ファジィ適応コントローラを用いたスポット溶接機の実時間制御

非会員 荒木 献次 (埼玉大学工学部)
学生員 陳 星橋 (埼玉大学大学院)

On-line Control of a Spot Welding Machine by Using a Fuzzy Adaptive Controller

Kenji ARAKI and Xingqiao CHEN (Saitama University)

Abstract: This paper describes a control scheme for on-line control of a spot welding machine. From the simulation of the soft-steel welding process by constant current, constant power and variable power methods with numerical analysis by FEM, nugget sizes etc. obtained are compared for these three methods. Variable power method is the best one for obtaining the biggest nugget and is used here as a reference (welding energy) model. And a fuzzy adaptive controller(FAC) instead of an usual fuzzy controller(FC) is developed and used for the improvement of the control accuracy of the spot welding machine. The membership functions of the fuzzy adaptive controller will be modified in real time with the adaptive algorithms according to distinct operating stages and working environment. Combining the reference energy model and FAC, a model reference fuzzy adaptive control(MRFAC) scheme is developed. The results of simulation and experiments with a dummy circuit of the spot welding system show that it is possible to control welding energy with on-line. Simulations also show that the control performance of the welding system with FAC becomes better than that with FC. And the experimental result indicates that the MRFAC system has also robustness for parameters changes, welding stage changes and disturbance.

キーワード：規範モデル、適応制御、ファジィ制御、ファジィ適応コントローラ、抵抗スポット溶接

1. はじめに

抵抗スポット溶接法は薄板鋼板の高効率で信頼性のある接合方法として、自動車をはじめ鉄道車輛、各種板金、家電製品などの工業製品の他、スポーツ用具、装飾品など金属の接合に幅広く使用されている。これら工業製品の外観と溶接の質向上のためには、スポット溶接機の知能化と実時間制御の開発研究が必要である¹⁾。しかし、今までのスポット溶接機制御のほとんどがオフライン制御で定電流制御である。近年、松山らによって溶接プロセスのシミュレーションが行われ、定電力制御が定電流制御に比べて、溶接可能電流領域が広くなり、この効果が厚板ほど顕著となることが明らかにされている²⁾。

本研究は、まず、松山と西口の抵抗スポット溶接のナゲット数値計算モデル^{2),3)}を用い、有限要素法によるシミュレーションにより、投入溶接エネルギー一定のもとに、定電流、定電力及び可変電力の各制御の場合に得られるそれぞれのナゲット径を算出し、各制御をナゲット径のサイズの面から比較し、可変電力制御が良いことを示す。この可変電力特性は、初期に大きな溶接パワーを投入し、後は指数関数状に減少させるものである。

次に、この可変電力特性を規範モデル（エネルギー

モデル）として、その出力をスポット溶接のプロセス制御系の目標値としたモデル規範形ファジィ適応制御系を構成する。ここでは、正確な数学モデルで記述し難い溶接プロセスに対して、ファジィ制御を導入する。しかし、普通のファジィコントローラ(FC)ではパラメータが固定されているので、制御精度があまり良くない。そこで、制御精度を改善するため、適応的なアルゴリズムで、ファジィコントローラのパラメータをオンラインで修正することを試みる。これをファジィ適応コントローラ(FAC)と呼ぶことにする。ここでは、FACの制御システムと普通のFCを用いたシステムとをシミュレーションにより比較し、更に、ダミー回路を用いた実験結果について述べる。

2. 溶接プロセスと規範エネルギーモデル

抵抗スポット溶接の制御システムの電気等価回路を図1に示す。被溶接板の等価電気特性はワークの等価抵抗(R_w)とインダクタンス(L_w)の直列接続された等価インピーダンス(Z_w)である。この等価抵抗のジュール発熱によって、溶接部は加熱され、ナゲットが造られる。

