最近の制御理論と溶接・生産技術への応用 (2)*

—ファジィ・ニューラルネットワークによる知的情報処理・制御—

大 嶋 健 司**, 山 根 敏**

大嶋 健司

山根 敏

Application of Modern Control Technology to Welding System [2]*

by Kenji OSHIMA** and Satoshi YAMANE**

キーワード：現代制御基礎理論，デジタルコントローラ，ファジィ・ニューラルネットワーク，知的情報処理・制御，溶込み深さ制御，溶接線検出・追跡制御，溶融池幅および冷却時間のモデル

1. はじめに

本連載講義において，制御理論の溶接システムへの適用を取り上げている．第1回目は現代制御基礎論を溶接システムに適用し，ビード高さおよびアーク位置の2変数制御について説明した¹⁾．一般に現代制御理論をコントローラ設計に適用するためには，制御対象を線形微分方程式にて記述しなければならないが²⁾，アーク溶接系は非線形偏微分方程式にて表されるので，現代制御理論をそのまま適用することは困難である．熟練技能者は溶接中にギャップが変動するなどの外乱に適應して制御するときは外乱をインプロセスにおいて検出することにより，コントローラのパラメタを調整し（フィードフォワード制御，適応制御），また，熟練技能者は溶接現象を観察し，溶接結果が目標値となるように，溶接パラメタを調整している（フィードバック制御，インプロセス制御）．これができるように熟練・学習する．ファジィ・ニューラルネットワークコントローラも熟練技能者と同等あるいはそれ以上に学習することができる．そのコントローラの学習（パラメタ調整）は溶接実験により行うかあるいは制御対象のモデルを構築し，数値シミュレーションにより行うことができる．溶接現象のモデルは線形微分方程式の代りに，熟練技能者の知識・経験を言語表現による法則を用いるファジィ推論あるいは入出力の数値データを用いるニューラルネットワークにより構築できる．

連載講義の第2回目は，まず，ニューラルネットワー

クモデルを用いて，池幅，ギャップおよび電流の時間変化により溶込み深さをセンシングし，これを制御するファジィコントローラを学習する³⁾．つぎに，電圧，電流，ワイヤ送給速度の時間的な変化を入力とし，アーク長・突出し長さを出力とするアークセンサについて述べる⁴⁾．さらに，鋼構造物溶接における良好な溶込みと靱性を確保するため，電流・電圧および溶接速度と溶融池形状および冷却時間の関係を表わす動的モデルをニューラルネットワークを用いて構成し，最適冷却時間を得るための電流と溶接速度を求める⁵⁾．これらの例はファジィ・ニューラルネットワークの知的情報処理制御への基礎応用例であり，溶接システム制御に活用するときに参考になれば幸である．

2. アーク溶接システムの制御

アーク溶接における制御対象には図1(a)に示すように制御量（ビード高さ，アーク位置）を乱す外乱（ギャップ変動など）が加わるのが普通である．このため，予め操作量（ワイヤ送給速度（電流電圧波形），溶接速度）を溶接データベースから決めても，溶接中にギャップが変動する場合，一般に制御量（ビード高さ，アーク位置）が外乱の影響を受け，目標値に等しい制御量を得ることが困難になる．

外乱の影響を除くための方法としてフィードフォワード制御法およびフィードバック制御法がある．一般にはこれらを一つの系にまとめて，図(b)のように制御系を構成する場合が多い．フィードフォワード制御系（点線内）において外乱（ギャップ変動）をセンサにより検出し，これに適應して目標値どおりの制御量（ビード高さ，アーク位置）を得ようコントローラが

*原稿受付 平成12年6月27日

**正 員 埼玉大学 Member, Saitama University

図1 制御系の構成

操作量（ワイヤ送給速度（電流電圧波形），溶接速度）を調整する．このため，制御量は目標値を保つことができる．この方法は外乱に着目する方法で，それぞれの外乱について，考えなければならない．また，フィードバック制御系（破線内）において，センサにて制御量を検出し，これと目標値との間の偏差をなくすように，操作量を調整する．良好な制御結果を得るためには，制御量のセンシングが重要である．直接計測が困難なものに対してはニューラルネットワークにより，制御対象の動的モデルを構築し，これをセンサとして用いることができる．

3. 溶込み深さのファジィ・ニューラルネットワーク制御

3.1 溶込み深さのニューラルネットワークモデル（センサ）

薄板溶接における溶融池の溶込み深さをセンシングするために，ニューラルネットワークモデル（センサ）を構築する．まず，基礎実験において，CCDカメラにより66.6 ms毎に電極直下の池幅 w_0 ，その4 mm後方の幅 w_1 ，電極直下前方25 mmのギャップを撮影し，これらを計測する．その典型的な画像を図2 (a) および (b) に示す．つぎに，この基礎実験結果からニューラルネットワークの入力を決定する．定常状態において，ギャップ0 mm および1 mm のときの電流に対する池幅と深さの関係を図3に，溶込み深さの過渡応答を調べるために，起動時における応答を計測し，これを図4に示す．図3 および4の結果を用いて，溶込み深さは溶融池幅，ギャップおよび電流から推定する．

