視覚溶接ロボットにおける溶接線位置・方向監視用 走査線を用いた溶接線追従のロバスト制御*

菅 泰雄^{*1}, 佐野嘉一^{*2}, 北岡利道^{*3}

On the Robust Control of Seam Tracking Applied Observing System of Weld Line Position and Direction in Welding Robot with Visual Sensor

Yasuo SUGA, Yoshikazu SANO and Toshimichi KITAOKA

In order to improve the robustness of the visual sensing system of on intelligent welding robot against noise, a new control system is constructed. In this paper, some robust control systems to track a weld line with disappeared portion are proposed. One of them is the sequential linear estimation (SLE) method, in which the weld line positions are estimated on the assumption that the weld line is linear. Another method is the position detecting observer (PDO) method, in which a scanning line is set at a front position of the image and the positions of the weld line are estimated. Furthermore, the direction detecting observer (DDO) method, in which two scanning lines to detect the weld line direction are set at a front position of the image, is proposed. As the result of tracking experiments, the effectiveness of these systems are confirmed.

Key Words: Welding Robot, Visual Sensor, Seam Tracking, Robust Control, Image Processing

1. 緒 言

CCD カメラを用いて溶接線近傍の画像を取得し、その二次元画像の輝度分布を解析して溶接線位置を検出する二次元画像解析法は、薄板溶接への適用が可能のため、近年その研究が行われつつある^{(1)~(4)}。しかし、一般に視覚センシングはアークセンシングに比べてシステムが複雑であり、またロバスト制御性に劣るなどの理由からいまだ広く実用されるに至っていない。したがって、誤動作を生じ難いロバスト制御性に優れた視覚制御システムの開発が急務とされている。現在、ロバスト性向上のための手法として、種々のソフトウェア的手法^{(1)~(6)}が提案されているが、強烈なアーク光の反射による溶接線画像のかすれや消失に対する有効なシステムはいまだに開発されていない。そこで、視覚による溶接線追従システムにおけるロバスト制御性の格段の向上を図るため、本研究では、溶接線位置あるいはその方向を推定するためのオブザーバを採用した新しい制御システムを提案し、その有効性について検討した。

2. 視覚認識システムの概略

図1は本溶接ロボットの視覚認識システムの概略を、また図2は一般的な溶接線認識のための画像処理の流れを略図で示したものである。溶接線およびその近傍の画像はCCDカメラで撮像される。その画像データはイメージプロセッサを経てパーソナルコンピュータに取り込まれ、溶接線位置検出のために以下のような画像解析が行われる。一般に、溶接線は連続した直線または曲線で構成されている。したがって、今探索しつつある溶接線位置は、現在の溶接線位置から大幅に離れてはいない。このため、画像中にウィンドウを設けて、その一部に複数の走査線を設定し、対象となるデータにのみ処理を施して溶接線の探索を行うウィンドウ処理法⁽¹⁾あるいはこれを発展させた連続複数ベクトル連結法(CMVC法)⁽⁴⁾が提案されている。一方、画像は材料表面の凹凸・汚れに起因するノイズを含むため、これに簡単な平滑化処理⁽¹⁾が施される。さらに、照明むら等に起因する長周期的な輝度分布の変動を除去し、溶接線位置の安定した検出を実現するために、微分処理⁽¹⁾⁽⁵⁾がしばしば用いられる。この場合、微分値の最大値と最小値を示す中間位置を溶接線位置

* 原稿受付 平成5年9月21日。

^{*1} 正員、慶應義塾大学理工学部 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 住友金属工業(株) (〒314 茨城県鹿島郡鹿島町大字光3)。

^{*3} 学生員、慶應義塾大学大学院。

図1 溶接ロボットシステムの構成

図3 CMVC法の概略

図2 二次元画像解析法を用いた溶接線追従制御法

図4 かすれを有する溶接線の追従結果

として認識する手法が採用されている。ただし、溶接線を正しく認識しているか、溶接線が何らかの原因で視野からはずれてしまっているかを判断するために、微分値の最大値と最小値にしきい値を設けている。しかし、溶接線を見失った場合に何らかの処理を施さなければ、そこで誤動作を生じてロボットが暴走する可能性がある。従来のシステムでは溶接線を見失った場合、溶接の停止等の手法で暴走を防止していたが、それ以上の有効な手法は見られなかった。そこで、以下、溶接線のかすれ・消失に対するロバスト制御性に優れたシステムについて検討する。

