特 集

ロボット溶接の
キーテクノロジー

② 視覚センシング技術*

藤田 憲

松本 長

藤 田 憲**, 松 本 長**

VISUAL SENSING TECHNOLOGY*

by Ken Fujita** and Osa Matsumoto**

キーワード：アーク溶接，視覚センサ，CCD カメラ，
レーザ変位計，レーザスリット光

1. 結 言

近年，アーク溶接ロボットの普及は著しいものがあり，ロボット用のセンサとしては，ワイヤタッチセンサやアークセンサが実用化されている。

しかしながら，圧力容器や原子力部品等を溶接する場合には，より高品質な溶接を要求されるため，完全に自動化され，無人で溶接される対象物はごく限られている。

そのため，当社では，この問題を解決するため，熟練溶接士に変わって溶接の自動化・無人化のため各種研究を従来から進めてきた。特に，視覚センサについては溶接中の複数の検出対象を同時に抽出できることより，人間の目に置き換わるものとして注目し以前から研究を進めてきた。

本稿では，視覚センサの概要と，当社における視覚センサの開発事例について紹介し，視覚によるセンシングの限界について述べた。

2. 視覚センサの種類と機能

アーク溶接用の光センサとしては，ポイントセンサ，リニアセンサ，及びエリア（画像）センサがあり，このうち一般的に視覚センサ（ビジュアルセンサ）と呼ばれるものは，リニアセンサとエリアセンサがある。これら光センサによる倣い制御の例を図 1 に示した¹⁾。

リニアセンサは，母材からの光を 1 次元で検出するもので，デジタル素子として CCD, MOS を用い，

アナログ素子では，PSD を一般的に用いている。

エリアセンサは，母材からの光を 2 次元で検出するもので，ITV（撮像管），2 次元にデジタル素子を配置した CCD, MOS 等が利用されている。

これら視覚センサは，これから得られる情報を利用して，次のような制御システムに利用されている。

(a) 溶接線の倣い制御，(b) 溶接条件の適応制御，

(a) ポイントセンサ

(b) リニアセンサ

(c) エリアセンサ(I)

(d) エリアセンサ(II)

*原稿受付 平成 6 年 7 月 11 日

**正 員 三菱重工業㈱ Member, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

Fig. 1 Seam tracking control by optics sensor

(c) 溶接線の正しい制御と適応制御, (d) 溶接のモニタリング

3. 視覚センサの適用例

次に, 当社における視覚センサの適用例を GMA 溶接と GTA 溶接について紹介する。

3.1 GMA 多層盛溶接への適用

GMA 多層盛り溶接への適用例として, 船の内殻と補強フレームの厚板溶接に適用した例を示す²⁾。

(1) 溶接対象

適用対象の継手は, K 開先の多層盛りで, 上向き溶接後, ガウジングを行い下向き溶接を行っているものであり, ガス切断後のもので開先精度にはばらつきがある。また, 多層盛り溶接のため, 各パス毎に前ビードの盛り状態により, それに対応した溶接トーチの狙い位置を高精度に求める必要があった。特に, 上向き溶接ではその溶接条件裕度が狭く, よりシビアに狙い位置を決める必要があり, 従来のアークセンサでは自動化が困難であったものである。

(2) 自動 GMA 溶接用センサ

本装置では 3 つのセンサを併用している。

(a) 渦電流式電磁センサ

本センサは, 高周波電磁渦電流変位計方式のもので, 溶接アーク直下にも実装可能な耐熱 (最大 500°C), 耐環境小型電磁センサである³⁾。

これは, 内殻の壁面および補強フレームの表面にセットし, そのセンサと壁面とのギャップ量 G_x, G_y と比例した出力電圧が一定になるように制御することで, 内殻壁面や補強フレームに対してセンサとの距離を一定に保って追従させ, 上下/左右の壁面に対しての全体正しいを行っている。

(b) レーザスリット光センサ

これは図 1-(c) の如くレーザスリット光を開先面に照射し, それを白黒 CCD カメラで斜め前方より撮像し, スリット光を自動 2 値化して開先断面形状を得る。

