技術資料

キャンペーン特集

接合・加工プロセスのセンシングと制御

溶接プロセスにおけるセンシング技術の現状**

井手 栄 三**, 藤 村 浩 史***

The Present Sensing Technique in Welding Process.*

by Eizo Ide**, Hiroshi Fujimura***

キーワード: 溶接プロセス, センシング, センサ, 溶接線, ならい, インテリジェント, マイクロエレクトロニクス, 情報処理, 超音波, 自動化

1. はじめに

溶接の良否は直接製品の品質に影響するため、オペレータには高度な知識と熟練が要求されるにもかかわらず、作業環境は典型的な3K職場であり、時代背景の変化と共に人材の確保が難しくなっている。このため溶接の自動化、ロボット化は他の分野に先がけて積極的に進められており、各方面で大きな成果が得られている。

溶接を自動化する場合、制御に必要な情報を得るためのセンサ技術が重要なことは自明のことであり、自動化の進展はセンサ技術の開発と密接な関係にある。

最近のエレクトロニクス、情報処理技術の発達はめざましく、これらの技術に支えられているセンサ技術もまた加加速度的に進歩すると考えられる。

本稿では、これまでに開発され、自動溶接装置に実用されて来たアーク溶接用センサ技術を主にレビューし、続いて今後期待されるセンサ及びその機能、さらには高密度エネルギービーム溶接(EBW, レーザ溶接)のセンシング技術についても述べる。

2. アーク溶接用センサ

自動溶接装置はメカニズムとエレクトロニクスが合体したいわゆるメカトロニクスシステムである。図1にシス

テムの5大要素を示すが¹⁾、センサなくしてシステムは成立しない。センサーは物理、化学量を電気量に変換するデバイスであり、さまざまな原理にもとづいて作動するが、溶接用センサとしては次の条件を満足しなければならない²⁾。

- (1) 溶接プロセスに対応した精度を確保できること
- (2) 溶接プロセスによる外乱(光, 熱, ヒューム, スパッタ, 電磁気など)の影響を受けない
- (3) 十分な耐久性がある
- (4) コストが安い
- (5) メンテナンスが容易である
- (6) コンパクト(小型, 軽量)である
- (7) 汎用性が高い

次に、センサの検出目的は次の2つに分けられる³⁾。

(イ) 溶接操作環境の測定, 検出

(ロ) 溶接過程の監視, 検査

(イ)は被溶接材の形状、溶接線の位置とその変動、開先形状など、溶接過程が進行する環境条件を事前に測定、検出しようとするものである。

(ロ)は溶接過程の進行が適正か否かを監視、検査するもので、形成されたビートの良否、欠陥発生の有無などのインプロセス検査もこの範疇に入る。

ここでは、これまでに開発されて来た1) 溶接線ならい用センサ、2) 溶接条件の制御用センサ及びセンサシステムについてまとめてみる。

2.1 溶接線ならい用センサ

センサの種類は接触式と非接触式とに大別されるが、ここではさらに作動原理で分類する。

*原稿受付 平成3年1月25日

**正 員 三菱重工業(株) Member Mitubishi Heavy Industry

***正 員 三菱重工業(株) Member Mitubishi Heavy Industry

(a) 人およびメカトロニクスシステムの5大機能

(b) メカトロニクスシステムの5大要素

図1 人とメカトロニクスシステムの5大要素

2.1.1 機械的ガイドローラ

溶接する開先または基準となる板をガイドローラが機械的に追従する方式で、センサとして最も単純で、早期から用いられている。しかし、検出位置とアーク点とが離れているために、直線状の継手と一定の曲率の継手にしか使用できないこと、ならうべき開先または板に突起物などの障害物があれば外乱として直接誤差となること、バネ、エアシリンダー、偏向車輪などローラ押付機構の作動不良になりやすいことなどからあいまって一般的に信頼性が低い。

図2及び図3は、サブマージアーク溶接で前者がV型開先の直線継手へ、後者がスミ肉溶接へ適用された例⁴⁾である。

図2 開先ガイド用ローラ

2.1.2 電気信号検出接触プローブ

ならう開先にプローブを接触させ、開先とプローブとの相対的な位置変化を電気信号で出力するセンサである。

このセンサには各種の検出方式⁵⁾があり、ここでは2自由度の電気接点式と差動トランス式を図4、図5に示す。

また、機械式ならいと同様、アーク点と位置とが離れているが、これを改善するために記憶遅延再生方式及び教示再生方式と呼ばれる方法⁶⁾が使用されることもある。

2.1.3 光学式センサ

人間が得る情報の大部分は視覚から得ていると言われる。光学式センサは視覚に対応するものもあり、これまでも本センサを用いた多くの試みがなされて来た。初期の光学式センサに、ガス切断に多用されているアイトレーサの原理を溶接線ならいに応用したもの⁷⁾がある。これはあらかじめ、ならう開先線と平行に白線を描いておき、この白線上を溶接ヘッドに連結したアイトレーサでならうものである。(図6)⁷⁾

