

視覚センサによる現地配管溶接の自動化

Automatization for On-Site Welding of Pipeline Using Visual Sensor

毛 文傑 MAO Wenjie JFE エンジニアリング 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員・工博
勝木 誠 KATSUKI Makoto JFE エンジニアリング 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員

要旨

溶接時の溶融池画像を鮮明に撮影できる視覚センサを開発した。このセンサは溶接線倣い制御のズレ、開先幅の変動および溶着高さの変動を同時にかつリアルタイムで検出できる。このセンサを搭載した大径管の自動溶接機は良好な溶接線倣い制御精度と大きな開先変動許容裕度、たとえば鋼板裏当の場合にルートギャップ変動裕度4～11 mm、目違い変動裕度0～3 mmを実現した。

Abstract:

A visual sensor, which enables to acquire clear molten pool images during welding, has been developed. The simultaneous and real time measurements of seam tracking error, groove width variation and height variation of metal deposition have been developed by using the sensor. The automatic welding machine using the sensor realized good control precision of seam tracking and great variation tolerance of groove shape. For example, the root gap is allowed to vary from 4 to 11 mm and the misalignment is allowed to be at maximum 3 mm in the welding with a steel-backing.

1. はじめに

現地溶接継手の開先寸法は変化が大きく、たとえば大径管溶接継手のルートギャップと目違いの変動範囲は通常それぞれ4～8 mm、0～2 mmであり、この範囲を超える場合も珍しくない。このような溶接継手を自動溶接する際には、自動溶接装置に溶接線の自動倣い機能を備えることが必須であり、溶接トーチの揺動幅、開先に充填する溶着量の自動制御なども必要である。

これらの制御に適した溶接用センサはレーザセンサ¹⁾と視覚センサ^{1～3)}などが挙げられる。本報ではJFEエンジニアリングが独自に開発した溶接用視覚センサおよびそれを使用した自動溶接システムと現地適用結果を紹介する。

2. システム構成

2.1 構成概要

図1に視覚センサを使用した自動溶接システムの構成概要を示す。この視覚センサは以下に示す制御を行う。(1) アーク直下の溶融池とワイヤの画像を撮影し、溶融池(開先)とワイヤとの相対位置変化を検出して、トーチの溶接線倣い制御を行う。(2) 溶融池形状寸法(幅、高さなど)

の変化を検出し、この変化量に基づき開先形状の変化を推定して、トーチ揺動幅と溶接速度(溶着量)の補正制御を行う。

また、カメラを内蔵した視覚センサヘッドは、一般に溶接部近傍に設置するため、溶接を干渉しないように極力小型化することが望ましく、なおかつスパッタ、溶接熱、ヒュームなどにも十分に耐える必要がある。写真1に開発した視覚センサヘッドを示す。このセンサヘッドの寸法は62(W)×41(H)×133(L)mmと小型であり、耐久性にも優れ、メ

