最近の制御理論と溶接・生産技術への応用 (1)*

大 嶋 健 司**, 山 根 敏**

大嶋 健司

山根 敏

Application of Modern Control Technology to Welding System*

by Kenji OSHIMA** and Satoshi YAMANE***

キーワード：現代制御基礎論，デジタルコントローラ，2変数制御，ワイヤ送給速度，溶接速度，ビード高さ，開先内アーク位置，センサ，CCD カメラ，インプロセス制御

1. はじめに

近年，マイクロプロセッサを中心とするコンピュータの発達と現代制御理論およびファジィ・ニューラルネットワーク，遺伝的アルゴリズムなどソフトコンピューティングによる知的情報処理・制御がFAに活用されている．特に溶接システムにおいては溶接前に溶接速度・電流電圧波形などの溶接条件と溶接線および溶接姿勢を教示し，プレイバックする，いわゆるティーチングプレイバックが行われるかあるいは少品種多量生産では，1品種につき，オフラインにて溶接条件と溶接線および溶接姿勢を教示し，多量の同種の溶接を行う，いわゆるオフラインティーチングが行われるが，多品種少量生産ではティーチングに時間がかかる．また，溶接中の開先ギャップ変動など外乱にかかわらず良好な品質を得るためには，オンラインにてインプロセス制御が必要である．

この連載講義では2回に分け，第1回は現代制御基礎論について，応力歪を小さくするために，小さい角度の開先を持つ12 mm 中板厚2層溶接の初層のビード高さと裏ビード（およびビード表面）のインプロセス制御を例に取り上げ解説する¹⁾．

2. ビード高さと裏ビード・表ビードの2変数制御（具体例）

図1は小さい角度（16°：急速にアークが開先内にて電

極ワイヤ表面をはい上がらない程度の角度）のV開先における溶接プロセスを示す．ルートギャップは4 mmの場合であり，1パスのビード高さ x_1 の目標値を6 mmとする．また，母材の開先表面と溶融池前面との境界線近傍の開先表面全体にアーク入熱を与え，その部分に溶滴を溶着していく．良好な裏ビードと凹型の表ビードを得るためにアーク最下位置 x_2 を1.75 mmとする．

この溶接プロセスについて詳細に説明する．図1(b)～(d)においてトーチが溶接方向に移動する代りに母材を右方向に移動するとする．トーチは10 Hzにてウィービングし，これに同期して，パルス電流を与える（図1(a)）．電極ワイヤが母材開先面に近い位置にて25 msの間スプレー電流移行（パルスピーク電流）とし，アーク中心（ワイヤ先端）は3 mm上昇し（図1(b)(c)A→B），開先面に熱を与える．ワイヤはこの25 msで3 mm降下し，6 mmのワイヤが溶融池前面に0.234 mmの厚さで溶着する（25 msで図(b)のワイヤ点pが3 mm降下し，この期間にワイヤは6 mm溶着する）．これらの数値はルートギャップ4 mm開先角度16°の場合であり，これが変動すれば，ビード高さ（ $x_1=6$ mm），アーク最下位置（ $x_2=1.75$ mm）は変化する．

電極ワイヤが開先中央付近では臨界電流（1.2 mmワイヤでは260 A）以下のベース電流を与え，25 msの間溶滴移行なしにて，アークは約3 mm下降し（図1(d)A'），溶融池前面は右に $0.234/2=0.117$ mm移動する．図1の溶接プロセスにおいて，ビード高さ6 mm，アーク最下位置1.75 mmを実現するには，ワイヤ送給速度を3 mm/25 ms（=120 mm/s），溶接速度を0.117 mm/25 ms（=28 cm/min）とする必要がある．アーク長一定制御を行う電源を用いて，アーク長を一定に保ちながら，電流を制御することにより，アークの位置が図(b)～(d)のよ

*原稿受付 平成12年3月7日

**正 員 埼玉大学 Member, Saitama University

表1 制御方法と外乱

(a) 制御量に外乱の影響が表れる系	ティーチングプレイバック、オフラインティーチング
(b) フィードフォワード系	インプロセス制御
(c) フィードバック系	インプロセス制御

図(c)の方法は、目標値と制御量の間の偏差を活用して操作量を変化させ、偏差をなくす方法である。この方法は外乱の加わる位置および特性がわからなくても、外乱によって現れる偏差に着目する方法である。偏差を求めるため、センサにて、制御量を検出する。これをフィードバックする。したがって、図(c)はクローズドループ制御系とも呼ばれる。一般にインプロセス制御は図(b)あるいは(c)の制御系にて行われ、(b)では外乱を、(c)では制御量を検出するセンサが必要となる(表1)。一般には(b)と(c)を一つの系にまとめて制御系を構成する場合が多いが、ここでは簡単のために(c)フィードバック制御系について解説する。