光学式センサは、用いる受光面光電素子の配列によって、(a) ポイントセンサ、(b) リニアセンサ、(c) エリア(画像)センサに大別される(図7)²⁾。図8⁷⁾はエリア

図3 SW 101 の溶接機の例

センサを用いた光切断法による開先ならいシステムの1例を示す。

2.1.4 電磁気センサ

図9²⁾は電磁気センサの原理で、被検出物から検出コイルまでの距離(H)とアナログ出力電圧(V)とが直線関係にあることを示す。このセンサをならい制御に適用した例を図10²⁾に示す。

電磁気センサを用いたシステムは実際の生産現場でも

図 4 電気接点内蔵接触式プローブの 1 例

図 5 接触プローブ

図 6 光電素子を用いる方式の例

(a) ポイントセンサ

(b) リニアセンサ

図 9 電磁気センサ

(c) エリアセンサ

図 7 光センサによるならい制御

多用されている。

2.1.5 アーク現象を利用する方法

溶接アーク現象が変化する時、そのパラメータ（溶接電流、アーク電圧、給電チップと被溶接物間との距離など）の変化を検出または演算して溶接線ならい及び溶接条件制御に利用する方法である。本法は、1) アーク位置と検出位置が同一である、2) 溶接ヘッドのまわりに特別のセンサを装備する必要がない、3) ワイヤ湾曲の影響を受けないなどの長所がある一方、オシレーションが必須のため溶接条件が制約されるなどの欠点がある⁸⁾が、現在ロボット溶接、自動溶接に広く利用されている。

2.1.6 溶接ワイヤ接触式センサ

溶接を行う前に溶接の開始点や終了点を検出するため

図 8 光切断方式の 1 例

図 10 電磁気センサによる非接触制御

のセンサで、前途の接触プローブの発展型とも考えられるが、溶接ワイヤ (TIG 溶接では W 電極) を用いるのが特徴である。図 11⁹⁾に示すのは溶接ワイヤが開先面と接触した時の電流または電圧の変化を検出して、あらかじめ与えられていた開先形状情報と接触位置から溶接適正位置を割り出す方式である。

2.1.7 超音波センサ

超音波センサは光学式センサと同じく非接触式であるが、最近では小型化・高精度化が達成せられている。超音波センサは、振動子から発信された超音波が空气中を伝わり対象物に到達した後、反射波となってセンサ部に戻ってくるので、送信波が発振されてからセンサ部に反射波が届く時間 (t) を求めることにより、対象物とセンサ間の距離に換算するのが動作原理である。この時、距離は次の式で表わされる。

$$\text{測定距離} = \text{測定時間}(t) \times \frac{\text{音速}(v)}{2}$$

精度を上げるために、極めて波長が短い超音波パルスを用いており、表 1 に代表的な仕様の一例を示す。

本センサは、アーク溶接ロボットのアームに対する障害物、溶接トーチの障害物等の検出や溶接開先に対するトーチの位置センサへの利用が考えられる。

これまでに述べた以外のシームならいセンサとして

図 11 電極接触センサ

は、シールドガスと同種的气体を用いて狭開先溶接の左右ならいに適用した流体センサ⁹⁾が報告されている。

2.2 溶接条件制御センサ

アーク溶接プロセスの調整、制御のための操作量には次のものがある¹⁰⁾。

- A: 溶接電流, アーク電圧, アーク形状
- 溶接速度, ワイヤ送給速度
- シールドガス流, 駆動ガス, フラックスの供給量
- 溶接トーチの位置と姿勢
- 溶接材の位置, その傾き
- バックング操作
- B: 溶接接合部の溶け込み深さ
- 溶融幅
- 溶融部の断面積や形状
- ビードの外観
- 応力発生状態

アーク溶接で良好な結果を得るためには上記 B などの因子を適正範囲に保つ必要がある。しかし、これら因子にはオンライン計測が困難なものもあり、結果的には上記 A などの操作項目と B の因子との相関に基づいて操作項目をリアルタイム制御することになる。