これを画像処理でビードの屈曲点等の特徴点を検出し, それぞれのパスに適応したトーチ狙い位置として算出するものである (図 2)。

本センサは, 出力波長が 780 nm で, 溶接のアーク光に打ち勝つだけの出力を得るため, 30 mW の高出力なレーザスリット光を用いている。

(c) 視覚によるトーチ位置確認

GMA 溶接ではアーク光の影響が強く, 画像処理するような鮮明な画像は得られにくい。

そこで各種フィルタの改良を行い, アークから 100 mm 先でかつ狭隘な場所で使えるコンパクトな

Fig. 2 Example of detecting result for torch directing position

Fig. 3 Monitored images of visual sensors

視覚センサを開発した。図 3 にこの視覚センサの画像を示した⁴⁾。

(3) その他多パス多層盛り溶接へのリニアセンサの適用例

このような厚板の多層盛り溶接で溶接トーチの自動位置決めを行う例としては, 次のような例がある。起重機製品の周継手溶接 (レ型開先) や化学機械 (V 開先)⁵⁾, および煙突の現地溶接に適用した例⁶⁾。これは, 図 1-b の如くレーザ変位計を開先内を水平に横切る方向に走査して, 開先内の 2 次元形状を得て, この形状より, 各パス毎に狙い位置を求め, 多パス多層盛り溶接の正しいを行う。また, ビードの断面積を求め, これに対応する溶接条件 (溶接電流, 電圧, 速度) を補正出力して, 時々刻々変化する開先に対し, 適正な溶着量, 溶け込み深さの制御を行っている。これは, 最近自動化が盛んな鉄骨の柱と柱の溶接にも適用し実用化されている⁷⁾。

同様に多パス多層盛りの例としては, 厚板の V 開先に適用した例がある⁸⁾。これは, レーザスポット光

Fig. 4 2-Label image processing of arc and molten pool

を回転ミラーによって開先内を横切るように走査して、開先の断面形状を得て、開先線自動微いや溶接条件適応制御を行ったものである。これは、前者に対して計算処理が複雑になるが、センサを走査する機構が左右揺動型より回転式のため小型化できるメリットがある。

3.2 GMA 狭開先溶接への適用

次に狭開先 MIG 溶接にエアセンサを適用した例を紹介する。

(1) 溶接対象

厚肉の圧力容器に適用⁹⁾したもので、1 層 1 パスの積層条件による狭開先溶接の例である。これは、アークセンサのようにウィービングを必要とするセンサでは開先幅が狭く適用が困難であったものに適用した例である。

(2) 視覚センサシステム

視覚センサは、溶接の進行方向前方に置かれた赤外ビジコンと赤外フィルタで構成した。

図 4 に溶接部の画像を 2 値化処理した結果を示す。2 値化時の閾値を高く設定することで、アーク形状を検出し、ワイヤ付き出し長、アーク長を計測した。一方、低い閾値を設定することで、溶融池形状が検出出来、溶融池幅、ワイヤ位置を計測した。

これら得られたワイヤ突き出し長さ、ワイヤ位置などの情報を利用してトーチの高さ、左右位置を自動制御したものである。

3.3 オービタル TIG 溶接への適用

次に、オービタルの狭開先 TIG 溶接への視覚センサを適用した例について示す。

(1) 溶接対象

これは、熟練溶接者不足に対応し、自動化レベルの高度化により脱技能化、脱無監視化を推進するた

め溶接作業者に変わって溶接線自動微いや溶融池等の監視とその状況判断を視覚及び音情報などにより自動制御を試みた例である¹⁰⁾。

(2) TIG 自動溶接センサ

本装置の構成を図 5 に示した。これは、溶接進行方向に対し、前側に溶接状況監視用視覚センサ 1 を配置し、後方には主に溶接線微いを司る視覚センサ 2 を配置している。また溶接状況を聴覚情報として得るためマイクロホンも設置している。

(a) 溶接状況監視用視覚センサ 1

この GTA 溶接のアーク光については GMA 溶接ほどでもないがカメラ単位では溶接状況をモニターすることは出来ない。そこで視覚センサ 1 は、すでに開発済みの干渉フィルタと CCD カラーカメラなどで構成された視覚センサにより溶接状況を監視可能とした。