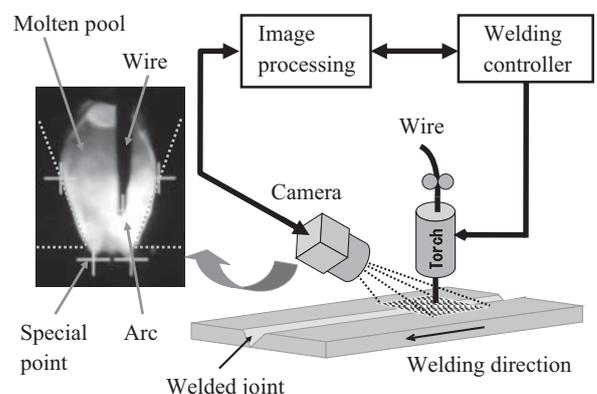


図1 視覚センサによる自動溶接システムの構成

Fig.1 Automatic welding system configuration using visual sensor

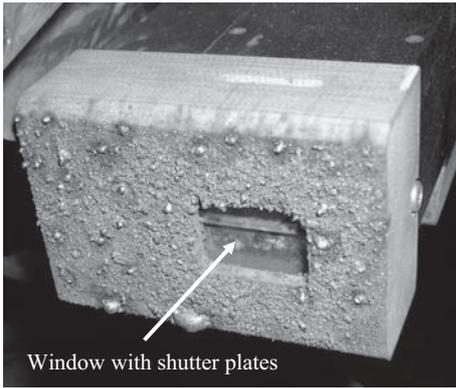


写真1 視覚センサヘッド
Photo 1 Visual sensor head

メンテナンス間隔は約100mの溶接長を溶接する時間に相当することが確認された。

2.2 センシングおよび制御方法

図2に当社が開発した視覚センシング方法の原理を示す。本方法ではワイヤ像の左右位置がほぼセンサ画面の中央部に位置するように、視覚センサヘッドをトーチと一体化させて、トーチと一緒に上下左右に動くようにしたことが特徴である。したがって、開先が広がっても、アーク直下の溶融池画像が常にカメラ視野の中に抑えられる利点を持っている。また溶融池の撮影は、トーチが揺動する場合にはトーチの揺動端部で行うことにした。トーチが揺動しない場合にはこのような制約は必要ない。

一方、撮影した画像は次のように処理される。まず、トーチ揺動左右端部で撮った溶融池画像を順次（左右→右左→左右）合成し、画像の重なる部分を抽出する。ここで、この重なった部分を「仮想溶融池」と呼び、またこの仮想溶融池を挟んだ開先を「仮想開先」と呼ぶ。この仮想溶融池を挟んだ両側面は実際の開先壁であるが、この見かけ上の「仮想開先」は実際の開先からトーチ揺動幅部分を切り捨てて、残った部分を溶接ワイヤ中心に寄せ合わせて形成されたものである。

次に、開先幅変化およびワイヤの溶接線食い状況などの情報を求めるために、まずこの仮想溶融池画像上の特異点である溶融池の左端点LPと右端点RPおよびワイヤ先端中心点WPをそれぞれ検出する。その結果仮想溶融池幅の特徴量 L_1 はLPとRPより求められ、また仮想溶融池幅の中心位置とワイヤ軸線間距離である特徴量 L_2 も得られる。

開先幅の変動が大きい場合、一般に溶接品質を確保するためにはトーチ揺動幅を開先幅の増減に応じて変化させる、いわゆる開先幅食い制御が必要である。ここでトーチ揺動幅の制御は仮想溶融池幅 L_1 に基づき行う。図2に示すように、仮想溶融池幅 L_1 の変化は仮想開先幅の変化、すなわち実開先幅の変化に起因することが分かる。したがって、トーチ揺動幅を開先幅に倣わせるためには、常に特徴量 L_1 をコンスタントに維持するようにトーチ揺動幅を変化させればよい。すなわち、 L_1 が大きくなればトーチ揺動幅を増大させ、逆に L_1 が小さくなればトーチ揺動幅を減少させるように制御すればよい。