溶接速度を一定としたときの溶融池幅 w_1 と電流 u の関係は1次遅れ系の微分方程式にて近似すると

図2 ギャップおよび溶融池画像

図2 ギャップおよび溶融池画像

図3 定常状態における電流に対する池幅および溶込み深さの関係

図4 電流に対する池幅，溶込み深さの過渡応答

$$\frac{dw_1}{dt} = -\lambda w_1 + du \quad (1)$$

ここで， $\lambda = 0.83/s$ ， $b = 0.050 \text{ mm/As}$ となる⁶⁾．

コンピュータをコントローラとする場合には、一定周期（サンプリング周期） $T(=66.6 \text{ ms})$ 秒毎に電流 u は階段状に変化する。

$$u(t)=u(kT), kT \leq t < (k+1)T \quad (2)$$

(2)式を用い、前回の現代制御理論を用いて $t=(k+1)T$ における $w_1((k+1)T)$ を求めると

$$w_1((k+1)T)=pw_1(kT)+qu(kT) \quad (3)$$

ここで、 $p=e^{-\lambda T}$, $q=\frac{b}{\lambda}(1-e^{-\lambda T})$ であり、離散時間系の差分方程式（状態方程式）が得られる。

(3)式の池幅 w_1 と電流 u の関係を用いると、池幅のニューラルネットワークモデルは図5 (a) により表される。ニューロンの入力と出力の関係は線形 ($y=X$) であるとした。

溶込み深さ x は幅 w_0 , w_1 の線形結合で表されると仮定すると

$$x(k)=a_0w_0(k)+a_1w_1(k) \quad (4)$$

(3)および(4)式を用いて溶込み深さを表すニューラルネットワークモデルは図5 (b) となる。図3および4に示すように、電流に対する池幅と深さの関係は非線形になるので、図5 (b) を修正し、ギャップの変化も入力層に入れ、図6のニューラルネットワークを構築した。図3および図4の実験データを用いて、バックプロパゲーション法によりニューロンの重み w_i およびしきい値 θ を適切に調整した（学習）⁷⁾。

図5 ニューラルネットワークモデル

図6 溶込み深さの動的なニューラルネットワークモデル

3.2 溶込み深さのファジィコントローラの設計

図4の深さ x の応答は電流 u_0 に対して1次遅れ系の応答とみなして

$$\frac{dx}{dt} = -\lambda x + bu_0 \quad (5)$$

により表す。ただし、 λ は熱伝導率に、 b は入熱効率に相当する。まず、現代制御理論を用いてコントローラを設計する。溶込み深さ制御のブロック図を図7に示す。このシステムはギャップ（外乱）を検出し、これにより電流を調整するフィードフォワード制御系および溶込み深さをフィードバックし、偏差がなくなるように電流を調整するフィードバック制御系から成る。

目標値が単位ステップ入力 $r=1$ ($u_s(t)$) のとき、望ましい深さ応答を $x(t)=1-e^{-at}$ （時定数 $\frac{1}{a}$ ）となるようコントローラを設計する。図1 (b) において、フィードバック制御系におけるコントローラの伝達関数 $D(z)$ は

$$D(z)=\frac{1}{G(z)} \frac{X(z)}{z^{-1}X(z)-R(z)} \quad (6)$$

センサにおいて、1周期遅れ (z^{-1}) があるのは画像処理に20 ms 近く要するので、1周期66.6 ms 遅れて目標値と比較するからである。

溶込み深さ x の離散時間系の状態方程式は前節と同様に

$$x(k+1)=px(k)+qu_0(k) \quad (7)$$

ここで kT は k と略した。前回の制御理論を用いると(6)式は

$$D(z)=\frac{U(z)}{E(z)}=\frac{-(a_0+a_1z^{-1})}{1-b_1z^{-1}-b_2z^{-2}} \quad (8)$$

となる。ここで、 $a_0=\frac{1}{q}(1-e^{-aT})$, $a_1=a_0p$, $b_1=e^{-aT}$, $b_2=1-b_1$ である。前回の(18)式を用いて、これを離散時間系に書き改めると

$$u_0(k)=-a_0e(k)-a_1e(k-1)+b_1u_0(k-1)+b_2u_0(k-2) \quad (9)$$

これは現在出力すべき電流 $u_0(k)$ が現在の偏差 $e(k)$, 1周期前の偏差 $e(k-1)$, 1周期前の電流 $u_0(k-1)$ および2周期前の電流 $u_0(k-2)$ から決まることを意味する。