3. ロバスト制御システムおよび追従結果

3.1 逐次直線推定法による追従制御 図3は、既報⁽⁴⁾で報告したCMVC法の概略を示したものである。これは、二次元画像解析法による視覚センシングロボットにおいて、取得画像中に複数の走査線を設定

し、溶接線位置を連続的に探索して複数の連続したベクトルの集合として溶接線位置を認識する方式である。本方式では、走査線間隔（ピッチ）を小さく設定できるため、高精度でかつロバスト性に優れた追従制御が実現できる。しかし、溶接線のかすれ・消失に対しては、従来の手法と同様、有効な手法がなかった。

図4に、一例として、溶接線を見失った場合に対する対策を施していないCMVC法（5本走査線）による溶接線追従実験結果を示す。溶接線として、白紙上にプロットにて描いた仮想溶接線（正弦曲線、振幅 $A=10$ mm、周期 $T=80$ mm）を用いた。なお、溶接線のかすれ部・消失部を想定して長さ2 mmのかすれ部を導入してある。図4より、実線部は良好な追従が行われているが、かすれ部で誤動作を生じていることがわかる。なお、本システムでは、ウィンドウ処理を施しているため、誤動作におけるロボットの移動量が少なく、溶接線が視野からはずれるなどの暴走状態には至って

いない。しかし、このようなロバスト性に劣るシステムでは、実用に供することは困難である。

そこで、このような事態に対応できる制御システムを構築するために、かすれ部における溶接線位置を推定するための簡単な手法を提案する。これは、図5に示すように、現在の溶接線位置 P_1 および以前に検出した位置 P_n の2点の位置情報から次の走査線上における位置 E_0 を推定する手法であり、溶接線位置の逐次直線推定法(Sequential linear estimation method, SLE法)と称することができる。本法では、ある任意の走査線 SL_0 において溶接線を認識できなかった場合、溶接線の連続性を考慮して、前回検出した溶接線位置 P_1 および n 周期前に検出した位置 P_n をコンピュータメモリから取り出し、次式を用いて SL_0 における溶接線推定位置 E_0 の x 座標 x_{E0} を求める。

$$x_{E0} = x_{P1} + (x_{P1} - x_{Pn}) / (n - 1) \quad \cdots \cdots (1)$$

複数の走査線にわたって溶接線がかすれている場合は、この操作を続けて E_1, E_2 を逐次求め、安定した追従制御を実現する。

3・2 前方位置監視用走査線(位置検出オブザーバ)

を用いた追従制御 逐次直線推定法(SLE法)は、システムが簡単のため、溶接線が直線または直線とみなせるような曲率半径の大きい曲線から構成されている場合には有効である。しかし、比較的曲率半径の小さい曲線部を有する溶接線の追従制御の場合は、大きな誤差を生ずる可能性がある。図6(a)は、その一例を模式的に示したもので、曲線部にかすれが生じた場合の仮想溶接線を示している。図6(a)では、 P_1 および P_2 の位置から式(1)を用いて位置 E_0 を推定し、同様にして E_1, E_2 を求めている。このように、曲線の一部の情報から直線近似により溶接線位置を推定しているため、数ステップ後には誤差が累積して推定位置が実際の溶接線位置から大きくはずれる可能性のあること

図5 逐次直線推定(SLE)法の原理

が確認される。そこで、図6(b)に示すように、取得画像中の前方に溶接線位置を確認するための走査線、すなわち位置監視用の走査線(以下、簡単のため位置検出オブザーバと称する)を1本設定した新しい手法を提案する。ここでは、本手法を位置検出オブザーバ法(Position detecting observer method, PDO法)と称する。これは、位置検出オブザーバの採用によって、溶接進行方向の所定位置における溶接線位置をあらかじめ確認しておき、溶接線画像にかすれや消失が生じた場合には、現在位置からオブザーバによって確認された溶接線位置に向かって所定ピッチで直線的に進行する手法である。図6(b)においては、走査線 SL_0 にて溶接線のかすれのためその位置を検出することができない。そこで、 SL_1 から任意のステップ(m ステップ)先方に溶接線位置を確認するオブザーバを設定し、オブザーバ上における溶接線位置 A を求める。この位置の x 座標 x_A と位置 P_1 のそれ x_{P1} との直線関係から次式を用いて推定位置 E_0 を、場合によっては同様の