ここでは、アーク特性を利用した溶接速度制御システムと光学式センサを用いて裏ビード幅を自動制御した例を示す。

2.2.1 立向溶接における溶接速度制御システム

エレクトロガスアーク溶接において、溶接ヘッド (台車) を上昇させるためにアーク特性を利用するものである。一定のワイヤ送給速度に対して、ワイヤ突出し長さが変化すると溶接電流が変化するので、この電流が予め設定した値になるように上昇モータを制御する。図 12⁶⁾に制御例を示す。

2.2.2 片面溶接における裏ビード幅制御システム

片面サブマージアーク溶接で安定な裏ビードを得るのに、溶融金属保持のために用いる水冷銅裏当金に受光素子 (cds) を埋め込み、裏面に到達するアーク光を検出し、受光レベルを一定にするように溶接電流を帰還制御する方式が開発、実用化されている¹¹⁾。(図 13)

上記と同じ原理を用いた TIG 片面溶接における裏ビード幅制御も報告されている¹²⁾。

図 12 溶接速度制御の 1 例

図 13 片面 SAW の裏ビート制御回路

3. 新しいセンサ

アーク溶接作業で人間が介入する割合が小さくなる程自動溶接装置に要求される機能は多く、かつそのレベルも高くなる。1. で述べたように、情報処理技術及びそれに基づく制御技術が高度に発達した現在、人間の感覚器に相当するセンサの開発が溶接の自動化到達レベルを左右すると思われる。人間が外界から得る情報の大部分は視覚によっており、自動溶接装置にとっても3次元の視覚センサが、今後溶接アークの位置制御及び溶接プロセス制御に大いに用いられて行くと考えられる。視覚センサ技術を支える要素には、光学フィルタ系を含むカメラの小型化及び光学的ダイナミックレンジの拡大と共に、検出した画像処理時間の短縮化が必要であるが、後者はコンピュータの処理技術の向上により実用化域に達している。さらに、最近の動向として複数のセンサからの情報を処理した後、これらを融合して判断をするインテリジェントセンサシステムと呼ばれているものが出現している¹³⁾。マイクロエレクトロニクスと情報処理技術の進歩により、センサの小型化、集積化複数センサからの情報の統一融合が可能になったのが出現の理由である。溶接アーク近傍の過酷な環境を考慮すれば複数のセンサが互いに短所をカバーし合って、目的とする情報を得る上記のシステムは有効と考えられる。本システムの特徴を具体的に述べると次のようになる。

1) 複数のセンサからの出力情報を総合的に処理して1つの被測定の情報を入力する一センサヒュージョンと情報処理

2) 計算機による情報処理—ソフトウェアの重要性

表 1 超音波センサの 1 例

センサヘッドの大きさ	外径 23mm、奥行き 25mm
測定範囲	50~300m
分解能	0.3mm
最小検出物体	0.5mm ^φ (100mm にて)
サンプリング周期	1.5 回/秒
使用周囲温度	0~40℃

3) 1), 2)の結果として、人間の知的行動を代行するシステムの実現—機械による知的操作の実現

4) 単一のセンサからの出力では決定できない被測定量の認識をシステムで実現—情報を統合する知的活動の実現

最近、対象システムの厳密な数式モデルがわからなくても、オペレータの経験やシステムの特性などのあいまいな情報を処理して制御に用いるあいまい制御が各分野で実用に供されているが溶接線のならい制御へ適用した例がある。¹⁴⁾

本制御法は人間の感性に近い制御ができると云われており、さらに多入力、多出力も可能であるため、センサ本体の開発は必要であるが溶接線ならい、溶接プロセスの監視などへの展開が今後大いに期待される。

4. 高密度エネルギービーム溶接のセンシング

現在、高密度エネルギービーム溶接として実用されている電子ビーム溶接、レーザービーム溶接の溶接線ならいセンサについて述べる。

両溶接法ともアーク溶接の千倍以上の高エネルギー密度でシャープな溶け込みを生じるため、ビームの溶接線追従には高精度が要求される。

4.1 電子ビーム溶接の溶接線検出¹⁵⁾

電子ビーム溶接は溶融幅が狭いために、正確な電子ビーム位置制御が必要である。溶接位置検出精度及び制

図 14 溶接線検出システム

図15 3次元画像認識機能を備えた集光照射ユニット

御の点から、溶接のエネルギー源である電子ビーム自身を溶接位置の検出プローブに用いる次の方法がある。溶接物の表面を微小電子ビームで偏向走査し、発生するX線や反射電子の信号をCRTの画面に表示して、リサージュ・パターンから溶接位置を検出する。図14は^{16,17)}突合せ溶接の場合、ビームの偏向量が零の位置にマークが表示されており、くぼみの位置とマーク位置とが一致するように溶接物の位置を合わせると、ビームは溶接線を正確に照射する。