図7 溶込み深さ制御のブロック図

$b_1=1-b_2$ の関係を用いると (9) 式はつぎのように表せる。

$$\Delta u_0(k) = -c_0 e(k) + c_1 \Delta e(k) - b_2 \Delta u_0(k-1) \quad (10)$$

ここで, $c_0=a_0+a_1$, $c_1=a_1$, $\Delta u_0(k)=u_0(k)-u_0(k-1)$, $\Delta e(k)=e(k)-e(k-1)$ である。

(10) 式の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⁸⁾。また, (10) 式は出力すべき電流の変化分 $\Delta u_0(k)$ が現在の偏差 $e(k)$, 偏差の変化分 $\Delta e(k)$ および 1 周期前の電流の変化分 $\Delta u_0(k-1)$ から決まることを意味する。

まず, 溶込み深さが目標値より深いとき, 偏差 $e(k)$ ($=x(k)-r$) は正 (Positive) となる。もし, 偏差が変化していなければ, 偏差の変化分 Δe は 0 (Zero) となる。この状態において, 深さを目標値に一致させるため, 電流の変化分 Δu_0 を (10) 式の $-c_0 e(k) + c_1 \Delta e(k)$ より負 (Negative) とする。これを言語表現すると

If e is Positive and Δe is Zero then Δu_0 is

Negative.

となる。

同様に偏差 e および偏差の変化分 Δe の典型的な状態を考へて, これらと Δu_0 に関して 9 個の制御規則を作り, これを表 1 に示す。制御規則およびメンバーシップ関数 (図 8) を用いて, $e(k)$ および $\Delta e(k)$ から電流 Δu_0 を推論する。つぎに, これと 1 周期前の電流 Δu_0 を $b_2(=$

0.4) の重みを付けて引き算することにより, (10) 式の構造をもつファジィコントローラが得られる。

図 3 (a) と (b) を比較すると, ギャップの変化により, 溶込み深さが変化する。このため, ギャップ変動に合わせて, 電流を変える。これを行うために, ギャップ変動 ΔG から電流 Δu_1 をファジィ推論し, これを (10) 式に加算する。

$$\Delta u(k) = \Delta u_0(k) - 0.4 \Delta u_0(k-1) + \Delta u_1(k) \quad (11)$$

3.3 ニューラルネットワークモデルによるパラメタ学習と制御実験

熟練技術者が溶接を行うとき, 結果を確認し, 学習することにより, 溶接条件を調整している。しかし, 現代制御理論より構築したコントローラは設計時に制御パラメタを決定している。ファジィコントローラをインプロセスの適応制御に用いるとき, 良好な結果を得るためには, メンバーシップ関数の調整が重要である。ギャップを種々変えながら, 実験を行い, メンバーシップ関数を調整 (学習) することができるとは, これは時間がかかる。そこで, ニューラルネットワーク (NN) を用いて, ギャップと電流を与えることにより, 溶込み深さを求めるモデルを構築し, これを用いてメンバーシップ関数を学習する。制御性能を示す評価関数 J として, 1 秒間の偏差の 2 乗和 $\sum e^2$ と電流の変化分の 2 乗和 $\sum \Delta u^2$ との重み付け和を用いる⁹⁾。電流の変化分の 2 乗和も重み付けで加えたのは電流の振動変化を抑制するためのものである。

$$J = \sum_{k=0}^{14} (0.5 e_k^2 + 0.5 \Delta u_k^2)$$

J が最小なるようにファジィ変数 $e(k)$, $\Delta e(k)$, $\Delta G(k)$, $\Delta u_0(k)$, $\Delta u_1(k)$ のメンバーシップ関数を調整した。その結果を図 8 に示す。

例えば, 溶込み深さ 4.5 mm を目標値とする。これより溶込みが深いと図 4 に示すように電流が少し変化したとき, 溶込みは急に深くなる。これは (5) 式において, λ が小さくなったことに対応し, 系の時定数 $1/\lambda$ が大きくなることに対応する。早い深さ応答を得るために, 目標値よりも溶込みが深くなったとき, 電流制御のゲインを増加させる。すなわち, 図 8 に示すように e に関するメンバーシップ関数の形状は 0 に対して非対称となり, 偏差 e が Positive (目標値より溶込み深さが深い) のとき, 電流の制御ゲインが増加する。

ギャップが変化する場合の実験を行った。まず, 一定電流を用いて溶接したとき, 図 9 (a) に示すように 1 mm のギャップのところで溶落ちが生じた。一方, ファジィコントローラを用いたとき, 図 (b) に示すようにギャップ変動につれて電流が調整され, 概ね一定の溶込み深さが得られた。なお, 溶込み深さのニューラルネットワー

