 産業システム研究所 尼崎市塚口本町 8-1-1

** 三菱電機 (株) 技術研修所 三田市あかしあ台 2-2-1

*** 三菱重工業 (株) 名古屋機器製作所 名古屋市中村区岩塚町

**** 東京工業大学 東京都目黒区大岡山 2-12-1

* I.E.S.L., Mitsubishi Electric Co., Amagasaki

** I.O.T., Mitsubishi Electric Co., Sanda

*** N.M.W., Mitsubishi Heavy Industries LTD., Nakamura-ku, Nagoya

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

(Received September 22, 1997)

(Revised August 10, 1998)

2. 放電加工機における加工制御系

2. 1 従来の加工制御系

放電加工機における加工制御系の概略を Fig. 1 に示す。図に示すように、放電加工は電極と被加工物を絶縁性加工液中に対向して配置し、それらの間(極間)にパルス状の電圧を印加し、過渡アーク放電を発生させ加工を行う。このとき観測される加工パルスは、Fig. 2 に示すような典型的な4つの波形に分類できる³⁾。一般に、安定な放電加工状態とは、スパークやアークの波形が連続して発生し、効率よく放電電流が流れ、加工が進行している状況である。一方、不安定な放電加工状態とは、オープンやショートなどの波形が多発し、ほとんど放電電流が流れず、加工が停滞している状況である。

放電加工機では、このような安定な放電加工状態を維持するために、極間制御系およびジャンプ動作制御系が構成されている。以下、本論文の対象とする電極面積が大きな放電加工はZ軸方向の加工であるため、Z軸方向の電極駆動装置に限定して説明する。極間制御系では、加工中の極間平均電圧 v_g (電極と被加工物間の平均電圧)を検出し、その検出値が設定値 v_s となるように、加工深さ指令値 z_p を考慮しながら極間制御器により電極位置決め制御器へ電極位置指令値を与える。電極位置決め制御器は、モータ軸に取り付けられたエンコーダ信号によ

Fig. 1 Conventional control system for EDM.

Fig. 2 Typical discharge waveforms.

Fig. 3 Electrode movement during machining with jump motion.

る位置フィードバック系を構成しており、電極位置指令値にもとづいて電極と被加工物の相対位置を調整する。たとえば、オープンの波形が多い場合には電極を被加工物に近づけ、ショートの波形が多い場合には電極を被加工物から遠ざけることで、スパークやアークの波形を効率よく発生させ、安定な放電加工状態を実現する。また、極間制御器は、加工中に加工深さ指令値とエンコーダによる電極位置検出値を比較し、それらが一致したかどうかにもとづいて加工終了判定を行う。

ところで、加工深さが深くなると、極間から加工くずが排出されにくくなり、上述の極間制御系だけでは安定な放電加工状態を維持することが困難となる。これに対して、ジャンプ動作制御系では、電極を周期的に上下運動させることで強制的に加工くずを排出するためのジャンプ動作を行う。Fig. 3 にジャンプ動作の概略を示す。ジャンプ動作制御器は、ジャンプ動作制御器の出力2を電極位置決め制御器の入力に接続し、設定されたジャンプアップ距離 j_u にもとづいて、ジャンプ動作のための電極位置指令値を電極位置決め制御器へ与える。そして、ジャンプ動作が完了すると、極間制御器の出力1を電極位置決め制御器の入力に接続し、設定されたジャンプダウン時間 j_d (ジャンプ動作とジャンプ動作の間の加工時間)にもとづいて、極間制御のための電極位置指令値を電極位置決め制御器へ与える。

なお、加工用電源は、加工パルスのオープン電圧 v_o 、ピーク電流 i_p 、オン時間 t_{on} 、オフ時間 t_{off} を設定された条件に応じて制御することができる。(Fig. 2 参照)

2. 2 大面積加工時の問題点

電極面積が大きくなると、ジャンプ動作時には加工液の粘性に起因する加工反力が発生し、放電加工機本体に機械変形を生じさせる。この状況を詳しく調べるために、Z軸方向の電極駆動装置のモータ軸に取り付けられたエンコーダ、および被加工物が置かれた定盤を基準にレーザ変位計により電極位置を検出した結果を Fig. 4 に示す。電極サイズ、加工条件は図に示すとおりである。図より電極を降下させていくと、エンコーダに

Fig. 4 Deformation of EDM by machining force.