4. 制御の目的

制御の目的は次の2項目である。

1. 定常状態における制御量と目標値の差(定常偏差)がないこと、特に外乱(ギャップ変動)あるいはパラメタ(ワイヤ送給速度など)の変化にかかわらず定常偏差がないこと
2. 制御量がオーバーシュートあるいは振動なく、できる限り速く目標値に応答すること

5. 状態方程式

制御の目的を実現するように図2(c)におけるコントローラを設計する。そのために、現代制御理論では、まず、制御対象の性質、すなわち操作量と制御量の間の関係(状態方程式)を線形微分方程式にて求める必要がある。

状態変数(制御量):ビード高さ x_1 およびアークの最下位置 x_2 と入力変数(操作量):ワイヤ送給速度 wf (電流電圧波形)および溶接速度 ws の関係を表現する状態方程式は次の線形1次系で近似される。

$$\frac{dx_1}{dt} = a_{11}x_1 + b_{11}(wf - wf_0) + b_{12}(ws - ws_0) \quad (1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + b_{21}(wf - wf_0) + b_{22}(ws - ws_0)$$

すなわち、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $u_1 = wf - wf_0$, $u_2 = ws - ws_0$

図3 操作量、伝達関数と制御量の関係

図4 コントローラと制御対象の結合

ここで、 $a_1, a_2, b_{11} \sim b_{22}, wf_0, ws_0$ の係数は図1の溶接プロセスが短いアーク長を保って行われるとして求められ、 a_1, a_2 は実験結果から定めた¹⁾。また、状態変数 x_1, x_2 は電流がベース電流からパルスピーク電流に立上がる瞬間における値だけを観察し、入力変数 u_1, u_2 も電流の立上がり時においてのみ変化し、次の立上がり時まで一定とする。なお、 wf_0, ws_0 は定常状態近傍における線形化のために導入した。

6. ラプラス変換と伝達関数および信号伝達

前章において微分方程式(2)で記述される溶接プロセスについて考察したが、入力 u_1, u_2 と出力 x_1, x_2 の関係の見通しは必ずしも良いとはいえない。しかし、線形システムの入出力特性を以下に定義する伝達関数の概念を用いて表現すると信号伝達が簡潔となる。

伝達関数とは、線形システムにおいてすべての初期値を0としたときの出力のラプラス変換 $\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$ と入力のラプラス変換 $\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$ を用いて、

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

で表される³⁾。すなわち(2)式の両辺のラプラス変換を行うと、ラプラス変換により微分することが s を掛けることに置換えられるので、

$$s \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} s - a_{11} & 0 \\ 0 & s - a_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s - a_{11} & 0 \\ 0 & s - a_{21} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{G}\mathbf{U} \quad (5)$$

となり、この表現は微分方程式に比較して簡潔となり、出力のラプラス変換 $\mathbf{X}(s)$ は伝達関数 $\mathbf{G}(s)$ と入力のラプラス変換 $\mathbf{U}(s)$ の積によって求められる(図3)。したがってシステムの結合の表現が簡単となり、図4において

$$\mathbf{U}(s) = \mathbf{C}(s) \mathbf{E}(s), \mathbf{X}(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{U}(s)$$

よって $\mathbf{X}(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{C}(s) \mathbf{E}(s)$ より、コントローラと溶

接プロセスの結合の伝達関数は $G(s)C(s)$ と簡単に求められる。ラプラス変換を用いることにより、要素の結合など信号伝達を加減乗除だけで簡単に扱えることになり、制御系の解析や設計に役立つ。

7. 状態(遷移)方程式

いま (2) 式の系は

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (6)$$

で表され、(6)式をラプラス変換すると

$$sX(s) - x(0) = AX(s) + BU(s)$$

となる。これより、

$$X(s) = (sI - A)^{-1}x(0) + (sI - A)^{-1}BU(s) \quad (7)$$

(7) 式をラプラス逆変換すれば $x(t)$ が得られる。

$$x(t) = \Phi(t)x(0) + \int_0^t \Phi(t-\tau)Bu(\tau)d\tau \quad (8)$$

ここで、 $\Phi(t) = e^{At}$ であり、これを用いて (8) 式は

$$x(t) = \Phi(t-t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t-\tau)Bu(\tau)d\tau \quad (9)$$