図1 スポット溶接システムの等価回路
Fig. 1 Equivalent circuit of a spot welding system

松山, 西口^{2),3)}の溶接部の温度を推定する有限要素法による数値計算モデルを用い(図2)、溶接ナゲットのサイズを計算する。ここでは、溶接板に投入する熱量(投入溶接総エネルギーは一定とする)は、溶接電流 $I_w(t)$ と電極間電圧 $V_w(t)$ で決まるエネルギー、あるいは、等価抵抗のジュール発熱量である。

図2 溶接ナゲットの数値計算メッシュ
Fig.2 Diagram of calculating nugget of a spot welding

被溶接板に投入するエネルギーとナゲットサイズの関係を検討するにあたって、次のことを配慮する。
1)発熱密度を適度にする。(a)溶接初期には、接触径の変化が激しく、発熱量あるいは電流密度が足りないとナゲットの形成が難しい。(b)電流密度が高すぎると、電極と板の間の散り、板間散りや表面のくぼみが生じる。(c)溶接後期には、発熱密度が高くと、溶込みが大きくなり、表面の美観や電極の寿命に影響がでる。
2)全プロセスを通じて、できるだけ熱損失を小さくして、エネルギー効率を高くする。
以上より、溶接初期にはナゲットを早く形成させるために大きなパワーを投入する。溶接中期には熱損失が小さく、ナゲットサイズを増大させ続けるため、大き目のパワーを投入する。また、溶接終期には、ナゲットの溶込みが大き過ぎず、電極の温度が高くなり過ぎないように、小さ目のパワーを投入する。以上のような可変電力特性の溶接規範エネルギーモデルを次式で与えることにする。

$$W(t) = W_0(h) \left(1 - e^{-\alpha(h) \frac{8k}{d^2} t} \right) \quad (1)$$

ここでは

d : 理想のナゲット径, $d = (5 \sim 6) \sqrt{h}$ (mm)

h : 溶接板の厚さ(mm)

k : 熱拡散率(mm^2/s), $\alpha(h)$: 補正係数 $\alpha(h) = 2h \pm 0.5$

$W_0(h)$: 投入するエネルギー(kWs) (ナゲットを造るのに要するエネルギーと損失エネルギーを考慮して求

める)

図3は式(1)の規範エネルギーモデルによる溶接と普通の定電流溶接あるいは定電力溶接を比較するために求めた溶接ナゲットの径と溶け込みを示す。この結果をみると、式(1)の可変電力特性の場合は、他に比べて、同じ投入総エネルギーに対して、大きなナゲット径が得られること、また、ナゲットの溶込みが大き過ぎず適当な値であることが分かる。

図3 各制御法によるナゲットの径と溶け込み
Fig.3 Nugget penetration and diameter with the different control methods

また、溶接部の接触状態や温度の変化によって、等価抵抗が激しくかつ不確定に変化し、ジュール発熱量と加熱効果はかなり変化し、溶接システムの入出力特性も変化する⁴⁾。軟鋼のスポット溶接シミュレーションの温度と接触径より推定したワーク等価抵抗を図4に示す。一例として、板厚 $h = 2.0\text{mm}$ の軟鋼、電極直径 $d_e = 8.0\text{mm}$ 加圧力 $F = 4.7\text{kN}$ 、溶接時間 $t_w = 0.6\text{s}$ の溶接プロセスに対し、推定した抵抗値 $R_s = 82.4\mu\Omega$, $R_p = 183.5\mu\Omega$, $R_w = 108.5\mu\Omega$ である。

図4 軟鋼の溶接中の推定抵抗値
Fig. 4 Estimated resistance of soft steel at spot welding

従って、スポット溶接のプロセスは多くの因子によって多様な影響を受け、非線形、不確定であり、線形微分方程式で正確に記述するのは難しい。一般に、スポット溶接は、溶接時間が1秒以下の場合が多く、スポット溶接のバッチプロセスは非常に短時間に終了し、この短時間の内にプロセスのパラメータ(例えば、被溶接部の温度が常温から1800Kまで変化する)が大幅に変動するので、状態変化が非常に速いと考えられる。その間に等価抵抗が激しく変化する。溶接の結果であるナゲットのサイズと溶け