図 6 にこのモニタ画像を示すが、これにより、電

Fig. 5 Configuration of Orbital TIG welding device

Fig. 6 Example of characteristic extraction result for welding conditions

Fig. 7 Example of bead shape detected with laser slit light

極の劣化状況, アークブロー, 溶融池の形状, およびフィラーワイヤの添加位置ずれ等を鮮明に検出可能とした。

電極の劣化状況判断は, 先端の欠損や異物の付着状態により異常判断を行う。この電極の形状については, アーク電流を数 A まで落としたときの画像を取り込んで処理したもので, このことにより, 電極先端まで鮮明に検出されている。

アークブローについては, アークの重心位置と上記で求めた電極先端位置からアークの偏向角度を求め, アークブローの有無を判断した。

溶融池は, その先端形状を求め (電極から溶融池先端までの曲率 ρ , 長さ h), 溶接状況を監視した。

フィラーワイヤの添加位置は, ワイヤ位置を数ヶ所求めてこれを直線近似し, これと電極先端とのずれを計算して添加位置ずれを計算した。

(b) 溶接線自動おい用視覚センサ 2

後方の視覚センサ 2 は, 溶接線及び溶接直後のビード形状をみるため, 近赤外域のレーザスリット光と同一波長の干渉フィルタを具備した CCD モノクロカメラによって構成されている。レーザスリット光は電極直下から約 30 mm 手前を照射し, カメラはそのスリット光と電極をモニタし, 開先に対して

の電極の位置ずれ ΔX を求め (図 7), 電極を開先中央に来るように制御し, 開先おいを可能とした。ここで, さらにビード表面の盛り上がりの角度 θ を求め, 電極位置ずれ ΔX とこのビードの角度 θ , 更に前回のおい軸の方向と速度 v を入力パラメータとして次のおい軸の方向と速度 v をファジィ推論により求め, 開先おいを行っている。

ビードの傾きを考慮に入れる事で, アークブローや前に置いたビードの影響等が例えあったとしても, ビードが傾かないように自動制御出来る事になる。

また, このスリット光によりビード形状も同時に認識し, ビード表面やコーナ部の曲率の凹凸具合より, その形状の良し悪しが判断可能となっている。

(c) 溶接状況監視マイク

溶接部近傍にマイクを配置し, 騒音計によりリアルタイムに音圧をモニタし, 溶接中のシールドの乱れや冷却水の漏れなどを検出可能としている。

4. センシングの限界と今後の課題

視覚センサは, 人の目に置き換えられる可能性を持つものとして期待するところが大きい。しかし課題もまだ多いのも確かである。そこで, これらセンサのセンシングの限界と課題を以下に述べた。

まずリニアセンサは, 一般的に直接被検体を認識せず, レーザ光を当てて, その反射光を撮像して, 光切断法にて開先の断面形状を得ている。

従って, 溶融現象はこれでは直接的にはつかめない。これを判断するには, 溶接後のビード形状を計測して, この形状から間接的に判断するという方法が取られる。

レーザ光を使うための欠点としては, 光の乱反射光を入力するということで, 材料の表面の面粗度 (グラインドの掛け方など) や色の影響を受けやすく, 開先下部においては, 反射面に照射された虚像も写り込むことになり, これらの対策が必要となる。ぴかぴかに磨かれた鏡面では, 正反射となって, 検出不可能になってしまう等の欠点を持つ。

また, センサのレーザ光は, アークの発光強度より数段低いいため, アーク放電を起こしているアーク

直下でのセンシングは不可能である。そこで、センシング位置は溶接トーチより 20 から 100 mm 先行させているのが現状である。従って、制御としては、事前に溶接する箇所をセンシングさせて溶接線をティーチングさせる方式と溶接中にこのずれ量を考慮してセンサがセンシングした位置に溶接トーチが来たときにその値を用いるというオンライン記憶遅延再生方式がとられる。

前者の方式では、アークの影響がないためにノイズの影響が少ない。しかし、事前にセンシングさせるために実質のアークタイム率が低くなり、また、溶接中のワークの歪みによる溶接線のずれには追従が出来ない欠点がある。

