特 集

ロボット溶接の
キーテクノロジー

① アークセンサの特性と将来技術の課題*

杉 谷 祐 司**

Characteristic of the Arc Sensor and its
Future Technology*

by Yuji Sugitani**

キーワード：アークセンサ，動特性，検出感度，周波数特性，開先ならい，
高速回転アーク，GMA，適応制御

1. は じ め に

アークセンサは，言うまでもなく，アーク溶接のために生まれたセンサである。別体としてのセンサを用いる必要がなく，溶接アーク自体をセンサとして用いるシステムであることが，リアルタイム制御性，耐久性（熱，光，スパッタ等），狭隘部へのアクセス性等，実用的な開先ならいセンサとして具備すべき要件に適合している。

アークセンサによる開先ならいの技術が出現したのは 1962 年米国においてである¹⁾。その後約 20 年後の 1980 年前後に我が国と米国で相次いで実用化が始められた²⁻¹⁰⁾。以来，生産現場の技術者とロボットメーカーが中心になって開発改良を重ねた結果，アーク溶接ロボットの重要なキーテクノロジーとして認識されるまでに発展してきた。しかしながら現状技術レベルに対して，開先ならい精度への不満は多く，開先制度不良に対応できる適応制御技術への期待も益々たかまっている¹¹⁾。また，アークセンサの研究が実用化思考に偏り過ぎたため，本質のアークセンサの特性が不明瞭なままとなっていることが今後の発展のさまたげになるとの指摘もある。

アークセンサは，トーチ高さ（電極-母材間距離）が変化するとアークの電流-電圧特性が変化するという基本的なアーク特性を利用して，開先ならいやトーチ高さ制御を行うものである。従ってアークセンサの利用においては電流/電圧波形の動的な諸特性を把握しておく必要がある。そこで本稿では

GMA 溶接におけるアークセンサの諸特性について検討しアークセンサの性能は何によって定まるかを明らかにしたい。また，アークセンサを用いた今後の技術課題として適応制御技術の一例を示す。アークセンサ技術の現状については，本誌等で多数報告されているので割愛する。詳細は文献（12～15）を参照されたい。

2. アークセンサの諸特性

2.1 アークセンサに関する特性式

アークセンサの特性は，溶接電源回路特性，溶接負荷特性，ワイヤ溶融特性によって支配される。これらに関する特性式を以下に示す。

(1) 電源回路に関する式

$$E_0 = RI + L_c \frac{dI}{dt} + V_t \dots\dots\dots (1)$$

ここで， E_0 溶接電源の無負荷電圧， R は回路の抵抗， L_c は回路のインダクタンス， I は溶接電流， V_t はトーチ電圧を示す。

(2) 溶接負荷に関する式

$$V_t = V_a + V_L \dots\dots\dots (2)$$

$$V_a = V_0 + XI + YI \dots\dots\dots (3)$$

$$V_L = aLj - bV_f/j \dots\dots\dots (4)$$

ここで， V_a はアーク電圧， V_L はワイヤ突出部の降下電圧， V_0 は陽極降下電圧と陰極降下電圧の和， X はアーク柱の電位傾度， Y はアーク特性線の勾配， l はアーク長， L はワイヤ突出長， V_f はワイヤ送給速度， a はワイヤの高温比抵抗， b はワイヤの通電前の比抵抗に依存する定数， j は電流密度 (I/S) を示す。

(4)式は Halmoy¹⁰⁾によって示された。

(3) ワイヤ溶融に関する式

*原稿受付 平成 6 年 8 月 8 日

**正 員 NKK エンジニアリング研究所 Member,
Engineering Research Center, NKK

$$V_f = AI + BLI^2 \dots\dots\dots(5)$$

$$= \frac{1}{H_0 + b} (\Phi I / S + aLI^2 / S^2) \dots\dots\dots(6)$$

$$dL/dt = V_f - V_m \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 V_m はワイヤ溶融速度、 H_0 は離脱直後の溶滴の保有熱量、 Φ はワイヤの溶融等価電圧、 S はワイヤ断面積を示す。(5)式はLesnewich¹⁷⁾、(6)式はHalmoy¹⁸⁾によって与えられた。