表 1 溶込み深さ制御するためのファジィ制御規則

$\Delta e \backslash e$	N	Z	P
P	Z	N	N
Z	P	Z	N
N	P	P	Z

P: Positive
Z: Zero
N: Negative

ΔG	N	Z	P
Δu_1	P	Z	N

$$\Delta u(k) = \Delta u_0(k) - 0.4 \Delta u_0(k-1) + \Delta u_1(k)$$

図 8 ファジィメンバーシップ関数

(a) 一定電流

(b) ファジィ制御

図9 溶接溶融池の溶込み深さ実験

図10 スイッチバック溶接法

クによる推定値は実測値にほぼ一致した。

4. ニューラルネットワークセンサによるアーク長、突出し長さ、トーチ位置・姿勢およびギャップのセンシング

多層盛り溶接において良好な溶接結果を得るためには安定な裏ビードと良好な溶込み形状を形成することが必要である。この目的のために、溶接トーチを10 Hzで揺動するだけでなく、図10のようにトーチを前後にスイッチバックのように動かす。これにより、安定な裏ビードを得ることができる。まず、トーチを溶接速度の2.5倍程度の速さで前方に動かし、母材のルートエッジにアークを当て、予熱する。また、溶融池上の熱源が前方に動くので、溶融池の温度が下がり、溶落ちを防ぐことができる。揺動幅はギャップと等しくし、溶滴および熱をルートエッジに与える。つぎに、ここに溶滴を溶着させるため、揺動中心は後退する。これにより溶着金属

が増加し、溶融池を形成する。溶融池の温度が上がり、溶落ちが生じる前に、トーチを前進させる。前進距離は後退の2倍であり、その速度は後退の3倍である。

トーチを開先内で揺動するとき、アーク長の変化にともない、定電圧特性あるいは垂下特性(定電流特性)の電源に従って、それぞれ電流あるいは電圧が変化する。従来のアークセンサは揺動半周期における電流あるいは電圧のいずれかを用い、この半周期の平均値の差を求めて開先内のトーチの位置偏差を求めるものである^{10,11)}。パルス電流のパルス幅を制御する場合などはその影響が現れる欠点がある。またアーク長、ワイヤ突出し長さを制御するためには、これらの動的モデルが必要である。ここではニューラルネットワーク(NN)により、電流、電圧およびワイヤ送給速度を用いてアーク長、突出し長さを求める。これらを用いて、トーチの位置ずれ、開先形状およびギャップ検出を行うとともにルートエッジが溶融金属でブリッジしたかどうかを検出する。

4.1 ニューラルネットワークによるアーク長及びワイヤ突出し長さの推定

突出し長さおよびアーク長の動的特性はワイヤ溶融、すなわち、ワイヤの温度分布に関係しており、これは今までに与えられた溶接電流、ワイヤ送給速度およびアーク電圧に依存する。従って、図11に示すように電流 i 、電流供給点電圧 v およびワイヤ送給速度 v_f の現在および過去50周期のサンプル値(サンプリング周期1 ms)から現在のアーク長 l_a およびワイヤ突出し長 L_a を出力するニューラルネットワークを構築する。これを図12に示す。図13の実験はルートギャップ4 mmでスイッチバック法の前進プロセスにおいて、ルートエッジに溶着

図 11 ニューラルネットワークアークセンサ

図 12 アーク長と突出し長さを推定するニューラルネットワーク

図 13 ギャップ 4 mm の前進時におけるアーク長および突出し長さの推定結果

図 14 ギャップ 2 mm の後退時におけるアーク長および突出し長さの推定結果

150 周期のデータが得られ、合計 $150 \times 6 = 900$ 種類の教師データが求められた。

バックプロパゲーション法を用いてニューラルネットワーク (NN) の重み w_i およびしきい値 θ を求め (ニューラルネットワークを学習し)、その NN の出力を図中□で示す。これは教師データと概ね一致している。さらに教師データとして用いていないテストデータに対して試験を行った。NN の出力と実験データが概ね一致しており、良好なニューラルネットワークが得られた。

アークはワイヤの先端から開先表面に最短距離において発生する。ギャップが広い場合において、ワイヤ先端が開先中心を左から右に通過しても、アークは同じ左開先面から発生し続ける。これは、アークが出ていない右開先面の温度が低いいため、陰極点が発生しにくくなっているためであると考えられる。ワイヤの先端が右開先ルートエッジ上方に達したときアークプラズマにより開先ルートエッジが熱せられ、陰極点が発生し、右開先面最短距離に、図 15 に示すようにアークがジャンプする。このアークのジャンプを検出することにより、右側の開先ルートエッジの位置がトーチ位置からわかる。同様に、ウィービングのつぎの半周期において、アークがジャンプするトーチ位置を検出することにより、左開先ルートエッジの位置がわかる。左右の開先ルートエッジの位置より、ギャップの大きさを求めることができる。