後者は、オンラインセンシングのためアークタイムへの影響はないが、アークやスパッタ、熱の影響を受けるため、センサの保護対策が重要となってくる。また、アーク光やスパッタが画像上に悪影響を及ぼすため、これらのノイズでセンシング不良を起こしやすい欠点がある。このため、各種のノイズ対策（ソフト、ハード両面）を行うが、アーク直下に近づくほどこの限界がある。現状の実用化のレベルとしては、対象の開先形状や溶接条件、要求される溶接品質にもよるが、約 20 mm 程度が限界と思われる。

リニアセンサとしては、レーザそのもののパワーが高く高輝度を得られ、かつ小型で安価な半導体レーザの出現が待たれる。

エリアセンサは、アークの点弧部分をダイレクトに撮像していることから、その溶接現象を瞬時に捕らえることが出来、かつ撮像内容の情報量も多い。

しかし、GMA や GTA 溶接のアーク光の強度は強烈で紫外域から赤外域迄均一に発光されている。そのため、カメラがブルーミングやスミア現象を起こし単純には溶接現象を認識することは出来ない。そのためフィルタなどの工夫により画像の改良を行うが、人が目で見てるようにすべてを撮像出来ない。また、その認識についても画像処理の限界がある。人は、1 箇所を凝視しているわけではなく、見たい箇所に瞳を動かし、場合によっては、首もしくは体を動かし、その都度適度な視野、絞りに無意識のうちにして見ている。

しかし、視覚センサでは、一定の方向から一定の距離、絞りで撮像する。しかも人は動画として処理できるが、画像処理では、数枚を取り込んで処理するにすぎず、取り込み画像の鮮明さ、処理画像の豊富さでは格段の差があると言えよう。また、この判断と自動調整は仮に画像が人の目と同じように見え

たとしても、自動的に行うのは非常に困難を伴い、単純にはいかない。

カメラ側への要求としては、強度な光が入射しても、その電荷が周囲の画素に影響しない。かつビデオレート (1/60 秒) に無関係に高速取込可能な CCD カメラの出現が待たれる。また、画像処理ボードも昔に比べ非常に安価なボードが市販されるようになった。しかし、2 値化や空間フィルタ処理等をハードで行って処理速度を早めようとすると高価なものになってしまう。これも安価で各種の画像処理が高速で処理可能な画像処理ボードの出現が待たれる。

画像処理面でも、輝度差による 2 値化処理だけでなく、カラー処理化、多値化、ステレオ視、動画処理化等の複合画像処理化、判断のエキスパートシステム化等、および高速化が要求される。

5. 結 言

視覚センサは、人の目に置き換わる唯一のセンサであり、今後とも、大いに発展していく分野であることから、溶接ロボットをインテリジェント化するキー技術と心得、今後ともこれら技術の高度化に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- 1) 松縄、牛尾他：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。
- 2) 豊原、藤田他：DEVELOPMENT OF A PROFILING SENSOR FOR THE MULTI-LAYER GMA WELDING PROCESS, IIW Doc. XII-1218-91 (1991)。
- 3) 若松他：超耐熱・耐環境電極センサシステムの開発と溶接への応用。三菱重工技報, VOL. 21, No. 5 (1981)。
- 4) 藤田、石出他：視覚センサによる溶接条件適応制御「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, II-51~56。
- 5) 和田、真鍋、井上：レーザ光センサによる厚板継手の自動溶接システム「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, II-56~60。
- 6) 松本、近藤他：煙突現地工作自動化システムの開発、三菱重工技報, VOL. 23, No. 6 (1986-11)。
- 7) 吉田、広本他：鉄骨柱横向き溶接ロボット、ファクトリ・オートメーション, 1993. 3, P74~78。
- 8) 藤田：視覚センサによる溶接条件適応制御、溶接技術、産報出版, 1992 VOL. 40, P89~93。
- 9) 和田、真鍋、井上他：狭開先 MIG 溶接の群管理システム「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, II-61~64。
- 10) 松本、名倉、藤田他：TIG 溶接における無監視化技術の開発、三菱重工技報, VOL. 31, No. 3 (1994-5), P217~220。