となる。これを状態遷移方程式と呼んでいる²⁾。

8. 離散値系の状態(遷移)方程式

いま、(8)式の入力ベクトル $u(t)$ の各要素 u_1, u_2 の値がコンピュータをコントローラとして用いるデジタル制御では図5のように一般に一定周期 T で階段状に変化するものとなる。

$$u(t) = u(kT), kT \leq t < (k+1)T \quad (10)$$

(10)式を利用して、 $t = (k+1)T$ における $x(t)$ の値は(9)式より求めると、

$$x((k+1)T) = Px(kT) + Qu(kT) \quad (11)$$

となる²⁾。ここに $P = e^{AT}$, $Q = (e^{AT} - I)A^{-1}B$

連続時間系の状態方程式が微分方程式になるのに対し、離散時間系の状態方程式は差分方程式となる。この式を離散時間系の状態(遷移)方程式と呼んでいる。デジタルコンピュータからの出力は連続量として出すのではなく、ある一定間隔で一定値であり、このような信号

図5 離散時間系における操作量

で制御される対象の挙動を一定間隔で考察する場合、離散時間系とみなされる。また、はじめから(6)式の形をとらず(11)式の形となる系をデジタル系と呼ぶ²⁾。

9. サンプリングとZ変換

トーチウィービングの半周期 $T = 50$ ms 毎 (図1におけるC時刻)にCCDカメラのシャッターを開き、ビード高さ(熔融池高さ) x_1 およびアーク先端位置Cを撮影し、画像処理と演算処理によりアーク最下位置 x_2 も求める。あるいはトーチ電流・電圧をA/D変換器によりサンプリングし、熔融池高さ x_1 およびアーク位置 x_2 を求めることができる。

サンプラの出力は図6に示すインパルス離散時間信号 $f^*(t)$ によって近似され、インパルス列は

$$f^*(t) = f(0)\delta(t) + f(T)\delta(t-T) + f(2T)\delta(t-2T) + \dots$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} f(kT)\delta(t-kT), \quad \delta(t) = \begin{cases} 1 & t=0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}$$

となる。 $f^*(t)$ をラプラス変換すると

$$L[f^*(t)] = f(0) + f(T)e^{-sT} + f(2T)e^{-2sT} + \dots$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} f(kT)e^{-ksT} \quad (13)$$

となる。

$$z = e^{Ts} \quad (14)$$

とおくと(13)式は

$$Z[f^*(t)] = F(z) = f(0) + f(T)z^{-1} + f(2T)z^{-2} + \dots$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} f(kT)z^{-k} \quad (15)$$

となり $F(z)$ は離散信号 $f^*(t)$ のZ変換という。 $f^*(t)$ はサンプリング時 $t = kT (k=0,1,2,\dots)$ の $f(t)$ と同じであるので、 $f(t)$ のZ変換は $f^*(t)$ のZ変換と同じである。以後関数 $f(kT)$ は T を省略し、 $f(k)$ と表す。図6(a)の $f(k)$ のZ変換は

図6 離散時間関数 $f(k)$ のシフト

$$Z[f(k)] = F(z) \quad (16)$$

である。 $f(k)$ から 1 周期進んだ図 6(c) の $f(k+1)$ の Z 変換は (15) 式より

$$Z[f(k+1)] = zF(z) - zf(0) \quad (17)$$

となる。

また、 $f(k)$ が n 周期遅れた $f(k-n)$ の Z 変換は

$$Z[f(k-n)] = z^{-n}F(z) \quad (18)$$

となる (図 6 (b))。

連続時間系における関数の時間微分のラプラス変換したものと類似の型となる¹⁾。したがって、離散時間系の状態方程式 (11) の両辺を Z 変換すると

$$z\mathbf{X}(z) = \mathbf{P}\mathbf{X}(z) + \mathbf{Q}\mathbf{U}(z) \quad (19)$$

となる。ただし、すべての初期値を 0 とした。 (19) 式より、

$$\mathbf{X}(z) = (z\mathbf{I} - \mathbf{P})^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{U}(z) = \mathbf{G}(z)\mathbf{U}(z) \quad (20)$$