よる検出値からは電極が指令値にしたがって送出されていると判断できるが、レーザ変位計による検出値からは電極が実際にはあまり送出されていない状況がわかる。これは、ジャンプ動作終了後に極間制御が開始されると、放電が発生するまで極間距離を狭くするために電極を送り出すが、加工反力の発生により+Z軸方向に機械変形を生じているためである。

いま、加工深さ指令値として、仮に図に示すような加工深さが設定されているとする。前述したように、極間制御器は加工深さ指令値とエンコードによる電極位置検出値を比較して加工終了を判断するため、その検出値が加工深さ指令値に一致した点Aにて加工を終了する。したがって、加工反力が発生し、放電加工機に大きな機械変形を生じている場合には、実際の加工深さが目標加工深さよりも数十 μ m以上も浅く仕上がりが、加工精度の面で問題を生じる。また、所望の加工深さを得るためには、熟練作業による追加工が必要となり、加工時間の点でも問題となる。

2. 3 外乱オブザーバを用いた加工制御系

前節で述べた大面積加工時の問題点を改善するために、本論文では加工反力を機械系への外乱とみなした外乱オブザーバ^{4), 5)}を構成する。外乱オブザーバはこれまでにサーボモータ系での個体摩擦の推定とその補償に利用された例^{6)・8)}が報告されている。そこで、実機への搭載が容易な構成として、外乱オブザーバにより機械変形量を推定し、その推定値に基づき加工深さ指令値の補正を行う制御系を提案する。

Fig.5には極間制御系と外乱オブザーバの構成を示す。加工深さ指令値の補正は極間制御時に行うため、図ではジャンプ動作制御系を省略する。図において、極間電圧検出器、極間制御器、電極位置決め制御器は、Fig.1に示す従来のものと同じである。極間電圧検出器は1次のローパスフィルタ G_s 、極間制御器はPI補償 G_{cg} （比例+積分補償）、電極位置決め制御器はモータ駆動用アンプ G_i （電流ループを含む）、速度ループの補償器 G_{cv} 、位置ループの補償器 G_{cp} から構成される。なお、次章で行う機械系のモデル化の都合上、モータ電流にモータトルク定数 k_t をかけて得られるモータトルクを電極位置決め制御器の出力とする。このモータトルクはZ軸方向の電極駆動装置を含む機械系に作用し、極間距離が調整されることで放電加工状態が制御される。また、機械系にはモータトルクと同時に

加工反力が作用する。

それぞれの特性は、以下のとおりである。

$$G_s(s) = \frac{1}{1 + \tau_s s}, \quad \tau_s = 5.307 \times 10^{-4} \quad (1)$$

$$G_{cg}(s) = k_{pc} + \frac{k_{is}}{s}, \quad k_{pc} = 3.825 \times 10^1, \quad k_{is} = 1.251 \times 10^2 \quad (2)$$

$$G_i(s) = \frac{k_i}{1 + \tau_i s}, \quad k_i = 9.418 \times 10^{-1}, \quad \tau_i = 4.376 \times 10^{-4} \quad (3)$$

$$G_{cv}(s) = k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s}, \quad k_{pv} = 1.913 \times 10^{-3}, \quad k_{iv} = 8.982 \times 10^{-2} \quad (4)$$

$$G_{cp}(s) = k_{pp}, \quad k_{pp} = 1.000 \times 10^2 \quad (5)$$

$$k_t = 5.262 \times 10^{-1} \quad (6)$$

外乱オブザーバは、モータ電流とエンコード位置を入力し、機械変形量の推定値 $\hat{\Delta z}$ を出力する。この機械変形量は、被加工物位置から見た電極位置の変形量である。そこで、加工深さ指令値を推定された機械変形量で修正し、極間制御器では修正された加工深さ指令値 z_{pc} とエンコードにより検出された電極位置 x_1 を比較し、それらが一致したときに加工を終了するように構成する。なお、この外乱オブザーバの構成に関しては、第3章および第4章で詳しく説明する。