(a) 逐次直線推定(SLE)法

(b) 位置検出オブザーバ(PDO)法の原理

図6 位置検出オブザーバ(PDO)法の原理

手法を連続的に適用して $E_1, E_2, \dots$ の x 座標を求め、自動追従を実現する。

$$x_{E0} = x_{P1} + (x_A - x_{P1})/m \quad \dots\dots\dots (2)$$

図 6 (a) に比べて、追従誤差 Δe が減少していることが確認される。以上の結果より、本手法が直線はもちろん、曲線の追従制御におけるロバスト制御性の向上に有効であることが確認される。

3・3 方向監視用走査線(方向検出オブザーバ)を用いたロバスト制御 3・2 節で述べた位置検出オブザーバ法(PDO 法)の採用は、直線および曲線の追従制御には極めて有効と考えられる。しかし、角あるいはそれに近い曲折部を有する溶接線に対しては、精密な追従制御が困難である。図 7 (a) は、角を有する直線の角先端近傍がかすれて線の認識が困難な場合の一例を示している。この場合、逐次直線推定法を採用したシステム(SLE 法)では、図 7 (a) に示すように角を通過した後大きな誤差を生じる可能性が高い。また、位置オブザーバ法を採用したシステム(PDO 法)では図

(a) SLE 法および PDO 法

(b) 溶接線方向検出オブザーバ(DDO)法

図 7 溶接線方向検出オブザーバ(DDO)法の原理

7(a) に示すように、角部をショートカットして、これもまた大きな誤差を生じる可能性がある。

そこで、図 7 (b) に示すように、2 本の方角監視用の走査線(以下、簡単のため方向検出オブザーバと称する)を取得画像前方に設定する新しい手法を提案する。これは、オブザーバによって取得した 2 点の溶接線位置から推定した溶接線方向と、逐次直線推定法による推定結果から溶接線軌道を正確に推定する方法である。すなわち、図 8 に示すように、すでに検出した溶接線位置 P_1, P_n から溶接線 WL_1 を推定し、また 2 本の方角検出オブザーバで検出した溶接位置 A, B から溶接線 WL_2 を推定する。さらに、これら 2 本の線の交点 O から角の先端位置座標を求め、これら 5 点を結ぶ 2 直線上を近似的に追従するよう制御を行う。

本手法を用いて、リアルタイムで角部を追従するアルゴリズムを以下に説明する。まず、図 7 (b) に示すように複数の走査線を設定し、かすれ部が検出されると検出部前方に 2 本のオブザーバ A, B が設定される。例えば、図 8 に示したように走査線 SL_0, SL_{-1}, SL_{-2} にて溶接線の検出が不能の場合、SLE 法により SL_0 上の位置 E_0 を推定し、その x 座標 x_{E0} を求めておく。一方、2 本のオブザーバにより検出した溶接線位置座標 $A(x_A, y_A)$ と $B(x_B, y_B)$ から、 SL_0 上の推定位置 D_0 の x 座標 x_{D0} を次式より推定する。

$$x_{D0} = x_B - (x_B - x_A)(y_B - y_{D0}) / (y_B - y_A) \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上で求めた x_{E0} と x_{D0} とを比較し、その差 Δe_{Ds} を求める。すなわち、

$$\Delta e_{Ds} = |x_{E0} - x_{D0}| \quad \dots\dots\dots (4)$$

この手順を、走査線 $SL_{-1}, SL_{-2}, \dots$ に順に繰返し、 Δe_{Ds} があるしきい値 Δe_{th} [例えば、 $|x_{P1} - x_{Pn}| / 2(n-1)$] 以下になるまで行う。 Δe_{Ds} が Δe_{th} 以下に達したとき、溶接線の角部に達したと判断する。角部に達す

図 8 DDO 法によるかすれを有する曲線の追従

るまで(例えば SL_{-1})は、溶接線位置として SLE 法で推定した位置 E_1 を採用し、角部通過後は DDO 法で推定した位置 E_2 を採用する。この手法を採用することによって、不明りょうな角部をもつ溶接線を精確に追従制御することができる。以上のアルゴリズムは比較的簡単であり、リアルタイムの追従制御に十分適用することができる。図 8 は、DDO 法を用いて曲線部を追従した場合の結果であるが、この場合も比較的良好な追従が実現していることがわかる。