ここに、 $\mathbf{G}(z) = (z\mathbf{I} - \mathbf{P})^{-1}\mathbf{Q}$ であり、これはパルス伝達関数と呼ばれている。(20) は出力の Z 変換はパルス伝達関数と入力 of Z 変換の積で表されることを意味する。したがって連続時間系においてラプラス変換を用いたときと同様に Z 変換を用いることは、要素の結合と信号伝達を加減乗除だけで簡単に取り扱えることになり、デジタル制御系の解析・設計に役立つ。

例えば図 7 のフィードバック制御系において、

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{R}(z) - z^{-1}\mathbf{X}(z) \quad (21)$$

$$\mathbf{U}(z) = \mathbf{D}(z)\mathbf{E}(z) \quad (22)$$

$$\mathbf{X}(z) = \mathbf{G}(z)\mathbf{U}(z) = (z\mathbf{I} - \mathbf{P})^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{U}(z) \quad (23)$$

ここに

$$\mathbf{X}(z) = \begin{bmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} X_1(z): \text{ビード高さ} \\ X_2(z): \text{アーク位置} \end{array}$$

$\mathbf{R}(z): \mathbf{X}(z)$ の目標値

$\mathbf{E}(z): \mathbf{X}(z)$ の偏差

$$\mathbf{U}(z) = \begin{bmatrix} U_1(z) \\ U_2(z) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} U_1(z): \text{ワイヤ送給速度} \\ U_2(z): \text{溶接速度} \end{array}$$

$$\mathbf{D}(z) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad \text{デジタルコントローラの特} \\ \text{性}$$

となる。センサにおいて、1 周期遅れ (z^{-1}) があるのは CCD カメラからの画像処理に 30 ms 近く要するので、1 周期 50 ms 遅れで目標値と比較するからである。

10. デジタルコントローラ的设计

(21)~(23)式より、

図 7 フィードバック制御系のブロック線図

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{R}(z) - z^{-1}\mathbf{X}(z) \quad (24)$$

$$\mathbf{G}(z)^{-1}\mathbf{X}(z) = \mathbf{D}(z)\mathbf{E}(z) \quad (25)$$

まず、(11)式を用いて(20)式のパルス伝達関数 $\mathbf{G}(z)$ がわかり、つぎに目標値の $\mathbf{R}(z)$ に対する望ましい応答 $\mathbf{X}(z)$ が与えられると、(24)式より、偏差 $\mathbf{E}(z)$ が求まり、これを用いて(25)式の両辺を比較することによりデジタルコントローラ $\mathbf{D}(z)$ の特性、すなわち、

$$\mathbf{D}(z) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (26)$$

の各要素が求められる。したがって、コントローラの出力 (操作量) $\mathbf{U}(z)$ が次式 (27) で与えられる。

$$\mathbf{U}(z) = \mathbf{D}(z)\mathbf{E}(z) \quad (27)$$

例題 図 7 のフィードバック制御において制御対象として(11)式の溶接プロセスを考える。これは操作量 $\mathbf{U}$ のステップ入力に対し、出力 $\mathbf{X}$ が最終値までの 63.2% に達する時間 (時定数) が 1.5 秒の 1 次遅れ系である。図 7 の制御系を構成し、(1)できる限り速く目標値に応答し、(2)定常偏差がないようにするため、目標値が単位ステップ入力 $r_1, r_2 = 1$ ($u_0(t)$) のとき、制御系の応答が $x_1, x_2 = 1 - e^{-\alpha t}$ ($\alpha = 1$) (時定数 $\frac{1}{\alpha} = 1\text{s}$) となるようコントローラの特 $\mathbf{D}(z)$ を定めよう。

解 溶接プロセスのパルス伝達関数 $\mathbf{G}(z)$ は (11), (20) 式より

$$\mathbf{G}(z) = \begin{bmatrix} z - p_{11} & 0 \\ 0 & z - p_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix} \quad (28)$$

また、 r_1, r_2 および x_1, x_2 の Z 変換は

$$\mathbf{R}(z) = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 - z^{-1}} \\ \frac{1}{1 - z^{-1}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{X}(z) = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 - z^{-1}} - \frac{1}{1 - z^{-1}e^{-\alpha T}} \\ \frac{1}{1 - z^{-1}} - \frac{1}{1 - z^{-1}e^{-\alpha T}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

(28)~(30)式を(24)(25)式に代入して $\mathbf{D}(z)$ の各要素を得

る。

$$D(z) = \begin{bmatrix} \frac{c_{11} - c_{11}p_{11}z^{-1}}{1 - d_1z^{-1} - d_2z^{-2}} & \frac{c_{12} - c_{12}p_{22}z^{-1}}{1 - d_1z^{-1} - d_2z^{-2}} \\ \frac{c_{21} - c_{21}p_{11}z^{-1}}{1 - d_1z^{-1} - d_2z^{-2}} & \frac{c_{22} - c_{22}p_{11}z^{-1}}{1 - d_1z^{-1} - d_2z^{-2}} \end{bmatrix} \quad (31)$$

