研究論文

溶接プロセスのオンライン検出のための画像処理(第1報)*

—簡易型二値化画像処理装置の応用—

井 上 勝 敬**

Image Processing for On-Line Detection of Welding Process (Report 1)*

—Simple Binary Image Processor and Its Application—

by Katsunori Inoue**

Features of the visual information processing technique were examined for the purpose of detecting automatic control of welding process. The most suitable image processing method for these features was developed by the author. The image of the object is processed and converted into binary data by the processor. The necessary informations are extracted from these binary data. The author calls this processor the BIP (the Binary Image Processor).

Two examples of the BIP application to on-line detection of welding process are shown in this report.

One example is the detection of wire and joint configurations by direct observation of the arc welding process progressing part. The other is the detection of the fine weld line of butt welding.

The usefulness of the BIP is proved by these examples.

1. 緒 言

溶接過程の自動制御のためのセンサとして、現在までに、多くの方式が提案されているが、そのうちでは、光学的方式によるものが¹⁻¹⁵⁾最も多い。光学的方式のセンサのより進んだ段階のものとしては、二次元、三次元的な視覚情報をコンピュータ・システムで処理し、必要情報を抽出する、画像処理技術が考えられる。画像処理技術の生産システムへの応用は、ここ十年来、各国のいろいろな分野で盛んに研究が進められ、そのレベルはかなり高い段階にまで達している。しかし、その技術の実用化にはいろいろな問題点があり¹⁶⁾、実用面に大幅に取り入れられるまでには至っていない。

筆者は、かつて、溶接過程の計測、検出に画像処理技術を取り入れることを想定した場合、その特徴となる点を検討し、その特徴に最も適合するような実用性のある画像処理方式を提案した。本論文では、この方式の応用例を二つ示し、この方式のデータ処理モードでの実際例を明らかにするとともに、その溶接プロセスの計測、検出への適用の有用性を主張している。

2. 溶接プロセスの視覚情報の簡易型二値化画像処理装置による処理

溶接プロセスを自動制御するためのオン・ライン検出を目的とした視覚情報処理の特徴は、文献¹⁷⁾で明らかにした。この特徴に適合するものとして、Fig. 1 にブロック図で示すような、簡易型二値化画像処理装置 (BIP; Binary Image Processor) を中心とするシステムを提案した。この BIP のハードウェアの構成についても、すでに紹介した^{17,18)}。これは30~40個程度の IC を使って、一、二枚のボードにまとめられる簡単なものである。

この BIP では、Fig. 2 のような形状の明部が、暗部を背景として存在する場合、図の B_I , D_I ($I=1\cdots N$) がデジタル量として、入力画像データとなり、明部の形状と画像中での位置が規定される。この方式の原理からして、その適用は、明暗部の境界線と水平走査線との交点が二点以下であるような比較的単純な形状の対象物に限定される。ハードウェアのわずかな変更で、明暗部の関係を逆転させたり、 D_I の代わりに D_I' を読み込むことも可能である。分解能は、通常の 2:1 インターレース方式、走査線数 525 本のビデオ系に対しては、垂直方向 1/262、水平方向は 15,750/f となる。f は BIP のクロック・パルスの周波数である。

*原稿受付 昭和54年10月8日 (昭和51年度秋季, 昭和52年度春季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka University

Fig. 1 Block diagram of the image processing system.

Fig. 2 Schematic explanation for reading the image data of an object.

3. 応用例 1 アーク溶接部直視法による開先部の検出

3.1 アーク溶接部直視法による画像

アーク溶接過程が進行している箇所を、撮像装置で直視して得られる像からは、アーク溶接の自動制御のための有用な情報が得られることは、すでに報告した^{4),5)}。この像に BIP を適用して、より信頼性の高い情報を抽出することができる。Fig. 3(a) のような突き合わせ溶接箇所を、減光フィルタ付 TV カメラで前方斜上方より撮像すると、Fig. 3(b) のような像が得られる。この像は BIP で処理するのに都合がよいように、TV カメラを横向きにして撮像したものである。この像において、開先壁面に対応する(b)図中の a, b, ワイヤの外周に対応する c, d の位置をそれぞれ求めれば、開先幅 W や、開先部の中心線に対するワイヤの中心軸の距離 E も、簡単に求めることができる。 E によりサーボ系を動作させれば、ワイヤの位置を適正にするような溶接線の追跡制御が可能になり、 W の変化に応じて、ワイヤ送給速度やトーチ移動速度（溶接速度）を調整すれば、適応制御が可能になる。以下に、このために BIP を制御するプロセッサに必要なアルゴリズムについて述べる。

3.2 しきい値の調整とデータの読み込み

アーク溶接部直視画像では、アーク光の変動によって

Fig. 3(a) An illustration of the arc welding process progressing part.