4. 追従実験結果

図 9 に、3 章で述べたオブザーバを用いた溶接線追従システムの一例の流れ図で示す。あらかじめ、溶接開始前に、溶接線の形状が直線であるか、曲線を含むか、あるいは角を有するかをコンピュータに入力し、追従システムの選定を行う。選定が行われると、溶接線にかすれや消失などのノイズの発生ごとに、オブザ

図 9 溶接線位置推定法を採用したロバスト制御システムの概略

図 10 走査線およびオブザーバの配置例

ーバの設定と溶接線位置の推定アルゴリズムが起動して、誤動作が生じないように自動追従が実現される。

図 10 に、追従制御実験に用いた CMVC 法による複数の走査線(5 本)と 2 本の方角検出オブザーバとの位置関係を具体的に示したものである。走査線間隔は 4 画素とし、オブザーバ間隔は 10 画素とした。なお、走査線間隔およびオブザーバの配置に関しては、溶接速度、制御周期、走査線の数、走査線の設定長さ、取得画像の大きさ等の初期設定によって適正に選択する必要がある。

図 11 は、2 本の方角検出オブザーバを採用した追従システムを用いて、溶接ロボットによる仮想溶接線

図 11 DDO 法による溶接線の追従実験結果
(正弦曲線, $A=10$ mm, $T=80$ mm)

図 12 DDO 法による溶接線の追従実験結果
(正弦曲線, $A=10$ mm, $T=80$ mm)

図 13 角部の追従結果に及ぼす DDO 法の効果
($A=20$ mm, $T=80$ mm)

図 14 角部の追従結果に及ぼす DDO 法の効果
($A=20$ mm, $T=80$ mm)

の追従実験を行った結果を示したものである。図 11 中の溶接線は、図 3 に示した溶接線と同一で、長さ 2 mm のかすれ部を有する正弦曲線である。図 11 より、図 3 に見られた誤動作は認められず、良好な追従が行われていることがわかる。なお、平均追従誤差は約 ± 0.15 mm であった。

図 12 は、長さ 3 mm のかすれ部を有する正弦曲線の追従結果で、かすれ部においても誤動作は見られず、図 11 と同程度の追従結果が得られている。

図 13 は、角の先端部がかすれている場合、図 14 は、かすれている位置が角先端部の一方の溶接線に片寄っている場合の角を有する仮想溶接線の追従実験結果を示している。図 13, 14 より、いずれも誤動作を生ずる

ことなく、角部をおおむね良好に追従しており、本システムの実用に対する有効性が確認される。

5. 結 言

視覚センシング溶接ロボットにおけるロボスト制御性に優れた新しい手法を提案し、その有効性について検討した。本研究で得られたおもな結果は以下のよう

にまとめられる。

- (1) 溶接線の視覚認識において、外部光、アーク光等によって生ずる溶接線画像のかすれ・消失に伴うロボットの誤認識・誤動作を防止できるロボスト制御性に優れたシステムを構築した。

- (2) 直線または直線とみなすことができる単純な形状の溶接線のかすれに対しては、逐次直線推定法を採用した制御システムが有効である。

- (3) 直線または曲線から構成されているやや複雑な形状を有する溶接線のかすれに対しては、溶接線位置監視用走査線(位置検出オブザーバ)の採用による追従システムが有効である。

- (4) 角を有する直線または曲線で構成されている溶接線のかすれに対しては、溶接線方向監視用走査線(方向検出オブザーバ)を採用した追従システムの適用が有効である。

- (5) 以上の制御アルゴリズムを組み込んだ溶接ロボット制御システムを用いて、かすれを有する仮想溶接線の追従実験を行い、本システムのロボスト制御に対する有効性を示した。

なお、本研究の遂行にあたっては、新キャタピラー三菱(株)相模事業所副所長 堀越明氏および工作部長 松村哲雄氏にご協力・ご援助いただいた。ここに記し、深甚なる謝意を表する次第である。

文 献

- (1) 菅・池田, 機論, 58-552, C(1992), 2566.
- (2) Suga, Y., ほか 3 名, *Proc. Int. Conf. Comput. in Mach. Ind. (CIMI)*, Shanghai, (1992), 485.
- (3) 菅・佐野・成瀬・児島・小川, 軽金属溶接構造協会誌, 30-11(1992), 613.
- (4) 菅・佐野・北岡, 機論, 60-572, C(1994), 1453.
- (5) 菅・石井, 機論, 59-558, C(1993), 593.
- (6) Suga, Y. and Ishii, H., *Proc. ICAM' 93*, Tokyo, (1993), 234.