ここで、 c_{ij} , d_i は q_{ij} および α によって定まる係数である。

(27)式に(31)式を代入して、

$$\begin{aligned} U_1(z) &= D_{11}(z)E_1(z) + D_{12}(z)E_2(z) \\ U_2(z) &= D_{21}(z)E_1(z) + D_{22}(z)E_2(z) \end{aligned} \quad (32)$$

(18)式を用いて、(32)式を離散時間信号で表すと

$$\begin{aligned} u_1(k) &= c_{11}e_1(k) - c_{11}p_{11}e_1(k-1) + c_{12}e_2(k) - c_{12}p_{11}e_2(k-1) \\ &\quad + d_1u_1(k-1) + d_2u_1(k-2) \\ u_2(k) &= c_{21}e_1(k) - c_{21}p_{11}e_1(k-1) + c_{22}e_2(k) - c_{22}p_{11}e_2(k-1) \\ &\quad + d_1u_2(k-1) + d_2u_2(k-2) \end{aligned} \quad (33)$$

となる。現在の操作量 $u_1(k)$, $u_2(k)$ は現在の偏差 $e_1(k)$, $e_2(k)$, 1周期前の偏差 $e_1(k-1)$, $e_2(k-1)$ および 1周期前および 2周期前の操作量 $u_1(k-1)$, $u_2(k-1)$, $u_1(k-2)$ および $u_2(k-2)$ を用いて上式より求められる。

また、(33)式は次のようにも表される。

$$\begin{aligned} \Delta u_1(k) &= k_{11}e_1(k) + k_{12}\Delta e_1(k) + k_{13}e_2(k) + k_{14}\Delta e_2(k) \\ &\quad - d_2\Delta u_1(k-1) \\ \Delta u_2(k) &= k_{21}e_1(k) + k_{22}\Delta e_1(k) + k_{23}e_2(k) + k_{24}\Delta e_2(k) \\ &\quad - d_2\Delta u_2(k-1) \end{aligned} \quad (34)$$

ここに、 $\Delta u_1(k) = u_1(k) - u_1(k-1)$, $\Delta u_2(k) = u_2(k) - u_2(k-1)$, $\Delta e_1(k) = e_1(k) - e_1(k-1)$, $\Delta e_2(k) = e_2(k) - e_2(k-1)$

したがってコントローラは比例要素と積分要素を持ち、ステップ状の目標値の変化およびステップ状外乱に対し、定常偏差が存在しないことが知られている²⁾。

11. 線形モデルにおける数値実験

(1) ステップ応答

図1に示した溶接プロセスは離散時間系の状態方程式(11)で記述され、 $x(kT)$ は T を略して $x(k)$ と表わすと

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= p_{11}x_1(k) + q_{11}u_1(k) + q_{12}u_2(k) \\ x_2(k+1) &= p_{21}x_1(k) + q_{21}u_1(k) + q_{22}u_2(k) \end{aligned} \quad (11')$$

ここで、 $u_1 = wf - wf_0$, $u_2 = ws - ws_0$

となる。ルートギャップが4 mm の場合の(11')式の各係数を表2に示す。 p_{11} , p_{22} は実験結果から定めた。また、 $q_{11} \sim q_{22}$ は図1の溶接プロセスが短いアーク長を保って行われるとして求められ、 wf_0 および ws_0 はルートギャップ4 mm 近傍における線形化のために導入した。

図8はステップ入力(ワイヤ送給速度 wf , 溶接速度

表2 溶接システムを表す状態方程式のパラメタ

	Gap: 4mm	Gap: 5mm
p_{11}	0.967216	0.971833
p_{22}	0.967216	0.971833
q_{11}	0.001398	0.001062
q_{12}	-0.037029	-0.028188
q_{21}	0.000398	0.000240
q_{22}	-0.021474	-0.015774
wf_0	13.806814 mm/s	
ws_0	-4.821154 mm/s