3. モード解析による機械系のモデル化

外乱オブザーバを構成するために放電加工機の機械系のモデル化を行う。Fig.6にモデル化の対象となる放電加工機の構造を模式的に示す。図において f_1 はモータにより機械系に加えられる力、 f_2 は電極に作用する加工反力、 f_3 は被加工物に作用する加工反力、また、 x_1 はエンコードにより検出される電極の位置、 x_2 は電極の位置、 x_3 は被加工物の位置である。図を参照して機械系モデルを(7a)、(7b)式のように定義し、それぞれの伝達関数をモード解析⁹⁾により決定する。モード解析によれば、放電加工機のような複雑な機械系の伝達関数を比較的容易に得ることができる。また、モータにより機械系に加えられる力 f_1 から上記のそれぞれの位置 x_1 、 x_2 、 x_3 までの伝達関数を測定すれば、それらの測定結果から解析的に加工反力 f_2 、あるいは f_3 から上記のそれぞれの位置 x_1 、 x_2 、 x_3 までの伝達関数を求めることができる。

Fig. 5 Block diagram of proposed control system with disturbance observer for EDM.

$$\begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \\ X_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) & H_{13}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) & H_{23}(s) \\ H_{31}(s) & H_{32}(s) & H_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(s) \\ F_2(s) \\ F_3(s) \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$H_{ij}(s) = \frac{X_i(s)}{F_j(s)} = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_r \phi_j}{m_r s^2 + c_r s + k_r} \quad (7b)$$

そこで、まず電極駆動用モータにより機械系を加振し、その際のモータ電流値、エンコーダの検出値、電極および被加工物に張り付けた加速度センサの出力を計測し、モータにより加えられる力からエンコーダ出力、電極位置、被加工物位置までの周波数応答を測定する。その結果を Fig.7 に実線で示す。測定した周波数応答より加工機の主共振周波数は 75Hz と 85Hz であることがわかる。

つぎに測定した結果(実線)からカーブフィットによりモデルパラメータを決定し、伝達関数 $H_{11}(s)$, $H_{21}(s)$, $H_{31}(s)$ を求める。ここでのカーブフィットは、上記の 75Hz, 85Hz の

共振系に対応する二つのモードと質量補正項の重ね合わせとして最小二乗法により行う。その結果を Fig.7 に点線で示すが、非常によいカーブフィットが行われていることがわかる。さらに (7a) 式に示される残りの伝達関数を $H_{11}(s)$, $H_{21}(s)$, $H_{31}(s)$ から解析的に求める。相反定理が成り立つことより $H_{12}(s)=H_{21}(s)$, $H_{13}(s)=H_{31}(s)$, $H_{23}(s)=H_{32}(s)$ が得られる。また、伝達関数 $H_{22}(s)$, $H_{23}(s)$, $H_{33}(s)$ は付録の手順にもとづいて Fig.8 に示すように得られる。

最後に (7a), (7b) 式の伝達関数表現された機械系のモデルを付録に説明した手順により (8a) ~ (8c) 式の状態空間表現に変換する。なお、出力はエンコーダの位置信号とする。