込みをオンラインで測るのは難しい。従って、通常の制御理論を適用することは難しく、溶接機の実時間制御も困難になっている⁵⁾。

本研究では、シミュレーションより求めたナゲットのサイズと被溶接板に投入した総エネルギーの関係を考え、実時間制御するために、ナゲットのサイズの代わりに被溶接板に投入したエネルギーを測ることにする。この制御システムの入力も溶接エネルギーであり、出力は被溶接板（ワーク）の等価抵抗に投入したエネルギーである。この溶接プロセスを三つの時間帯で分け、システムの特性を考察する。図4に対応して、システムが立ち上がり、ナゲットが未だ形成されていない時期を溶接初期 $t \in (0, t_p)$ 、次にナゲットのサイズが増加している時期を溶接中期 $t \in (t_p, t'_w)$ 、溶接部の温度を保持する時期を溶接終期 $t \in (t'_w, t_w)$ と呼ぶことにする。この溶接規範エネルギーモデルの出力を溶接システムの制御入力として、被溶接板に投入するエネルギーを実時間制御することができる。

3. ファジィ制御とファジィコントローラ

3.1 ファジィ制御系の概要

ファジィ制御系の基本構成は、一般に、図5に示すようなフィードバック系である。制御誤差 $e(nT)$ とその微分値 $de(nT)$ を取り込み、ファジィ推論の後、操作量 $u(nT)$ が決められる。

図5 ファジィ制御系のブロック線図
Fig. 5 Block diagram of a fuzzy control system

通常、この制御方式のアルゴリズムにおいては、PD(Proportional and Derivative Algorithm)制御が行われることが多い。すなわちPD制御における操作量 $u(nT)$ は偏差 $e(nT)$ とその偏差の微分値 $de(nT)$ を用いて、次式のように記述される⁶⁾。

$$u(nT) = k_p e(nT) + k_D de(nT) \tag{2}$$

$$e(nT) = Y_r(nT) - Y(nT) \tag{3}$$

$$de(nT) = e(nT) - e[(n-1)T] \tag{4}$$

ここで、 k_p は比例制御係数、 k_D は微分制御係数、 $Y_r(nT)$ は目標値、 $Y(nT)$ はプラントの出力（制御量）である。

3.2 ファジィコントローラの基本構成

ファジィコントローラはファジィ化部、非ファジィ化部、知識ベース及びファジィ判断部の四部分か

ら構成されている⁷⁾。

図6 ファジィコントローラのブロック線図
Fig. 6 Block diagram of a fuzzy controller

ファジィコントローラの知識ベースといわれる部分には、制御ルール群が含まれている。このファジィコントローラは制御ルール群の各If部（前件部）に記述されている状態を入力とし、Then部（後件部）に記述されている操作量を出力として、操作量を決定する多入力多出力の非線形要素としてみなすことができる。たとえば、PD制御方式において、ファジィコントローラの入力 $e(nT)$ と $de(nT)$ は-1~+1の区間に正規化された状態量において、NB：負で、大、NM：負で中、NS：負で小、Z：ゼロ、PS：正で、大、PM：正で中、PB正で小、等のファジィ変数で評価する。七つの三角形ファジィメンバーシップ関数(MF)を用いた例を図7に示す^{6),8)}。2入力(e, de) 1出力(u)の場合、 i 番目のファジィ制御ルールは式(5)で示される。

$$R_i: \text{ If } e \text{ is } A_i \text{ and } de \text{ is } B_i, \text{ Then } u_i \text{ is } C_i \tag{5}$$

$$(i=1,2,...,N)$$

図7 入力変数のメンバーシップ関数
Fig. 7 Membership functions of input variables

以上のメンバーシップ関数とファジィ制御ルールを用いた場合、メンバーシップ関数の定義域（区間）は固定されていて、ファジィ集合区間も変化しない。過渡応答の誤差を小さくしようとすると、定常状態における安定度が損なわれ、定常状態の安定性を良くしようとすると過渡状態の誤差が大きくなることがある。特にシステムパラメータがよく変わる溶接プロセスの場合には、目標値に対して、常に良好な応答を得ることは難しい⁹⁾。したがって、ここでは溶接プロセスにおいて、溶接の各段階に要求される制御精度に対応して、ファジィコントローラのパラメータを適応的に修正する一種のファジィ適応コントローラを開発することにする。