2.2 アークセンサの動特性(その1)ートーチ高さの急変による溶接負荷動作点の移動

GMA溶接では、トーチ高さ Ex が例えば減少すると溶接電流 I が増加し、トーチ電圧 V_t は減少する。この現象は、アークとワイヤ突出部から成る溶接負荷特性曲線と電源特性線との交点がFig. 1に示すように移動するためであり、これがアークセンサの基本原理解である。図を説明する。初期状態 P_0 点(アーク電圧 V_{a0} 、ワイヤ突出部降下電圧 V_{L0})よりトーチ高さが ΔEx だけ急減すると動作点は瞬時に P_1 点に移行し、以後 $P_1 \rightarrow P' \rightarrow P_f$ の曲線を描いて、最終動作点 P_f に移行する。この時回路の $L_c=0$ ならば $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_f$ のように移行する。 P_f 点はトーチ高さ Ex_1 ($Ex_0 - \Delta Ex$) に対する新たな負荷特性線と電源特性線の交点であり、この Ex_1 特性線は、 Ex_0 特性線に対して常に $X\Delta Ex$ だけ低電圧側にあり P_1 点を通る。従って、 P_f 点は P_0 点より高電流側にあり、電源特性線の垂下勾配(R)が大なる程 P_1 に近づく。この移行過程においてワイヤ突出長は常に減少し、電源特性線の下方部では溶接電流は増加し、溶接電流の減少時では、動作点は必ず電源特性線の上方を移行することは、式(1)、(7)から説明される。また、 P_f 点におけるアーク長 l_f は通常は初期状態 l_0 よりもやや短くなる。 l_f の値は電源特性線の勾配を図の α のように変化すれば $l_f=l_0$ とすることができる。また、式(2)~(6)で示した全ての常数によって変わる。これがアーク長の自己制御作用である。以上に示すアーク動作点の移動については文献(18~20)で報告されている。ここではこれらの報告を参考にしさらにワイヤ突出部の抵抗負荷も考慮して、溶接負荷動作点の移動を説明したものであり、これがアークセンサの動的特性の基本原理解となる。

2.3 定常状態におけるアークセンサの検出感度

Fig. 1の P_0 点と P_f 点ではアーク特性は定常状態である。これら2点間の溶接電流差 $I_f - I_0$ とトーチ高さの変化 ΔEx との比は定常状態におけるアークセンサの検出感度を示すものであり、この値は開先内で極めて低周波数のウィービングを行なった時の検出感度に相当し、近似的に次のように求めることができる。

まず式(5)を L で微分すると次式が得られる。

Fig. 1 トーチ高さの変化による溶接負荷動作点の移動(アークセンサの原理)

$$\frac{dI}{dL} = -\frac{BI^2}{A + 2BLI} = -\frac{I^2}{(\Phi S/a) + 2LI} \dots\dots(8)$$

定電圧式特性電源ではアーク長の自己制御作用が強く働くので、突出長の変化 ΔL とトーチ高さの変化 ΔEx はほぼ等しい。従って $dI/dL \approx dI/dEx$ となり、(8)式が定常状態におけるアークセンサの検出感度を示す。同式から、電流(ワイヤ送給速度)、ワイヤの比抵抗が大なる程、またワイヤ突出長、ワイヤ断面積が小なる程アークセンサの検出感度が高いことがわかる。Fig. 2にGMA溶接(軟鋼ワイヤ1.2φ、ワイヤ突出長20mm)における検出感度(dI/dEx)と溶接電流の関係(計算値)を示す。

2.4 アークセンサ検出感度の最大値

前項で示した式(8)は溶接条件を与えた時のアークセンサ検出感度の最小値を示している。一方、ウィービング周波数を極大に高め、かつ電源回路のインダクタンスを無視($L_c=0$)するとこの時の検出感度は最大値を与えることになる。この値を(dI/dEx)_{max}とすれば、この値はFig. 1より次のように示される。

$$\left\{ \frac{dI}{dEx} \right\}_{\max} = \frac{I_2 - I_0}{\Delta Ex} \dots\dots\dots(9)$$

ここで(4)式に示すワイヤ突出部の電圧-電流特性を直線とみるとその勾配は aL/S であるから(9)式は次式に近似できる。

Fig. 2 定常状態におけるアークセンサの検出感度 (計算値)

$$\left\{ \frac{dI}{dE_x} \right\}_{\max} = \frac{X}{R + Y + aL/S} \quad \cdots (10)$$