[機械系のモデル]

$$\frac{d}{dt} x_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_p(t) + N d(t) \quad (8a)$$

$$y_p(t) = C_p x_p(t) \quad (8b)$$

ただし、

$$x_p = [x_1 \quad \dot{x}_1 \quad x_2 \quad \dot{x}_2 \quad x_3 \quad \dot{x}_3]^T$$

$$A_p = \begin{bmatrix} -7.59 & -2.25 \times 10^{-5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4.27 \times 10^{-1} & -2.85 \times 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 9.36 \\ 0 \\ 2.76 \times 10^{-1} \\ 0 \\ 4.37 \times 10^{-2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} -3.47 \times 10^{-2} \\ 0 \\ -2.21 \times 10^{-3} \\ 0 \\ 4.06 \times 10^{-2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_p = [0 \quad 9.36 \quad 0 \quad 2.76 \times 10^{-1} \quad 0 \quad 4.37 \times 10^{-2}] \quad (8c)$$

Fig. 6 Schematic illustration of EDM.

Fig. 7 Curve-fit for measured transfer function $H_{11}(s)$, $H_{21}(s)$ and $H_{31}(s)$.

Fig. 8 Transfer function $H_{22}(s)$, $H_{23}(s)$ and $H_{33}(s)$ determined by modal analysis.

4. 外乱オブザーバの構成

制御対象が⁸(8a)～(8c)式、外乱特性が⁸(9a), (9b)式、その拡大系が⁸(10a)～(10c)式で記述されるとき、その拡大系に対するオブザーバが構成できるならば、その状態変数と外乱の両方を推定できる⁵⁾。

[外乱のモデル]

$$\frac{d}{dt}\xi(t)=\Gamma\xi(t) \quad (9a)$$

$$d(t)=H\xi(t) \quad (9b)$$

[拡大系]

$$\frac{d}{dt}x(t)=Ax(t)+Bu_p(t) \quad (10a)$$

$$y_p(t)=Cx(t) \quad (10b)$$

$$x(t)=\begin{bmatrix} x_p(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix}, A=\begin{bmatrix} A_p & NH \\ 0 & \Gamma \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix}, C=\begin{bmatrix} C_p & 0 \end{bmatrix} \quad (10c)$$

実際の加工反力は時事刻々と変化している。ここでは、加工反力をステップ状外乱と仮定する。この時、(8a)～(8c)式で表される制御対象は可観測であることから、拡大系に対するオブザーバは以下のように構成できる。なお、(11a)式における K はオブザーバゲイン、(11b)式における C_1 , C_2 は出力をそれぞれ機械変形量および外乱とするための行ベクトルである。

$$\frac{d}{dt}\hat{x}(t)=A\hat{x}(t)+Bu_p(t)+K(y_p(t)-C\hat{x}(t)) \quad (11a)$$

$$\hat{y}(t)=\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}\hat{x}(t) \quad (11b)$$

オブザーバゲインの設計は、双対なシステムに対する最適制御理論を利用する¹⁰⁾。すなわち、(12)式の2次形式評価関数を最小とするオブザーバゲインは $A=A^T$, $B=B^T$ として(13)式のリカッティ方程式の定常解 P を用いて(14)式で与えられる。ただし、 R は正定な対称行列、 Q は非負定な対称行列である。

$$J=\frac{1}{2}\int_0^\infty (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt \quad (12)$$

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} R^T P = 0 \quad (13)$$

$$K = -R^{-1} B^T P \quad (14)$$

そこで、 R と Q を変化させ、オブザーバの極がどのように配置されるかを調べ、設計されたオブザーバの性能をシミュレーションにより評価する。放電加工プロセスのモデル化は容易でないことから、Fig.9に示すように電極を徐々に被加工物へ近づける指令値を電極位置決め制御器に与えた場合の機械変形量と加工反力をシミュレーションする。機械系モデルは前章で得られたものを用い、その機械系にはスクイーズ効果による加工反力が作用するものとする。電極位置決め制御器はFig.5に示したものと同一である。図において $\hat{\Delta z}$ は機械変形量の推定値、 $\hat{d}$ は加工反力の推定値である。