4. ファジィ適応コントローラ設計

ここでは、制御システムの偏差とその微分値及び

溶接プロセスに応じて、ファジィ集合区間を調節し、更にファジィコントローラ制御出力ゲインを調節するような適応コントローラ（以下、これをファジィ適応コントローラ(FAC)と呼ぶ）について述べる。FACのメンバシップ関数は偏差、偏差の微分値および溶接プロセスによって自動的に修正される。すなわち、このメンバシップ関数の集合区間が制御対象の状態量によって適応アルゴリズムにしたがってオンラインで自動修正され、FACの入力の定義域が変化する。溶接の全プロセスを三つの時間帯 t_i 、即ち溶接初期 $t \in (0, t_1 = t_p)$ 、中期 $t \in (t_1, t_2 = t_w)$ 、および終期 $t \in (t_2, t_w)$ の溶接プロセス動特性に依存して変化する許容偏差（適応条件式）を考え、このファジィ集合のメンバシップ関数を式(6)のように変化させる。

$$\left. \begin{aligned} f(t, e, de) &= 1 - e^{-\gamma \sqrt{\alpha \bar{e}(t)^2 + \beta \overline{de}(t)^2}} \\ t \in (0, t_1); \quad \gamma &= \gamma_1; \quad \bar{e}(t) = \bar{e}(0), \quad \overline{de}(t) = \overline{de}(0) \\ t \in (t_1, t_2); \quad \gamma &= \gamma_2; \quad \bar{e}(t) = \bar{e}(t_1), \quad \overline{de}(t) = \overline{de}(t_1) \\ t \in (t_2, t_w); \quad \gamma &= \gamma_3; \quad \bar{e}(t) = \bar{e}(t_2), \quad \overline{de}(t) = \overline{de}(t_2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで定数 $\gamma_1 > \gamma_2 > \gamma_3$ 、 α と β は荷重定数である。

$f(t, e, de)$: ファジィ集合区間を表す関数

t_1 : 溶接プロセス中期の開始時刻

t_2 : 溶接プロセス終期の開始時刻

t_w : 溶接プロセス終了の時刻

$\bar{e}$: 設定された出力偏差(誤差)の許容値

$\overline{de}$: 設定された偏差の微分の許容値

溶接初期には、溶接板の等価抵抗が急激に変化し、ナゲットが未だ形成されておらず、偏差が多少大きくてもエネルギー損失は小さく溶接の質に与える影響が小さいので、かなりの誤差が許容される。それからパワーが減少してある程度小さくなるまでの溶接中期においては、誤差が溶接の質に影響するので、許容誤差は小さくなる。それ以後の終期においては、誤差はエネルギー損失とナゲットの溶け込みに影響するので、あまり許容誤差は大きくできない。

図8 FACのメンバシップ関数

Fig. 8 The Modified MF of FAC

以上の要求から、メンバシップ関数を図8のように修正する。図8において $1 \geq f(t_0) > f(t_1) > f(t_2) > 0$ である。

5. 抵抗スポット溶接機への応用

2章で求めた可変電力の溶接規範エネルギーモデルと4章で述べたファジィ適応コントローラを組み合わせて用いてスポット溶接機の新しいモデル規範形ファジィ適応制御システムを構築する¹⁰⁾。

5.1 溶接機のパジィ適応制御系

ここでは、規範エネルギーモデル、式(1)が溶接システムの入力となる。溶接電流と電極間電圧を測って投入のエネルギーをオンライン計算し、その目標値に従って、投入のエネルギーを制御する。しかし、この規範モデルを構築するにあたっては、溶接機の電力容量から決まってくるパワーの制限と電流の制限を溶接プロセスの各階段（溶接初期、中期、終期）毎に配慮する必要がある。溶接の最適条件は、これらの制限を考えて決める必要がある。溶接機の電気容量を考え、溶接プロセスの各段階に対応して電流制限値 I_i を配慮する($i=1,2$)。規範エネルギーモデルのもう一つの出力の最大値 $I_m(t)$ を考える。

$$I_m(t) = \begin{cases} I_1 & t \in (0, t_1) \\ I_2 & t \in (t_1, t_w) \end{cases} \quad (7)$$