(b) An image obtained by direct observation of arc welding process progressing part with TV camera.

その画像の明るさが時間的に変化するので、画像の二値化のためのしきい値 (BIP で設定) を調整して、これに対処しなければならない。このため、まず、しきい値の初期値を設定し、画像データを読み込み、明部データ B_i の合計値 $\sum_{i=1}^N B_i$ (像の明部の面積に対応する) が、ある許容範囲に入るように、しきい値を増減して試行錯誤的に自動調整するようにしておく。この例では、Fig. 3(b) にも見られるように、像の明暗のコントラストは比較的高いので、しきい値設定の制御はそれほど精密にする必要はない。妥当と判定されたしきい値によって、データを読み込む。

3.3 前処理—平滑化処理

Fig. 3(b) のような画像には、アーク光の瞬間的な変動や、溶融池の揺動、スパッタの発生などの原因により、像自体が時間的に不安定になる。また、大きな溶接電流などの影響で、ITV の水平走査の際にノイズが入り、これがビデオ信号に重畳して現われることもある。このため、BIP で処理して得られる像の輪郭にも、Fig. 4(a) 上図のように、本来あるべきではない大きな変化部分やまた、小刻みなリップルが現われる。これらは、次節で述べる差分処理のためには有害であるので、次のような平滑化処理を加える。まず、像の左、右輪郭について、

Fig. 4 (a) The outline of the image before and after the smoothing operation.
 (b) Flow chart for the smoothing operation.
 (c) Elimination of a projecting part by the smoothing operation.

それぞれ

$$S_I = B_I + D_I - (B_{I-1} + D_{I-1}) \quad (\text{左側輪郭}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

又は

$$S_I = D_I - D_{I-1} \quad (\text{右側輪郭}) \quad \dots\dots\dots (1')$$

のように S_I ($I=2 \dots\dots N$) を定める (B_I , D_I については Fig. 2 参照). これらの S_I に対して, Fig. 4 (b) のフローチャートの処理を加える. 処理後の S_I と $B_1 + D_1$ (又は D_1) を基に, 像の左 (又は右) 側輪郭線を描くと, Fig. 4 (a) 上図は下図のように「ひげ」が取れ, 全体に平滑化されたものになる. これは, フローチャート中の S_I などの置換操作によって, Fig. 4 (c) のような輪郭上の突起部 (細線で示す. この部分で $S_I S_{I-1} < 0$ となる) が, 太線のように変更されることによる.

3.4 フィルタリング処理—所要部分の抽出

平滑化した像から, a, b, c, d (Fig. 3(b) 参照) の位置を求めるためには, 輪郭線が急変する箇所を認識する必要がある. この目的で画像データ S_I にデジタル・フィルタリング処理を施す. これは次式による.

$$C_I = S_{I+2} + 2(S_{I+1} + S_I) + S_{I-1} \quad \dots\dots\dots (2) \\ (I=3 \dots\dots N-2)$$

Fig. 5 に, Fig. 4 (a) 下図の図形のデータに (2) 式を適用した結果を示す. この例では, 右側の輪郭はあまり急激に変化していないため, C_I の値にもあまり鋭いピークは認められないが, ワイヤ像に対応して, 値は大きくなっている. このようにして求めた左, 右の C_I 値を垂直方向に ($I=3 \rightarrow N-2$) 探索して, 正および負の絶対値が最大になる位置を見付け, a, b, c, d をそれぞれ規定

Fig. 5 The result of the filtering operation for the image data.

Fig. 6 Flow chart for the real-time detection of wire and joint configurations.

すれば, W , E も容易に算出できる.