最終的に決定された R と Q 、オブザーバの極は以下のようになる。なお、 I_6 は (6×6) 単位行列を表す。

Fig.10にはシミュレーション結果を示すが、設計したオブザーバは、機械系モデルとスクイーズ効果から計算される機械

変形量および加工反力の真値を良好に推定できている。

$$Q=1 \times 10^3 \begin{bmatrix} I_6 & 0 \\ 0 & 1 \times 10^3 \end{bmatrix}, R=0.1 \quad (15)$$

Poles:

$$\begin{aligned} &-4.3799 \times 10^{-4} \\ &-6.2262 \times 10^{-4} \pm j4.7434 \times 10^{-2} \\ &-2.7439 \times 10^{-1} \pm j5.3301 \times 10^{-2} \\ &-8.0789 \times 10^{-1} \pm j7.9467 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (16)$$

5. 加工実験

5. 1 電極位置の推定

前章で設計した外乱オブザーバを実際にDSP(Digital Signal Processor)を用いた専用コントローラに実現し、実加工において機械変形量や加工反力の推定を行なう。ここでは、前章で設計した連続系のオブザーバから、サンプリング周期 $200\mu s$ とし、双一次変換により離散系オブザーバを構成する。Photo 1に加工実験の構成を示すが、オブザーバによる推定結果と実際の電極位置を比較するためにレーザー変位計を配置している。電極は $\phi 250mm$ の円柱形状のグラファイト電極、被加工物はSKD-11である。実験は、加工反力が発生するような状況、すなわち3時間ほど加工を行い、加工深さが約 $0.7mm$ ほどになった時点で仕上げ加工条件により行った。Fig.11にエンコーダに

Fig. 9 Block diagram for simulation.

Fig. 10 Simulation results of disturbance observer.

より検出した電極位置，レーザー変位計により検出した電極位置，およびオブザーバにより推定した電極位置を示す．図よりエンコーダにより検出した電極位置とレーザー変位計により検出した電極位置は，ジャンプ動作終了後の加工中に約130 μm の差を生じており，加工反力による機械変形が発生していることがわかる．また，オブザーバにより推定した電極位置とレーザー変位計により検出した電極位置とは非常によく一致している．これは，オブザーバの推定速度と比較して外乱が比較的ゆっくりと変化しているためと考えられる．

5. 2 加工深さ精度の改善

前節において，オブザーバにより実際の電極位置を良好に推定できることが確認できたので，ここでは多段加工において，推定した機械変形量 Δz により加工深さ指令値 z_p を補正することにより加工深さ精度の改善を試みる．構成した加工制御系は Fig.5 に示すとおりである．

多段加工とは，所望の加工形状を荒加工から仕上げ加工へと複数の加工条件で加工を順々に進める加工法である．ここでの加工条件を Table1 にまとめる．左に示す番号 (1 ~ 9) は加工段数を示す．Fig.12 には従来の加工制御系により加工した場合とここで提案した制御系により加工した場合のそれぞれの加工段における加工深さ誤差を示す．図より従来の制御系では仕上げ加工になるほど加工深さ誤差が増大していることがわかる．これは，仕上げ加工の方が，極間距離が狭くなり加工反力が大きいと推測される．一方，提案する制御系ではほとんど加工深さ誤差を発生していないことがわかる．

したがって，従来の制御系では所望の加工深さを得るために追加工が不可欠となる．このとき，追加工量は機械変形量を見込んで設定する必要がある，熟練を要すると同時に1回の追加工で所望の深さを実現できるとは限らない．(Fig.12 において追加工時の誤差に幅を持つのはこのためである)

これに対して提案する制御系では追加工の必要はない，その結果，全加工時間は従来の制御系による加工に比べて約40% ほど短縮することが可能となった．

Photo 1 Experimental set-up.

Fig. 11 Estimation result at finish machining with jump motion.

Table 1 Stepping machining parameters.