図9 スポット溶接機のパジィ適応制御系

Fig. 9 Fuzzy adaptive control for the spot welding system

図9は、規範モデルとFACを用いたスポット溶接機のモデル規範形ファジィ適応制御系を示す。FACの出力はサイリスタの制御回路の入力となっていて、溶接の電流とエネルギーの実時間制御が行える。制御対象は図1のように、サイリスタの制御入力 $\hat{U}(t)$ のところから、ナゲットを造るために費やされる溶接エネルギー $Y(nT)$ までの電気系である。即ち、図9中の $G(t)$ はサイリスタと溶接トランス部分の伝達特性を示し、不確定部分は被溶接板の等価抵抗とインダクタンスである。 $Y_m(nT)$ と $Y(nT)$ はそれぞれ規範エネルギーモデルの出力と実際の溶接エネルギー出力（溶接電流と電極間電圧を測定し、等価抵抗を求めて算出）である。図9では、規範エネルギーモデル、FACなどはコンピュータで実現している。

5.2 ファジィ適応コントローラの実現

制御を実時間で行うために、高速化や低価格化を目指し、FACのアルゴリズムによる計算を事前に計算しておき、ルックアップテーブルとしてメモリに保存しておく方法を用いている¹¹⁾。溶接の全プロセスを初期、中期及び終期の3段階に分け、それぞれに対応して3種類のファジィ集合空間とメンバシップ関数を設けているので、ルックアップテーブルは全部で3頁になり、その中からFACの出力（操作量 $u(nT)$ ）が得れる。また、規範エネルギーモデルからの出力電流 $I_m(nT)$ (kA) と溶接電流 $I(nT)$ (kA) の差 $dI(nT)$ (kA) が変わる度にゲイン $\hat{C}_u(nT, dI)$ も再調節し、操作量を修正する必要がある。即ち、ルックアップテーブルから読み取った操作量 $u(nT)$ はそのままサイリスタを制御するのではなく、先ず $dI(nT)$ を次式で計算する。

$$dI(nT) = I_m(nT) - I(nT) \quad (8)$$

$$\hat{C}_u(nT, dI) = (1 - \eta |dI(nT)|) C_u$$

$$\text{when } nT \in (0, t_1) \text{ or } (t_1, t_2), \text{ if } \begin{cases} dI(nT) > 0 & \text{then } \eta = 0 \\ dI(nT) < 0 & \text{then } \eta = 0.3 \text{ or } 0.15 \end{cases}$$

$$\text{when } nT \in (t_2, t_w), \text{ if } e(nT) < 0 \text{ then } \hat{C}_u(nT, dI) = \frac{C_u}{(1 + 3|e(nT)|)} \quad (9)$$

ここで、ゲインの初期値 $C_u = 2.0$ 、 $\eta \in (0, 1)$ は係数である。修正した操作量 $\hat{U}(nT)$ は次式で求められる。

$$\hat{U}(nT) = \hat{C}_u(nT, dI) u(nT) \quad (10)$$

以上のように、式(6)により溶接の各段階でメンバシップ関数を修正し、式(9)によりFACのゲイン $\hat{C}_u(nT, dI)$ を算出し、これを式(10)に代入することにより操作量を修正して、システムに適応性を持た