4.2 レーザ溶接の溶接線検出¹⁵⁾

レーザ溶接に用いるビームのスポット径は通常1mm以下であり、シーム溶接線には高精度位置合わせをしてビームを照射する必要がある。図15¹⁸⁾は3次元視覚認識機能を備えたCO₂レーザー溶接ヘッドの例である。アルゴンイオンレーザービームを2軸ガバナノメータでワークピース上にラスタスキャン照射する。この輝点軌跡をセンサから画像信号として取り込み3次元画像処理を行い、ワークピースの位置とCO₂レーザービーム照射点との相対位置を求める。この3次元視覚認識システムを自動的溶接位置決めシステムに組み込み、シーム溶接線に沿った実時間トラッキングなどを行うことが可能である。

5. あとがき

熟練した溶接士は溶接状況を目と耳で判断しているが、一般に“視力が衰えると溶接の腕が急に落ちる”と云われているように目からの情報が大半を占めていることは明らかである。目に相当するセンサは光学式センサであるが、人間の視覚は三次元的なパターン認識力に優

れるだけでなく、溶融池周辺の“溶けぐあい”とか“スラグの流れ方”と云った動的な要因をも重要な情報として取り込んでおり、同等の機能を視覚センサシステムとして完成させることが望まれる。

また、人間は視覚・聴覚から得られる情報と前もって把握しておいたマクロ的情報とを照らし合い総合的に判断しているわけであるが、センサとしてはCAD・CAM情報、電流電圧変化、溶接部近傍の温度分布など、人間の感知し得ない情報もリアルタイムで入手できるわけで、3.で述べたファジー制御やニューロコンピュータなど多元情報処理に適した手法を活用すれば、人間と同等あるいはそれを越えるセンサの実現も可能ではなかろうか。

参考文献

- 1) メカトロニクスシリーズ入門編メカトロニクス入門; 日本機械学会編, 技報堂出版
- 2) アーク溶接におけるセンシングと制御; 溶接学会, 溶接法研究委員会編, 第1編 総論
- 3) 井上; アーク溶接ロボット用センサー; 本誌51-9 (1982), 735-741
- 4) S. B. Jones; Mechanical Approaches to Seam Tracking for Arc Welding, T. W. I. Research Rep.
- 5) 野村; アーク溶接用センサ及びセンサシステム, 溶接技術, 1985-7, 39-43
- 6) 益本ら; 我が国におけるアーク溶接用センサ及びセンサシステムの現状-, 本誌52-9 (1983), 339-347
- 7) 野村; アーク溶接用センサ及びセンサシステム, 溶接技術, 1985-9, 65-69
- 8) 野村; アーク溶接用センサ及びセンサシステム, 溶接技術, 1985-8, 79-83
- 9) 辻ら; 狭開先ミグ溶接機の自動ならい装置, 日立造船技報, 41巻2号 (1980)
- 10) 荒田ら; アーク溶接の自動制御-, 本誌41-6 (1972), 613-648
- 11) NOMURA et al; Penetration Control in One Side Submerged Arc Welding, IIW Doc. XII-K-99-79
- 12) 野村ら; ステンレス鋼管のTIG片面溶接における裏ビード自動制御, 第64回溶接アーク物理委, 昭和56年7月
- 13) 大場; インテリジェント・センサ技術, オーム社
- 14) アーク溶接におけるセンシングと制御; 溶接学会, 溶接法研究委員会編, 第II編 各論
- 15) 溶接・接合便覧; 溶接学会編, 丸善株式会社出版, 1990
- 16) G. Sayegh, et al; Automatic Alignment of E. B. on Joints Application of Welding Tube to tube Sheet in Heat Exchangers, Proc. Int Conf. on Welding Research in the 1980's, A (8) (1980) 43.
- 17) 安永ら; 電子ビーム溶接における溶接線検出法の研究, 溶接学会論文集, 3-1 (1985), 16
- 18) G. T. Forrest; Closed-loop Robotic Laser Welder for the NAVY, Laser Focus, 23-4 (1987), 158