開先面上の陰極点はアーク長、ワイヤ突出し長さおよびトーチ位置から推定される。まず、 x 軸の原点を揺動中心とし、 y 軸の原点をチップ先端として、アークが左側の開先面からでているときの陰極点の位置を求める。トーチ位置 tp が溶接トーチの取り付けられたロ

量の無い場合であり、図 14 はギャップ 2 mm で後退プロセスにおいて溶着金属がギャップをブリッジしている場合である。6 種類の基礎実験を行い、各々において

図 15 開先形状および揺動中心位置ずれの推定

図 16 ギャップとトーチ位置ずれ

ボット手先軸のエンコーダパルスから計算される。これと NN により推定された突出し長さから、ワイヤ先端の座標を求める。つぎに、開先角度は 60 度であり、アークはワイヤ先端から開先面に対して最短距離（垂直）に出ている。これを考慮すると、開先面上の陰極点の位置 (x, y) は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} x &= tp - l_k \cos 30^\circ \\ y &= L_k + l_k \sin 30^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

一方、アークが開先の右側に出ている場合も同様の式により、右側面の陰極点の座標 (x, y) は、左側の場合と同様に計算される。

図 15 の実丸は推定された陰極点である。これらの点を用いて、最小二乗法により、開先の左側面とその右側面に沿う直線が計算される。左右の直線の交点が開先中心に対応する。これと揺動中心との差から位置ずれ（偏差） e が求められる。図 13 のアーク長および突出し長さを用いて、検出した偏差 e およびギャップを図 16 に示

図 17 開先形状の検出

図 18 溶接方向の回転方法

図 19 溶接線制御のブロック図

す。また、トーチ姿勢および開先角度が未知の場合にはワイヤ先端からアーク長の円弧およびそのエンベロップを描き、それらの接線を引くことにより、開先面を求めることができる。これを用いてトーチ位置・姿勢がわかる（図 17）。

4.2 溶接線追跡制御

スイッチバック溶接の前進時にギャップを求めて揺動幅を調整し、トーチ位置の偏差 e を求めて揺動の中心位置を開先中心に一致させるようにロボットモーションを制御する。また、溶接方向と溶接線がずれている場合、偏差 e が生じるため揺動中心位置の調整とともに、図 18 に示すように溶接方向も回転させる。

溶接線追跡のコントローラを現代制御理論により設計する。まず、ロボットを制御するためのブロック図を図 19 に示す。1 ms 毎に電流・電圧およびワイヤ送給速度を NN に与えて偏差 e を求める。これをロボットコントローラにサンプリング周期 (25 ms) 毎に出力する。一方、揺動一周期したときの揺動の midpoint のトーチ位置の偏差 e がわかるので、2 サンプリング周期 (50 ms) 遅れることを意味する。このため、センサの伝達関数は z^{-2} (2 サン

プリング周期のむだ時間) となる。

コンピュータはトーチを動かすためロボットコントローラに操作量 Δu_1 を送り出し、この積分値 u_1 により、トーチが動く。この移動距離を x とすると、 u_1 と x の関係は 2 次遅れ系の線形微分方程式により表すことができ¹²⁾、これは

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta\omega \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = \omega^2 u_1 \quad (13)$$

ただし、減衰定数 $\delta=0.8$ 、固有角周波数 $\omega=60$ rad/s である。

(13) 式を用いて、 Δu_1 と x との関係を伝達関数 $G(s)$ で表すと

$$G(s) = \frac{X(s)}{\Delta U_1(s)} = \frac{1}{s} \frac{\omega^2}{s^2 + 2\delta\omega s + \omega^2} \quad (14)$$

これを離散時間系の伝達関数に変換すると¹³⁾、

$$G(z) = \frac{q_0 z^{-1} + q_1 z^{-2}}{1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + p_3 z^{-3}} \quad (15)$$

ここで、 $\phi = \omega \sqrt{1 - \delta^2}$ 、 $p_1 = -(1 + 2e^{-\delta\omega T} \cos \phi T)$ 、 $p_2 = e^{-2\delta\omega T} + 2e^{-\delta\omega T} \cos \phi T$ 、 $p_3 = -2e^{-\delta\omega T}$ 、 $q_0 = -\frac{\delta\omega e^{-\delta\omega T}}{\phi} \sin \phi T - e^{-\delta\omega T} \cos \phi T + 1$ 、 $q_1 = e^{-2\delta\omega T} + \frac{\delta\omega e^{-\delta\omega T}}{\phi} \sin \phi T - e^{-\delta\omega T} \cos \phi T$ である。