3.5 リアルタイム検出

以上の処理を総合して, リアルタイムで所要量を検出することができる. Fig. 6 にそのためのアルゴリズムをフローチャートで示す. 図に見られるように, 各ルーチンへの分岐はフラグ A, B によって行う. まず, しきい値とフラグの初期値を設定し, 画像データを入力する. 次に, しきい値を 3.2 節の方法でチェックし, 基準に合格しない場合は, 所定のアルゴリズムに従って調整する. 合格の場合は, フラグ A を変更する. その後, いずれの場合も再びデータを入力する. データ入力後, 適正しきい値の場合には, 前処理, 所要部抽出ルーチンへ分岐し, 前述の平滑化処理, フィルタリング処理を加えた後, 所要部分 a, b, c, d 点を抽出し, その位置を求める. 次に, フラグによって, 基準ファイル・ルーチンに向うが, ここでは, 求めた各位置について, その順序や相互

の距離などが、あらかじめ定めた許容範囲にあるか、否かをチェックし、合格したデータのみを基準ファイルに登録する。基準ファイルが完成した時点で、フラグBを変更する。以後は制御出力ルーチンへ分岐することになり、ファイルされたデータによって検出点をチェックし、合格した場合のみ W , E 値を算出し、これを制御信号出力として、溶接装置の制御系へ送ることになる。同時に、この検出値は基準ファイル中の最古のデータと入れ換え、基準ファイルを更新する。チェックに不合格の場合は基準ファイル中のデータによって算定した W , E を制御信号とする。この経路を所定回数通った後に、フラグAを再び変更して、しきい値のチェックと調整とを行う。なお、初期のしきい値チェック、調整時と、基準ファイル作製中は、制御信号は出力せず、溶接装置は初期設定で動作することになる。この時間は1~2(s)程度である。

この応用例では、前述したように、しきい値の調整は厳密でなくてもよく、このアルゴリズムのように、検出と制御出力の合間に、ときどき行っただけでよい。基準ファイルは、この例のような不安定な画像に対しては不可欠であり、2ⁿ ($n=4\sim5$ とした) 組のデータをファイルすると都合がよい。Fig. 7 に、リアルタイム検出の対象とした画像と、検出結果を二例示す。検出結果は平均して約70(ms)に一回の割合で出力されている。満足すべき結果が得られていることが見られる。

Fig. 7 The test results of the real-time detection.

4. 応用例2 突合せ溶接における溶接線の検出

次の応用例として、平板突合せ溶接における溶接線の検出について述べる。接合部のギャップ間隔は0.5mm以下と狭く、溶接線上にFig. 8(a)のように、所々に仮付け箇所がある場合、接触型の検出方式や、非接触型でも、通常の点状の検出を行う方式は適用できない。そこで、Fig. 8(b)のように溶接線上に長方形のスポット光を当て、明部の中の暗い線としてギャップ像、したがって

Fig. 8 A test piece of butt welding used for the weld line detection.

- (a) A test piece with tack weld.
- (b) A test piece with the weld line, on which rectangular spot light is projected.

Fig. 9 The B_I data of the image of the spot light and their filtering result.

溶接線を検出する。この例では、明部の画面中での位置やその形状の認識は必要ではないので、BIPによる B_I データのみを利用する。

実際の溶接材では、材料表面のさびやきず、材料切断時の変形、熱による変色などのため、 B_I 値をプロットしたパターンは明確に溶接線に対応するとは限らない。Fig. 9はこの例で、 B_I 値(左図)の上部にある凹部は材料表面の汚れの影響を受けた例である。このような影響を少なくするため、得られた B_I に対して

$$C_I = 2(B_{I+4} + B_{I-2}) - (B_{I+1} + 2B_I + B_{I-1}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

のようなフィルタリング処理を施すと、Fig. 9 右にプロットしたように、ギャップ像の位置のデータが強調され、その検出のS/N比がよくなる。(3)式の処理の伝達特性を波長—ゲイン特性で表わすと(4)式となる。

$$|H(\lambda)| = 2 \left[4 \cos \frac{2\pi}{\lambda} + 3 \right] \left(\cos \frac{2\pi}{\lambda} - 1 \right) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $|H(\lambda)|$ はゲインを倍率で表わし、 λ は垂直方向のサンプリング間隔を単位とした波長を表わす。(4)式からFig. 10のような波長—ゲイン曲線が得られる。この曲線の小さい方のピークは、ギャップ像により B_I

Fig. 10 The wave length-gain characteristic of the digital filtering operation of Eq.(2).