せるようにしてある。FACの制御出力を求める過程を図10に示す。このようにして得られた $\hat{U}(nT)$ はサイリスタを制御する。ここでは、操作量は偏差、偏差の微分値および時間の関数で、溶接プロセス中に適応アルゴリズムの計算がオンラインで実行される。FACの情報処理と計算アルゴリズムのソフトのフローチャートを図11に示す。

$$t \in (0, t_w) \left\{ \begin{array}{l} (0, t_1) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} E \\ DE \end{array} \right\} [NB \rightarrow PB] \left\{ \begin{array}{l} dI > 0 \\ dI < 0 \end{array} \right\} \hat{C}(t) \\ (t_1, t_2) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} E \\ DE \end{array} \right\} [NB1 \rightarrow PB1] \rightarrow U(t) \\ (t_2, t_w) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} E \\ DE \end{array} \right\} [NB2 \rightarrow PB2] \left\{ \begin{array}{l} e(t) < 0 \rightarrow \hat{C}(t) \\ e(t) > 0 \rightarrow U(t) \end{array} \right\} \end{array} \right\} \rightarrow \hat{U}(t)$$

図10 ファジィ適応コントローラの出力算出過程
Fig. 10 Flowchart of output of FAC

図11 ファジィ適応コントローラのフローチャート
Fig. 11 Flowchart of FAC

5.3 実験結果と検討

ここでは、2.0mmの軟鋼板2枚の抵抗スポット溶接のダミーの電気回路を用いて、シミュレーションと実験を行った。溶接条件を次式に示す。

溶接時間 $t_w = 0.6(s)$
溶接エネルギー $Y(t_w) = 5.8 \text{ (kW)}$
コントローラの出力 $\hat{U}(nT) = 0 \sim 10 \text{ (V)}$
それぞれの段階に設けた許容偏差：
 $\bar{e}(0) = \pm 0.6(kW)$, $d\bar{e}(0) = \pm 0.3$
 $\bar{e}(t_1) = \pm 0.2(kW)$, $d\bar{e}(t_1) = \pm 0.1$
 $\bar{e}(t_2) = 0.1(kW)$, $d\bar{e}(t_2) = -0.1$
電流制限値 $I_1 = 12(kA)$, $I_2 = 18(kA)$

(11)

他の条件が同じ場合、普通のFCとFACをそれぞれ用いて、シミュレーションを行った。FCのメンバーシップ関数は、普通の方法のとおり、最大の許容誤差によってファジィ集合区間を設ける。FCのメンバーシップ関数は、FACの溶接初期のものと同じ関数を用いている。図12にシミュレーションの結果を示す。FCとFACを用いた場合の制御特性を比べると、溶接初期の誤差は両者に変わりがないが、溶接中期と終期の誤差はFCの誤差が大きくなっている。FACの場合は、溶接中期に溶接の質が保証され、溶接終期に電力損失が少なくなり、適当なナゲットの溶け込みが得られる。図13にダミー回路を用いたスポット溶接機の実験結果を示す。

図12 スポット溶接プロセスのシミュレーション
Fig. 12 Simulation of control process for spot welding

また、外乱（電源電圧変動）に対する実験も行った。普通、電源電圧 $v(t)$ が減少すると出力エネルギーも降下する。ファジィ適応制御の場合、ファジィ適応コントローラの出力を自動調節し、電流を適応制御し、プラント出力（エネルギー）の降下を押さえることができ、制御出力補償の効果をも有していることが、図14の実験結果よりわかる。電源電圧が

20%下がっても4サイクル後には、-2%の精度で目標値に追従しているのがわかる。

図13 溶接プロセスの実験結果（ダミー回路使用）
Fig. 13 Experimental results of control process for spot welding (with a dummy circuit)

図14 溶接機の電源電圧変動に対する応答実験
Fig. 14 Experimental results of anti-disturbance for power source variation of spot welding

1272

T. IEE Japan, Vol. 117-C, No. 9, '97

以上の実験結果より、ファジィ適応コントローラを用いて、溶接の初期に応答が早く、中期に偏差が小さく、後期に偏差が小さく電力損失の小さい制御が行われ、小さなエネルギー損失で良好なナゲットが得られることがわかった。電源電圧の変動に対しても、出力の変動を押さえることができ、外乱を打ち消す効果（ロバスト性）もあることがわかった。