(10)式は、アークセンサの最大感度がアーク柱の電位傾度に対して比例的であり、電源の垂下勾配と溶接負荷特性線の勾配の和に対して逆比例的であることを示している。

2.5 ワイヤ溶融の動特性

Fig. 1 において回路のインダクタンス $L_c = 0$ では溶接負荷の動作点は $P_0 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$ と瞬時に移行し以後 P_2 点から P'_1 点まで電源特性線上を移行するがこの時のワイヤ突出長の変化は(5) (7)式より近似的に次式で与えることができる。

$$dL/dt = V_f - (AI + BLI^2) \quad \cdots (11)$$

(11)式の初期値は図の P_2 点における値で次式となる。

$$(dL/dt)_{t=0} = V_f - (AI_2 + BLI_2^2) \quad \cdots (12)$$

ただし I_2 は P_2 における溶接電流である。前述のように $\Delta E_x \approx \Delta L$ であるので(11)式のワイヤ突出長変化の時定数 T は次式で近似できる。

$$T = \frac{\Delta E_x}{V_f - (AI_2 + BLI_2^2)} \quad \cdots (13)$$

(13)式がワイヤ溶融の動特性を示す基本式となる。Fig. 3 に GMA 溶接 (軟鋼 1.2 ϕ) における T と V_f の関係を示す。

2.6 アークセンサの動特性 (その 2)

2.6.1 アークセンサの周波数応答

アークセンサ波形の振幅や位相におよぼすウィービング周波数の影響、回路インダクタンスの影響などに関する数学的解析が最近続々に報告されている²¹⁻²⁷⁾。

牛尾ら^{22,23)}は、アークセンサの動特性を定める電源回路および、ワイヤの動的溶融モデル、ワイヤ突出部の動的抵抗モデルに関して詳細に検討し、アークセンサ現象の数学モデルを明らかにしている。さらにこれらのモデルに基づいてトーチ高さの正弦波振動に対する溶接電流、トーチ電圧の周波数応答を数

Fig. 3 ワイヤ溶融の時定数とワイヤ送給速度の関係

値計算 (軟鋼 1.2 ϕ ワイヤ GMAW, $I = 280$ A) で求めた。Fig. 4, Fig. 5 にその結果を示すが計算は実験値とよく符合している。図から明らかにアークセンサの出力応答は周波数によって変動している。即ち、溶接電流については、約 5 Hz で感度は最大となり、一方位相はこの最大感度の周波数で同位相 (-180°) となり、その低周波側で進み、高周波側で遅れる。一方ワイヤ突出長の動的变化は 10 Hz 以上で認められなくなると述べている。これらの変化は低周波側でワイヤ突出部溶融現象が、高周波側でインダクタンスの影響が顕著であることを示している。一方、トーチ電圧については、感度は周波数に伴い単調的に増加する。位相は常に進むが数 Hz の所で最大進みとなっている。

開先内ウィービングにおけるアークセンサの電流波形が低周波数、低インダクタンスの場合には上り坂で電流が高く、下り坂で電流が低くなり、高周波数、高インダクタンスで逆になることは村上ら²¹⁾が動的解析により明らかにしているが、この現象は、Fig. 4 の位相特性で説明される。

2.6.2 電流、電圧波形の数値解析

高速回転アーク (回転直径 2 mm) によるアークセンサの電流、電圧波形を Fig. 6 に示す初期条件にて式(1)~(7)を用いて数値計算で求めた²⁸⁾。

Fig. 7 にワイヤ突出長の波形を示すが、周波数の増加に従って突出長の振幅は減少し、50 Hz ではほとんど変化しなくなる。位相も遅れて行くことがわかる。Fig. 8 は溶接電流波形と周波数の関係である。位相は 5 Hz の場合ほぼトーチ高さと同位相 (-180°) であり、それより高周波数側で遅れている。電流振幅も 5 Hz が最大である。Fig. 9 はトーチ電圧波形を示す。波形が正弦波でないのやや判別しにくい、位相は全て進んでおり、周波数の増加に従い同相側に近づいている。振幅は周波数の増加と共に増加するが、50 Hz と 500 Hz の差は小さい。以上の結果は Fig. 4, Fig. 5 と良く一致している。