データが急激に変化する部分の波長に対応し、大きい方のピークは、ギャップ像全体による B_I の変化の波長に対応している。したがって、(3)式による処理でギャップ像に対応するデータが強調される。

スポット光の投光器を溶接線のトーチに取り付け、これに先行する溶接線部分に投光し、スポット光中のギャップ位置を検出し、これが適正になるようにトーチ位置を制御すると、この場合も溶接線の追跡制御が可能になる。このためのリアルタイム検出アルゴリズムは3章で述べたものと類似であるが、この応用例では、反射光を利用するので、画像のコントラストがやや低く、このため、しきい値の制御がより重要になる。そこで、しきい値チェック、調整ルーチンを所要部抽出ルーチンなどと直列に挿入し、しきい値のチェックに合格したデータに対してのみ、検出のための処理を施すようにしている。フィルタリング処理結果の G_I データに対しては、ギャップ像に対応する大きいピークが一つのみ存在するか否かをチェックする。顕著なピークが認められない場合や、複数のピークがある場合には、溶接線認識不可能と判定し、しきい値調整ルーチンへ帰ることになる。

この方式でギャップ間隔 0.5 mm 以下の突合せ溶接試験片を用いて、溶接線検出実験を行った結果、この場合も、平均約 70 ms 毎に一回、誤差 0.2 mm 以下の制御信号が得られることを確認した。これは十分実用性のある値である。

5. 結 論

この論文は以下のように要約される。

a) すでに発表した簡易型二値化画像処理装置 (BIP) は溶接プロセスの視覚情報の処理に有効であることを主張した。

b) BIP の応用例として、アーク溶接部直視法による開先部の検出を挙げ、そのアルゴリズムと、検出結果とを示し、十分な検出性能のあることを示した。

c) 第二の応用例として、突合せ溶接における溶接線の検出を挙げ、想定した不利な条件に対しても必要な検出性能があり、十分な実用性のあることを示した。

参 考 文 献

- 1) Y. Arata and K. Inoue; Automatic Control of Arc Welding by Monitoring Molten Pool, Trans. JWRI 1-1 (1972), 99s-113s
- 2) Y. Arata and K. Inoue; Automatic Control of Arc Welding (Report II), Trans. JWRI 2-1 (1973), 87s-101s
- 3) Y. Arata and K. Inoue; Automatic Control of Arc Welding (Report IV), Trans. JWRI 4-2 (1975), 101s-105s
- 4) 荒田, 井上; アーク熱源の自動制御化溶接に関する基礎的研究 (第1報), 本誌, 48-7 (1979), 493s-498s
- 5) 荒田, 井上; アーク熱源の自動制御化溶接に関する基礎的研究 (第2報), 本誌, 48-9 (1979), 695s-700s
- 6) I.V. Shergov and F.V. Voronin; Television in Welding Production, Auto. Weld., 27-1 (1974), 49s-53s
- 7) C.K. Dedkov and V.S. Popenko; A Scanning Sensor for the Determination of the Position of a Joint, Weld. Prod., 21-6 (1974), 87s-88s
- 8) H.W. Mishler and R.E. Monroe; An Optical Sensor for Adaptive Control of the Welding Arc, Welding in the World, 12-7/8 (1974), 183s-192s
- 9) V.K. Lebedev, Yu. A. Pachentsev and E.S. Dragomiretskii; Research into the Possibility of Using a Photo-Electric Sensing Element for Controlling Penetration in the Arc Welding of Light Alloy, Auto. Weld., 28-2 (1975), 18s-20s
- 10) N.L. Burlinov, et al.; Automatic Control of Through Penetration in Argon-Arc Butt Welding, 22-3 (1975), 26s-28s
- 11) A.R. Vroman and H. Brandt; Feedback Control of GTA Welding Using Puddle Width Measurement, Weld. J., 55-9 (1976), 742s-749s
- 12) V.N. Lushpai, V.A. Timchenko, V.B. Bodanovich and E.A. Kagonovich; Position-Sensitive Photo-Resistors Used in System for Automatically Guiding Electrode along Joints, Auto. Weld., 29-4 (1976), 41s-44s
- 13) V.M. Nesterenkov and S.N. Kobvasenko; The Depth of Penetration Controlled in Electron-Beam Welding by Infra-Red Irradiation of the Weld Root, Auto. Weld., 29-12 (1976), 38s-39s
- 14) E.I. Romanenkov, et al.; Control of Arc Length on the Basis of Its Spectral Radiation, Weld. Prod., 23-9 (1976), 53s-54s
- 15) V.A. Timchenko; Devices for the Automatic Guiding of the Welding Tool Along the Weld Line, Auto. Weld., 30-9 (1977), 37s-41s
- 16) 白井; 画像処理技術の生産システムへの応用の将来, システムと制御, 23-7 (1979), 347s-354s
- 17) 荒田, 井上; 溶接自動制御系におけるパターン計測と処理へのコンピュータの応用, 本誌, 46-3 (1979), 129-134
- 18) 井上; 溶接技術におけるパターン計測, 処理, システムと制御, 23-7 (1979), 370s-378s