6. おわりに

本論文では、まず、同じ投入溶接エネルギーに対し、可変電力溶接が定電流溶接、定電力溶接に比べて大きなナゲットサイズの得られること、溶け込みが適当であることを明らかにした。この可変電力特性より規範エネルギーモデルを作成した。また、この規範モデルを用いて、抵抗スポット溶接機のモデル規範形ファジィ適応システムを構築し、損失エネルギーの少ない、全プロセスの各段階にわたって指定した精度を保持する実時間制御が行えた。更に、このシステムについて、シミュレーションと実時間制御を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 適応ファジィコントローラを用いれば、溶接プロセスの各段階でメンバシップ関数が調節され、各段階での応答が改善され、過渡状態（溶接初期）に応答が良くかつ溶接中期と終期に偏差が小さくできることがわかった。
- 2) 溶接機電源電圧の変動に対して、ファジィ適応コントローラは適応的に制御出力を調節するので、ロバストな制御系が実現できた。

謝辞

本研究を進めるに当たって、定置型抵抗スポット溶接機をご提供戴いた(株)電元社製作所亀谷栄次社長に謝意を表します。また、スポット溶接の技術についてご指導を頂いた古館正人技術開発部長ならびに開発部上野和重氏に厚く御礼申し上げます。

(平成8年8月14日受付、平成9年3月19日再受付)

参考文献

- (1) 日本溶接協会: スポット溶接入門, 産業出版, 1986.
- (2) 松山欽一: 軟鋼抵抗スポット溶接におけるナゲット安定確保のための入熱投与形態制御とその効果. 電気溶接部会技術委員会, EW17-28-92.
- (3) 西口公之, 松山欽一: 簡易モデルによる処理速度の高速化数値計算モデルを利用した抵抗スポット溶接用ナゲット径モニタについて. 溶接学会春季全国大会講演概要集, Vol. 48, pp. 203, 1991年.
- (4) 陳星橋, 荒木献次: 抵抗スポット溶接のパワーモデル, 溶接学会, 平成7年講演概要第56集, pp. 162-163

- (5) 陳星橋, 荒木献次他: 抵抗スポット溶接のファジィ制御シミュレーション, 溶接学会, 平成7年春季全国講演概要第56集, pp. 164-165
- (6) 安信 誠二: ファジィ工学; 昭晃堂, 1993
- (7) Okyay Kaynak and Imre Rudas: Applications of Soft Computing Methodologies in Mechatronics, Proc. of Asian Control Conference 1994, 53/56
- (8) 管野 道夫: ファジィ制御; 日刊工業新聞, 1990
- (9) H. Takahasi, et al.: Application of a Self-tuning Fuzzy Logic System to Automatic Speed Control Devices; Proc. of 26th SICE Annual Conference II, 1241/1244 (1987)
- (10) I.D. Landau and M. Tomizuka: Theory and Practice of Adaptive Control Systems, 1979.
- (11) E. H. Mamdani: Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant; Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, 1585/1588 (1974)

荒木 献次 (非会員) 1958年 横浜国立大学工学部 機械工学科卒業. 1962年 東京大学生産技術研究所助手, 1966年同講師, 1970年 埼玉大学工学部 機械工学科助教授, 1984年同教授, 現在に至る. 1975年台湾清华大学招聘教授. 油空圧制御システムの知能化, 人間支援工学, 適応制御, 抵抗スポット溶接機の制御, 制御機器の開発等の

研究に従事. 工学博士 (1970, 東京大学). 1989年度油空圧機器技術振興財団学術論文顕彰, 1996年度日本油空圧学会学術論文賞を受賞. 日本油空圧学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会の会員.

陳 星橋 (学生会員) 1988年中国鉱業大学大学院電気工学専攻修士課程修了, 同年専任講師. ファジィ工学, 適応制御および知能制御の理論と応用の研究に従事. 1994年埼玉大学大学院理工学研究科博士後期課程入学, 現在に至る. 適応制御を中心とした制御理論およびその抵抗スポット溶接システムへの応用に関する研究に従事. 電気学会, 計測自動制御学会, 溶接学会学生会員.