Fig. 4 トーチ高さ変化における溶接電流周波数特性⁽²³⁾

Fig. 5 トーチ高さ変化におけるトーチ電圧の周波数特性⁽²³⁾

Fig. 10 は, Fig. 8 と Fig. 9 の値を用いて電流-電圧特性として示したものであり, 周波数の増加に従って電流の振幅は減少し, 電圧の振幅が増加することが明らかである。なお各周波数のループにおいて動作点は 2.2 項で説明した通り全て左まわりとなる。

Fig. 6 高速回転アークモデル

Fig. 7 ワイヤ突出長と周波数の関係

Fig. 8 溶接電流波形と周波数の関係

Fig. 9 トーチ電圧波形と周波数の関係

3. アークセンサによる溶融池現象の適応制御

アークセンサによる開先ならいの技術は今や実用化拡大の段階に達しており, 今後の重要な研究課題として溶融池の適応制御があげられる。ここでは筆者らが最近行なったキーホール式片面 GMA 溶接における溶融池の制御の方法^{29,30)}を紹介し参考供したい。

Fig. 10 電流-電圧特性と周波数の関係

高速回転アークを用い比較的高電流で片面溶接を行なうと Fig. 11 のようにアーク直下にキーホールが形成される。開先の幅やルート面の厚さなどが変化するとキーホールの大きさが変化して、これにつれて裏ビード形状も変化し、溶落ちや裏ビードの不良をまねく。高速回転アークの前 (C_f) と後 (C_r) のトーチ電圧波形は Fig. 12 のように検出できる。キーホールの大きさが変化すると C_r 部の電圧のみが比例的に変化する。ここにアークセンサの方法によりキーホールの変動が検出できることがわかった。次に必要な技術はキーホールが変動しないようにする為の溶接パラメータの制御方法である。実験は開先のギャップ変化に対して常に一定のビード高さを保持することを前提とし、Fig. 13 に示すように

Fig. 11 高速回転アークによるキーホール式片面溶接 (溶融池先端に作用する圧力の平衡)

Fig. 12 キーホール溶接時の電圧波形

Fig. 13 パラメータの制御方法による裏ビード制御効果

Fig. 14 溶融池適応制御における溶接パラメータ出力 (溶接速度 70 cm/min)

4 種類の制御方法を比較した。M4 はワイヤ送給速度のみで溶着量を制御すると共にアーク部の発熱 ($I \times V_a$) が一定となるようにトーチ電圧を制御する方法で、この制御方法によれば開先形状の広範な変化に対してキーホール形状、ビード形状を一定にできることがわかった。他の方法、溶接速度のみ制御する方法 (M_1)、トーチ高さ一定の条件で全てのパラメータを制御する方法 (M_2) は、いずれもギャップの変化に対して比例的にアーク部の発熱が増加するため、またワイヤ送給速度と溶接入熱を一定とす

る方法 (M_3) では逆にアーク部の発熱が減少して、その結果溶落ち (M_1, M_2)、あるいはキーホール (裏ビード) 消失 (M_3) を招く。 M_4 の制御法によると開先幅の変化のみならず、開先角度やルート面高さの変化にも同様に適応できる。Fig. 14 はギャップの変化する継手においてアークセンサでキーホールの変化を検出し、 M_4 の方法で制御した結果であり、全線にわたり良好な結果が得られた。

4. あとがき

アークセンサは溶接ロボット化のキーテクノロジーとして定着した。今後、開先ならいの信頼性の向上が必要であり、また溶融池のセンシングによる適応制御技術の確立が期待されている。さらには溶滴移行現象のセンシングへの発展も考えられる。アークセンサを有効に活用するためにはアークセンサの現象をよく把握しておく必要がある。そこで本稿ではアークセンサの基本的な特性について関連の文献を引用して解説した。次に溶融池現象のセンシングと適応制御に関して筆者らの研究を紹介した。読者の研究・開発の一助になれば幸いである。