<i>n</i>	<i>v_o</i> (V)	<i>i_p</i> (A)	<i>t_{on}</i> (μs)	<i>t_{off}</i> (μs)	<i>j_n</i> (μm)	<i>j_d</i> (s)
1	80	55.0	256	128	600	1.54
2	80	35.0	218	32	600	1.54
3	80	25.0	166	32	600	1.99
4	80	15.0	102	32	600	1.99
5	80	10.0	78	32	600	1.99
6	150	8.0	64	32	600	1.99
7	150	5.5	32	32	600	1.99
8	150	3.5	4	8	600	1.99
9	150	3.5	4	8	600	1.99

Fig. 12 Improvement of machining accuracy and time in stepping machining using disturbance observer.

6. まとめ

放電加工機では大面積加工時において、大きな加工反力が発生し加工機が機械変形を起こすような場合に、指令した加工深さよりも浅く仕上がるという問題があった。

本論文では、この問題を解決するために外乱オブザーバを用いて、機械変形を推定し、その推定値により加工深さ指令値を補償することを提案した。まず、オブザーバを設計するにあたり、放電加工機の機械系のモデル化をモード解析により行った。つぎに、得られた機械系のモデルを用い、加工反力をステップ状外乱と見なしてオブザーバを設計し、シミュレーションおよび実加工において機械変形量を良好に推定できることを確認した。さらに、機械変形量の推定値により加工深さ指令値の補償を行い、従来の加工制御系の場合とで加工深さ精度の比較実験を行った。その結果、ここで提案する制御系により加工深さ精度の悪化を招くことなく、従来必要であった追加加工をなくすることが可能となり、従来に比べて約40%の加工時間短縮を実現することができた。

参考文献

- 1) 毛利, 齊藤, 石田: 放電加工機稼働における機械的諸特性に関する研究, 電気加工学会誌, 20-39, 19/29 (1987)
- 2) 安達, 吉田, 国枝: 単発放電における気泡の挙動と加工反力, 電気加工学会全国大会講演論文集, 25/28 (1996)
- 3) D.F. Dauw, R. Snoeys, W. Dekeyser: Advanced Pulse Discriminating System for EDM Process Analysis and Control, Annals of the CIRP, 32-2, 541/549, 1983
- 4) 美多, 酒美: 疑似オブザーバによる外乱推定器の設計, 計測自動制御学会論文集, 13, 1/6 (1977)
- 5) 岩井, 井上, 川路: オブザーバ, コロナ社 (1988)
- 6) 山田: オブザーバによるサーボモータ系の個体摩擦の推定と位置決め制御への応用, 計測自動制御学会論文集, 24-2, 162/169 (1988)
- 7) 栗屋, 加藤, 三宅, 伊藤: 外乱オブザーバを利用した非線形摩擦のトルクバイアス補償法, 日本機械学会論文集, 57-534-C, 371/376 (1991)
- 8) 大西: 外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール, 日本ロボット学会誌, 11-4, 486/493 (1993)
- 9) 大久保: 機械のモデル・アナリシス, 中央大学出版, (1982)
- 10) 古田, 佐野: 基礎システム理論, 135/137, コロナ社 (1978)

付録: モーダルパラメータと状態空間表現の決定

機械系モデルは、前述の(7a), (7b)式で定義される。

$$\begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \\ X_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) & H_{13}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) & H_{23}(s) \\ H_{31}(s) & H_{32}(s) & H_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(s) \\ F_2(s) \\ F_3(s) \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$H_g(s) = \frac{X_g(s)}{F_j(s)} = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_r \phi_{jr}}{m_r s^2 + c_r s + k_r} \quad (7b)$$