コントローラは出力を計算するために、1 周期の演算時間が必要となる。これを考慮し、望ましい応答 $x(k)$ は図 20 に示すように、目標値の単位ステップ入力 ($r(t) = U_s(t)$) に対し、1 周期遅れで 17 周期 (有限時間) にて目標値に収束するようにした。望ましい応答 $x(t)$ の Z 変換は

$$X(z) = a_0 z^{-2} + a_1 z^{-3} + a_2 z^{-4} + a_3 z^{-5} + \dots + a_{14} z^{-16} + z^{-17} + z^{-18} \dots \quad (16)$$

離散時間系におけるコントローラの特性 $D(z)$ は図 19 より、

$$D(z) = \frac{\Delta U(z)}{E(z)} = \frac{1}{z^{-1}G(z)} \frac{X(z)}{R(z) - z^{-2}X(z)} \quad (17)$$

となり、 $r(t)$ の Z 変換 $r(z) = z/(z-1)$ 、(15) 式と (16) 式を上式に代入すると

$$D(z) = \frac{f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{17} z^{-17}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_{19} z^{-19}} \quad (18)$$

$f_0 = a_0/q_0$ 、 $f_1 = (a_1 - a_0 + r_1 a_0)/q_0$ 、 $f_2 = (a_2 - a_1 + r_1(a_1 - a_0) + r_2 a_0)/q_0$ 、...

図 20 17 周期の有限整定応答

$$d_1 = 1 + q_1/q_0, d_2 = 1 + q_1/q_0, d_3 = 1 + q_1/q_0, d_3 = 1 - a_0 + q_1/q_0, d_4 = 1 - a_1 + (1 - a_0) \cdot q_1/q_0 \dots, r_1 = 1 + p_1, r_1 = e^{-2\delta\omega T}$$

これを離散時間系に書き改めると、

$$\Delta u(k) = f_0 e(k) + f_1 e(k-1) + f_2 e(k-2) \dots + f_{17} e(k-17) - d_1 \Delta u(k-1) - d_2 \Delta u(k-2) \dots - d_{19} \Delta u(k-19) \quad (19)$$

現在出力すべき、操作量 $\Delta u(k)$ は現在の偏差 $e(k)$ 、1 周期前の偏差 $e(k-1)$ 、...17 周期前の偏差 $e(k-17)$ 、1 周期前の操作量 $\Delta u(k-1)$ 、2 周期前の操作量 $\Delta u(k-2)$ 、...19 周期前の操作量 $\Delta u(k-19)$ から決まる。このデジタルコントローラを用いて、60 度開先において、30 度で曲がる溶接線の検出・追跡を行い良好な結果が得られた。そのビード外観を図 21 に示す。

5. 動的システムのニューラルネットワークによる表現

(溶融池幅および冷却時間のニューラルネットワークモデル)

アーク溶接およびレーザ溶接において、溶接品質を向上するためには、溶込み形状の制御とともに、靱性 (粘り) および脆性 (硬さ) を適切に保持するための金属組織の制御が必要である。溶接金属は急速加熱、急速冷却を受け、その程度によって種々の異なった組織をなすが、溶接後の金属の組織や強さなどが予め期待する性質を持つためには、どのような冷却速度を選ぶべきかが重要なことである^{14,15)}。この冷却速度に強く影響するのが熱入力 $\eta VI/S$ の入力 ηVI (アーク電圧 V 、溶接電流 I 、入熱効率 η) と溶接速度 S である。

パイプ全周 TIG 溶接において、パイプ上の温度が再度 600℃ 以上になる現象を防ぐために双熱源 (溶接トーチ 2 本) を用いて図 22 に示すように溶接する。溶接はパイプの 0° から時計回り方向と反時計回り方向にて、同時

図 21 溶接線追跡結果

図 22 2本の溶接トーチ（双熱源）を用いた全周 TIG 溶接

に行く。ここでは溶融池幅と溶接線上の冷却時間 $t_{8/5}$ (800℃→500℃の時間) を溶接速度および溶接電流から推定するためのニューラルネットワークモデルを構築する。

5.1 熱伝導論に基づく溶接現象の数値シミュレーション

まず、熱伝導論に基づき、差分法を用いて TIG 溶接溶融池の数値シミュレーションを行う。つぎに、溶接電流と溶接速度を種々変えて溶融池幅および冷却時間を求め、これらを教師データとして溶融池モデルをニューラルネットワークにて構築する。さらに、このモデルを用いて望ましい一定の溶融池幅および冷却時間を得るための各部における溶接電流および溶接速度を決定する。