参考文献

- W. J. Iceland: Seam Follower with Arc Scanner, U. S. Patent 3. 204. 081, 1962
- 奥ら：立向完全自動溶接，第 65 回溶接法委員会，SW-959-77, 1979.
- 高木，西田：開先線追従装置，特公昭 56-17992, 1976.
- 野村，杉谷：アークをセンサとした自動ならい方法（第 1 報），溶接学会全国大会 No 26, 1980.
- 野村，杉谷：アーク溶接法，特公昭 57-3462, 1977.
- 磯谷，横島：アーク溶接における溶接位置の自動制御方法，特開昭 54-106049, 1978.
- 永富，仁尾：アーク溶接ロボット MOTOMAN-L 10 のセンシング技術，省力と自動化 2 月号，1982
- P. Drews: Fungensteuerung beim Linchtbogenschweissen. Über das Ausmitzendynamischer Arbeitspunktbewegung zum Abtastender Schweissfuge beim mechanisierten MIG-, MAG- und UP-Schweissen. 'Verbindungstechnik', 1976, 8 (8-9), 35-39.
- C. F. Kushner et al: Method and apparatus for electric arc and analogous welding under precision control, US Patent 4151395, Published 24. 04. 79.
- G. E. Cook, G. J. Merrick: Weld Electrode Tracking System, 特開昭 56-11184, 1979 (US Patent). G. E. Cook: Research in Sensory feedback Control, IEEE Trans. Industrial Electronics, 30-3, August, 1983
- 各産業界におけるアーク溶接自動化技術の現状と課題，溶接学会溶接法委員会編，溶接学会誌 62-6, 1993
- 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，溶接学会溶接法委員会編，1990
- I. Masumoto et al: Development and Applications of Sensors and Sensor Systems for Arc Welding in Japan, IIW-XII-C-031-82, 1982.
- H. Wakamatsu et al: development and Applications of Sensors and Sensor Systems for Arc Welding in Japan, IIW-XII-962-86, 1986.
- 野村：アーク溶接用センサおよびセンサシステム，溶接技術，1985，6 月～11 月号。
- E. Halmoy: Wire Melting Rate, Droplet Temperature, and effective Anode Melting Potential, Int'l Conf. Arc Physics and Weld Pool Behavior, TWI, 1979.
- A. Lesnewich: Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal Arc Welding, Part-1 Control of Electrode Melting Rate, Welding J. 343-s, August, 1958.
- H. Nomura, Y. Sugitani: Investigation on Dynamic Characteristic in Low Frequency Pulsed MIG Welding, IIW-XIIF-189-78, 1978.
- 大嶋，阿部，窪田：周期的に変化する非線形特性の電源による強制溶滴移行アーク溶接法，溶接学会誌，50-8, 1981.
- J. L. Pan, et al: Adaptive Control GMA Welding-A New Technique for Quality Control Welding J., March, 1989.
- 村上，久貝，山本：溶接アーク長の動的解析とアークセンシングへの応用，アーク溶接におけるセンシングと制御，溶接法研究委員会編，II-89, 1990.
- 牛尾，毛：GMAW におけるアークセンサの動特性の解析，溶接アーク物理委員会，93-845, 1993.
- M. Ushio, W. Mao: Modeling Characteristics of the Through-the-Arc Sensor, Proceeding of Pre-Assembly Symposium of IIW 1994, 1-2 Sept. 1994, Dalian, China, Vol. 1.
- K. Inoue et al: Analysis of Detection Sensitivity of Arc Sensors in Welding Process, Trans. JWRI, 20-2-1991.
- M. E. Shepard, G. E. Cook: A Nonlinear Time-Domain Simulation of Self-Regulation in Gas Metal Arc Welding, Int'l Trends in Welding Science and Technology, Gatlinburg, Tennessee, June, 1992.
- M. E. Shepard, G. E. Cook: A Frequency Model of Self-Regulation in Gas Metal Arc Welding, Int'l Trends in Welding Science and Technology, Gatlinburg, Tennessee, June, 1992.
- G. D. Wu, R. W. Richardson: The Dynamic response of self-regulation of the Welding Arc, CWR Tech. Report, 529501-84-23, 1984, The Centre for Welding Research, Ohio State Univ.
- 杉谷，村山，向井：アークセンサの動特性（その 1），溶接アーク物理研究委員会，No-93-1862, 1993.
- 杉谷，毛：アークセンサによる片面溶接裏ビード形状の自動制御，溶接アーク物理研究委員会，93-829, 1993.
- Y. Sugitani, W. Mao, M. Ushio: Adaptive Control of Weld Bead Shape Utilizing Arc Sensor in One Side GMAW Process with Backing Plate, IIW Doc, XII-1360-94.