図8 溶接速度のステップ変化に対するビード高さおよびアーク位置の応答

ws)に対する出力(ビード高さ x_1 およびアーク最下位置 x_2)の応答である。 $t=0 \sim 20$ sの間ワイヤ送給速度 120 mm/s, 溶接速度 28.1 cm/min であり、ビード高さ 6 mm およびアーク最下位置 1.75 mm を得る。 $t=20$ sにおいて溶接速度のみ、20%下げると、ビード高さ x_1 は約17%上昇する。一方、アーク最下位置 x_2 は約38%高くなるので、ルートエッジにアーク熱が不足し裏ビード幅は狭くなる。また、入力ステップ変化に対し、出力が最終値の63.2%に達する時間(時定数)が1.5 sであり、実験の過渡応答に一致するよう(11')式の係数 p_{11} , p_{22} を定めた。

(2) ワイヤ送給速度、溶接速度が一定の場合

つぎに、図9に示すように200 mmの間ルートギャップ G が4 mm から5 mmに変化する開先においてワイヤ送給速度 120 mm/s, 溶接速度 28.1 cm/min一定とした場合の溶接について考える。

このワイヤ送給速度 wf および溶接速度 ws はギャップ4 mmの開先においてビード高さ6 mm およびアーク最下位置1.75 mmを得るためのものである。

ギャップ4 mm および5 mmの場合の溶接プロセス(11)のパラメタ p_{ij} , q_{ij} ($i, j=1,2$)は表2に示した。ギャップが4 mm から5 mmにランプ状に変化する場合のパラメタ p_{ij} , q_{ij} もランプ状に変化するものとした。

線形モデル(11)式を用いて、ビード高さ x_1 , アーク最下

図9 ルートギャップが4 mmから5 mmに変化し、ワイヤ送給速度、溶接速度一定の場合のビード高さとアーク位置の応答

図10 ルートギャップが4 mmから5 mmに変化し、コントローラを用いてワイヤ送給速度、溶接速度を制御した場合のビード高さとアーク位置の応答

位置 x_2 を求め、図9に示す。始動時のビード高さ x_1 、アーク最下位置 x_2 の応答の時定数は1.5 sである。また、ギャップ G の増加に伴って、開先断面積が増加するので、ビード高さは低下するとともに、アーク位置が下がり過ぎると、裏当材（セラミック）および裏ビードが過熱沸騰することもある。

(3) コントローラを用いる場合

図7の制御系を構成し、(33)式のコントローラを用いて操作量：ワイヤ送給速度 wf および溶接速度 ws を生成し、制御量：ビード高さ x_1 およびアーク最下位置 x_2 を制御した。その結果を図10に示す。図において、各値を10周期毎にプロットした。まず、始動時 ($G=4$ mm) において、ワイヤ送給速度 wf は速く、溶接速度 ws は遅くして制御量 x_1, x_2 の応答は速くなっている（時定数：1 s）。

つぎに、ギャップ G の25%増加につれて開先断面積が増加すると、溶接速度 ws を約22%減少し、ワイヤ送給速度も約3%減少して、ビード高さ x_1 およびアーク最下位置 x_2 が目標値に保たれている。応答も速くなり、ギャップ変動にかかわらず定常偏差もない。

御への適用例を示した。次回、現代制御論、ファジィ・ニューラルネットワーク制御を解説する予定である。

引用・参考文献

- 1) Francis H. Raven: Automatic Control Engineering, McGraw Hill, 1978
- 2) 長谷川：基礎制御理論 [1], 昭晃堂, 1990
- 3) 杉江, 藤田：システム制御シリーズ3, フィードバック制御入門, コロナ社, 1999
- 4) 美多, 原, 近藤：基礎デジタル制御, コロナ社, 1988
- 5) 大嶋, 森田, 山本, 窪田：パルス MIG 溶接における溶融池の画像処理とデジタル制御, 溶接学会論文集, 第5巻, 第3号, p. 304, 1987
- 6) 杉谷, 西, 佐藤：溶込み・ビード高さ同時制御知能溶接ロボット, 溶接法ガイドブック2：アーク溶接におけるセンシングと制御, p. 205, 1990
- 7) 山根, Sharif, 日野, 窪田, 大嶋：片面裏ビード溶接溶融池の画像処理とデジタル制御, 第136回溶接アーク物理研究委員会資料ア物99-1070, 1999
- 8) L. Sharif, S. Yamane, Y. Hino, K. Eguchi, T. Kubota, K. Oshima: Image Processing and Digital Control of Weld Pool In One Side Robotic Welding, Proceedings of International Institute of Welding Commission XII, p. 63, 1999.

12. おわりに

現代制御基礎論について解説し、中厚板溶接溶融池制