いま、実測された伝達関数 $H_{11}(s), H_{21}(s), H_{31}(s)$ の周波数応答は、Fig.7の実線のとおりである。図より、加工機の主な共振周波数は75Hzと85Hzであり、ここではそれらの共振系に対応する二つのモードと質量補正項の重ね合わせによりモデル化を行う。すなわち、(7b)式は(A1)式となる。

$$H_g(s) = \frac{X_g(s)}{F_j(s)} = \frac{\phi_{g1} \phi_{j1}}{m_1 s^2 + c_1 s + k_1} + \frac{\phi_{g2} \phi_{j2}}{m_2 s^2 + c_2 s + k_2} + \frac{\phi_{g3} \phi_{j3}}{m_3 s^2}$$

$$= \frac{\phi_{g1} \phi_{j1}}{m_1 (s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2)} + \frac{\phi_{g2} \phi_{j2}}{m_2 (s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2)} + \frac{\phi_{g3} \phi_{j3}}{m_3 s^2} \quad (A1)$$

(A1)式において ζ_1, ζ_2 は減衰係数、 ω_1, ω_2 は共振周波数である。そこで、 $m_1=m_2=m_3=1$ とし、まず、それぞれの計測結果(Fig.7に示す実線)から $\zeta_1, \zeta_2, \omega_1, \omega_2$ を決定する。次に、(A1)式から、 $H_{11}(s)$ は(A2)式、 $H_{21}(s)$ は(A3)式、 $H_{31}(s)$ は(A4)式を用い、最小二乗法により $p_{11}(i), p_{21}(i), p_{31}(i), (i=1 \sim 3)$ を求める。

$$H_{11}(s) = \frac{p_{11}(1)}{s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2} + \frac{p_{11}(2)}{s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2} + \frac{p_{11}(3)}{s^2} \quad (A2)$$

$$H_{21}(s) = \frac{p_{21}(1)}{s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2} + \frac{p_{21}(2)}{s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2} + \frac{p_{21}(3)}{s^2} \quad (A3)$$

$$H_{31}(s) = \frac{p_{31}(1)}{s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2} + \frac{p_{31}(2)}{s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2} + \frac{p_{31}(3)}{s^2} \quad (A4)$$

ここで、最小二乗法により求めたパラメータとそれぞれのモーダルパラメータには以下の関係が成り立つ。

$$p_{11}(1) = \phi_{11} \phi_{11}, p_{11}(2) = \phi_{12} \phi_{12}, p_{11}(3) = \phi_{13} \phi_{13} \quad (A5)$$

$$p_{21}(1) = \phi_{21} \phi_{11}, p_{21}(2) = \phi_{22} \phi_{12}, p_{21}(3) = \phi_{23} \phi_{13} \quad (A6)$$

$$p_{31}(1) = \phi_{31} \phi_{11}, p_{31}(2) = \phi_{32} \phi_{12}, p_{31}(3) = \phi_{33} \phi_{13} \quad (A7)$$

したがって、(A5), (A6), (A7)式より(7b)式のすべてのモーダルパラメータが次のように求められ、(7a)式のすべての伝達関数が決まる。

$$\phi_{11} = \sqrt{p_{11}(1)}, \phi_{12} = \sqrt{p_{11}(2)}, \phi_{13} = \sqrt{p_{11}(3)}$$

$$\phi_{21} = \frac{p_{21}(1)}{\phi_{11}}, \phi_{22} = \frac{p_{21}(2)}{\phi_{12}}, \phi_{23} = \frac{p_{21}(3)}{\phi_{13}}$$

$$\phi_{31} = \frac{p_{31}(1)}{\phi_{11}}, \phi_{32} = \frac{p_{31}(2)}{\phi_{12}}, \phi_{33} = \frac{p_{31}(3)}{\phi_{13}} \quad (A8)$$

次に、(7a)式の状態空間表現を求める。入力を u_a 、出力を y_a 、状態変数を x_a と定義すると、上記で求めた減衰係数、共振周波数、モードパラメータを用いて状態方程式は(A9)式のようになる。

$$\frac{d}{dt} x_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u_a(t), \quad y_a(t) = C_a x_a(t) \quad (A9)$$