TIG 溶接では MIG 溶接と比較して溶融池現象に流れの影響が少なく、熱伝導が支配的であると考えられる。

温度 U に関する熱伝導方程式は

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (20)$$

である。ここで、 κ , ρ および c はそれぞれ母材の熱伝導率、密度および比熱である。

アークの温度分布特徴から円錐台状の熱源を仮定し、入熱領域内における各格子点での Z 軸方向の熱流束 E を次式に仮定する。

$$E = -\frac{0.48\eta VI}{7\pi} \quad (0 \leq r \leq 2.5) \quad (21)$$

$$E = -\frac{0.96\eta VI(1-0.2r)}{7\pi} \quad (2.5 \leq r \leq 5.0)$$

ここで、 r は入熱領域内の各格子点から熱源中心までの距離である。入熱領域の中心は母材の X 軸に沿って速度 S mm/s で移動する。

入熱領域内の境界条件は次式で与えられる。

$$-\kappa \frac{\partial U}{\partial z} \bigg|_{z=3.2} = E \quad (22)$$

それ以外の格子点では大気への放熱を考慮し、ニュートン冷却法則を用いて境界条件を与えた⁵⁾。パイプの全周溶接で母材が溶接線に対し、対称になっているので、熱源の中心から母材の片方だけを計算する。このとき、熱

図 23 溶接速度 5 mm/s, 溶接電流 115 A において、溶接トーチが 135 度および 225 度に達したときの温度分布

図 24 連続冷却変態曲線 (CCT) 図 [稲垣等]

源下の XZ 面は断熱条件となるので、境界条件は

$$-\kappa \frac{\partial U}{\partial y} \bigg|_{y=0} = 0 \quad (23)$$

(20) 式を差分法によって近似し、二相問題での相転移を考慮して、エンタルピ法により数値解析を行う。

図 22 において、双熱源がそれぞれ 135°および 225°の位置に来たときのパイプモデルの温度分布を平面に展開して図 23 に示す。溶融池と等温線は 180°両側で対称に分布しており、連続冷却変態 (CCT) 曲線を図 24 に示す。双熱源による同時溶接により、パイプ上至るところ CCT 曲線が単調になる。しかし、図 25 に示すように冷却時間 $t_{8/5}$ が不揃いになるが、靱性を確保するためパイプの各場所の冷却時間を 12 秒に制御するのが望ましい。

一定電流では 180°付近で双熱源による過入熱のため高温になり、そのために冷却時間は 180°付近で上昇する。溶融池幅および冷却時間を共に適正值にするためには溶接電流および溶接速度を同時制御する必要がある。この制御対象は非線形系であり偏微分方程式で表されるので、現代制御理論の適用に必要な線形微分方程式 (状態方程式) を求めるのは困難である。そこで非線形問題

図 25 双熱源による溶融池幅と冷却時間

図 26 冷却時間および溶融池幅のニューラルネットワークモデル

に強いニューラルネットワークを用いる。

5.2 溶融池幅と冷却時間のニューラルネットワークモデル

図 26 に示すような 3 層の階層型ニューラルネットワークモデルを構築する。溶接電流および溶接速度と溶融池幅および冷却時間の関係について考察するために、それぞれを NN の入力と出力に決定する。パイプの全周を 100 等分し、パイプの 0° から時計回り方向にパイプの半周までに 0 番地から 50 番地までの番号をつける。モデルの入力は各番地における溶接電流および溶接速度であり、モデル出力は各番地の溶融池幅および冷却時間である。

溶接電流および溶接速度を種々変えて溶融池幅と冷却時間を求め、これを教師データとし、NN の各ユニット

図 27 25 番の位置における冷却時間および溶融池幅を求めるニューラルネットワーク

図 28 25 番目の冷却時間および溶融池幅を求めるニューラルネットワークにおけるしきい値および重み

の重み w_i およびしきい値 θ を適切な値にバックプロパゲーション法により調整 (学習) した。

5.3 ニューラルネットワークモデルによる冷却時間の物理的意味

図 26 の出力層における 25 番目ユニットの出力 (溶融池幅および冷却時間) を求めるための NN を図 27 に示す。25 番目のユニットは中間層の 4 つのユニットに接続される。これら 4 つのユニット中、2 つに溶接電流が入力される。残り 2 つには溶接速度が入力される。

図 28 に示すように、入力層の各ユニットの重み (出力層で溶融池幅を求めるときは ww (1~4)、冷却時間を求めるときは wt (1~4) でそれぞれ表す) は溶接電流と溶接速度の中間層への貢献度を表すため、全部プラスの値である。中間層の各ユニットの重みは溶接電流および溶接速度と溶融池幅および冷却時間の関係を表している。溶接電流が大きいと溶融池幅は広がる。したがって、溶接電流が入力される中間層の 2 つのユニットの重み vw 1, vw 2 はプラスになる。溶接速度が速いと溶融池幅

は狭くなるため、溶接速度が入力される中間層の2つのユニットにおける重み w_{v3} , w_{v4} はマイナスの値になる。出力層の n 番地の溶融池幅は入力層の n 番地近辺の溶接電流および溶接速度が強く影響している。