ただし、

$$x_a = [x_{a1} \ x_{a2} \ x_{a3} \ x_{a4} \ x_{a5} \ x_{a6}]^T = [x_1 \ \dot{x}_1 \ x_2 \ \dot{x}_2 \ x_3 \ \dot{x}_3]^T$$

$$u_a = [f_1 \ f_2 \ f_3]^T, \quad y_a = [x_1 \ x_2 \ x_3]$$

$$A_a = \begin{bmatrix} -2\zeta_1 \omega_1 & -\omega_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\zeta_2 \omega_2 & -\omega_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_a = [B_{a1} \ B_{a2} \ B_{a3}] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{21} & \phi_{31} \\ 0 & 0 & 0 \\ \phi_{12} & \phi_{22} & \phi_{32} \\ 0 & 0 & 0 \\ \phi_{13} & \phi_{23} & \phi_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_a = \begin{bmatrix} C_{a1} \\ C_{a2} \\ C_{a3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \phi_{11} & 0 & \phi_{12} & 0 & \phi_{13} \\ 0 & \phi_{21} & 0 & \phi_{22} & 0 & \phi_{23} \\ 0 & \phi_{31} & 0 & \phi_{32} & 0 & \phi_{33} \end{bmatrix}$$

ところで、加工反力 f_2, f_3 には $f_2=f_3$ なる関係が成り立つことから、(A9)式において入力を $u_p=f_1$ 、出力を $y_p=x_1$ 、状態変数を $x_p=x_a$ 、外乱を $d=f_2$ とすると、前述の機械系のモデル(8a)、(8b)式は以下のように記述できる。

$$\frac{d}{dt}x_p(t)=A_px_p(t)+B_pu_p(t)+Nd(t), \quad y_p(t)=C_px_p(t) \quad (A10)$$

ただし、

$$A_p=A_a, \quad B_p=B_{a1}=[\phi_{11} \ 0 \ \phi_{12} \ 0 \ \phi_{13} \ 0]^T$$

$$N=B_{a2}-B_{a3}=[\phi_{21}-\phi_{31} \ 0 \ \phi_{22}-\phi_{32} \ 0 \ \phi_{23}-\phi_{33} \ 0]^T$$

$$C_p=C_{a1}=[0 \ \phi_{11} \ 0 \ \phi_{12} \ 0 \ \phi_{13}]$$

[著者紹介]

今井 祥人 (正会員)

1984年東京工業大学大学院修士課程(制御工学専攻)修了。同年三菱電機(株)入社、産業システム研究所勤務。91~92年エジンバラ大学留学、現在に至る。放電加工機、レーザ加工機における加工制御の研究開発に従事。精密工学会、電気加工学会などの会員(工学博士)。

三宅 英孝

1991年京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科修士課程(機械システム工学専攻)修了。同年三菱電機(株)に入社、産業システム研究所に勤務。放電加工に関する研究開発に従事。日本機械学会、電気加工学会などの会員。

竹下 光夫

1967年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程前期物理系修了。同年三菱電機(株)中央研究所入社、現在、同社技術研修所に勤務。機械力学、機械制御に関する社内教育に従事。89年度精密工学会論文賞を受賞。日本機械学会、精密工学会、ロボット学会、システム制御情報学会の会員(工学博士)。

尾 藤 浩 司

1997年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程(制御工学専攻)修了。同年三菱重工業(株)名古屋機器製作所入社。現在、食品包装機械の電装設計に従事。

ビチャイ サェチャウ (正会員)

1990年東京工業大学大学院博士課程制御工学専攻終了(工学博士)。91年同大学工学部助手、現在に至る。パワーエレクトロニクス系の制御、制御理論の応用に関する研究に従事。電気学会などの会員。

中 野 道 雄 (正会員)

1968年東京工業大学大学院博士課程電気工学専攻終了(工学博士)。同年同大学工学部助手、73年同助教授、86年同教授。74~97年文部省高エネルギー物理学研究所併任。おもに計算機制御、計測制御機器に関する研究に従事。90年本学会著述賞を受賞。日本シミュレーション学会、電気学会、システム制御情報学会、IEEEなどの会員。本会フェロー。