溶接電流および溶接速度と冷却時間についても上記と類似の関係があるが、しかしながら、図28の中間層への重みの分布を調査すると、 n 番地の冷却時間は、 n 番地より15番地前方付近の溶接電流および溶接速度が影響している。これは熱源が n 番地を経過した後 $n+15$ 番地付近まで行ったときに n 番地の温度が 800°C 以下になるからと考えられる。

5.4 ニューラルネットワークモデルによる溶接電流および溶接速度の制御

望ましい溶融池幅および冷却時間をそれぞれ w_r および t_r とすると、溶融池幅の評価関数 j_w および冷却時間の評価関数 j_{ct} は

$$\begin{aligned} j_w &= (w_r - w_0)^2 + (w_r - w_1)^2 + \cdots + (w_r - w_{50})^2 \\ &= \sum_{i=0}^{50} (w_r - w_i)^2 \\ j_{ct} &= (t_r - t_0)^2 + (t_r - t_1)^2 + \cdots + (t_r - t_{50})^2 \\ &= \sum_{i=0}^{50} (t_r - t_i)^2 \end{aligned} \quad (24)$$

とするのが妥当である。

これらの評価関数の重み付き和 $J = 0.9j_w + 0.1j_{ct}$ が最小になるようにニューラルネットワークモデルに最急降下法を用いて各番地の溶接電流 I_n ($n=0\sim50$)、 I_n' ($n=49\sim15$) および溶接速度 S_n ($n=0\sim50$)、 S_n' ($n=49\sim15$) を決定する。望ましい溶融池幅 w_r が8mm、望ましい冷却時間 t_r が12秒一定になるための各番地の溶接電流および溶接速度を求めた。その結果を図29に示す。図においてすべての番地における望ましい溶融池幅および冷却時間を得るためには、最初溶接電流および溶接速度を共に比較的小さくし、前半部で徐々に大きくし後半部でまた共に徐々に小さくすることである。このような溶接電流および溶接速度を与えれば予熱、後熱を無くしても比較的良好な溶融池幅および冷却時間が得られる。

6. お わ り に

熟練技能者と同様に学習・トレーニング能力のあるファジィ・ニューラルネットワークを溶接システムのインプロセス適応制御に応用した。まず、薄板溶接における溶込み深さ制御、つぎにギャップおよび溶接線の検出と追跡制御を行った。さらにニューラルネットワークを

図29 冷却時間および溶融池幅を一定にするためにニューラルネットワークモデルを用いて求められた溶接条件

用い、溶融池および冷却時間のモデルを構築し、これを用いて最適溶接条件を導出した。

参 考 文 献

- 1) 大嶋, 山根: 最近の制御理論と溶接・生産技術への応用 (1), 溶接学会誌, vol. 69, No. 4, pp. 68-74.
- 2) Francis H. Raven: Automatic Control Engineering, McGraw Hill, 1978.
- 3) 大嶋, 山根: ニューロ・ファジィ制御によるロボット溶接の適応制御技術, 溶接学会誌, vol. 63, No. 7, pp. 38-44, 1994.
- 4) K. Eguchi, S. Yamane, H. Sugi, T. Kubota, K. Oshima: Neural Network to Arc Sensor, Science and Technology of Welding and Joining, The Institute of Materials, vol. 4, No. 6, pp. 327-334, 1999.
- 5) 金, 添田, 大嶋: ニューラルネットワークモデルによるTIG溶接溶融池幅と冷却時間の制御, 溶接学会論文集, vol. 14, No. 1, 92-98, 1996.
- 6) 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ィジタル制御, 溶接学会論文集, 第5巻, 第3号, p. 304, 1987.
- 7) D. E. ラメルハート, J. L. マクレランド他, 甘利監訳: PDPモデル 認知科学とニューロン回路網の探索, 産業図書, 1989.
- 8) 長谷川: 基礎制御理論 [1], 昭晃堂, 1990.
- 9) ファジィ・ニューラルネットワークおよび遺伝的アルゴリズムによる溶接ロボットの情報処理・制御, 日本溶接協会, ロボット溶接研究委員会, 1995.
- 10) アーク溶接の自動化技術, 溶接学会溶接法研究委員会編, 1995.
- 11) 牛尾, 毛, 杉谷: GMAWにおけるアークセンサの動特性の解析, 溶接法研究委員会資料, No. sw-2255 (1993).
- 12) 大嶋他: MIGパルスアーク溶接におけるアーク長のサンプル値制御, 溶接学会誌, vol. 51, No. 8, pp. 700-707, 1982.
- 13) 明石, 今井: 制御工学演習, 共立出版, 1981.
- 14) 大柴: 理論応用溶接工学, 森北出版, 1978.
- 15) 松廣, 稲葉, 黄地: キーホール溶接のモデル解析, 溶接学会論文集, vol. 11, No. 4, pp. 479-483, 1993.
- 16) 丸尾, 平田: パルスMIG溶接におけるビード形成現象, 溶接学会論文集 3-2 (1985).