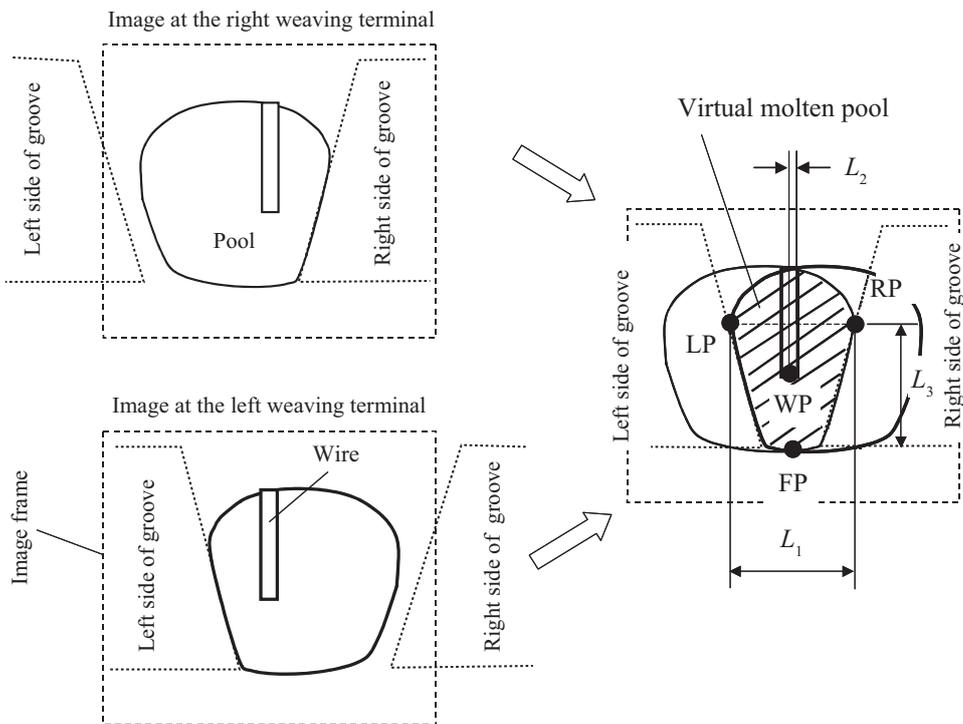


図2 視覚センサによる溶接線食い誤差、開先変動および溶着高さ変動の計測方法

Fig.2 Measurement method of seam tracking error, groove variation and metal deposition height variation using visual sensor

一方、溶接ワイヤの溶接線あい制御は特徴量 L_2 に基づいて行う。図2に示すように、溶接ワイヤの狙い位置は、仮に L_2 がゼロの場合を開先中心とすれば（開先形状が左右対称）、 L_2 がマイナス（ワイヤ軸線がLPとRP間の中央点の左側にある）になると開先中心の左側に、逆に L_2 がプラスになると開先中心の右側にずれることが分かる。したがって、溶接ワイヤの溶接線あい制御は、特徴量 L_2 を常にゼロに保つようにトーチ揺動中心位置を修正すればよい。開先形状が左右非対称の場合には、 L_2 にオフセットを与えておけば同様に溶接ワイヤの溶接線あい制御が行える。

ところが、開先幅が大きく変化した場合、仮に溶着量制御機能がなければ、溶着高さが著しく変化し、ビード高さが揃わないだけでなく溶接内部欠陥も発生しやすくなる。そこで、各積層の溶着量制御は次のような溶接速度制御を用いて行うことにした。

$$V_w = V_{wo} \times S_o / (S_o + \Delta W_b \times H_{bo})$$

式中、 V_w は溶接速度、 V_{wo} は基準溶接速度、 S_o は基準溶着断面積、 ΔW_b は実際のトーチ揺動幅と基準値との差、 H_{bo} は基準溶着高さを表す。

ただし、初層溶接の場合に、開先幅に基づく溶接速度制御だけでは、溶融池の溶融金属が目違いなどに起因する裏当て隙間に入ることによる溶着高さの変動を防ぐことができない。そこで、初層溶接の場合には、さらに溶着高さに関連づけられる仮想溶融池高さ、すなわち溶融池先端FPから特異点LPとRPを結ぶ線（両者の高さが不一致の場合には平均高さを取る）までの距離特徴量 L_3 を計測することにした。そして、特徴量 L_3 を常にコンスタントに維持するように、溶接速度を追加的に制御することにした。

3. 溶接結果と現地適用結果

写真2に本自動溶接システムで溶接したビード外観と断面マクロの一例を示す。溶接は下向き姿勢で行い、開先のルートギャップ変化は4～11 mm、目違いは0～3.2 mmである。写真2に示すように、開先の断面積と目違いが大きく変わっても、初層溶接時に所定のビード高さが保たれていることが分かる。この結果は、本自動溶接装置が開先の変化に高い適応能力を有することを示している。

図3に初層溶接時の各種溶接パラメータの自動制御結果一例を示す。溶接は立向上進姿勢で行い、開先はV形の鋼

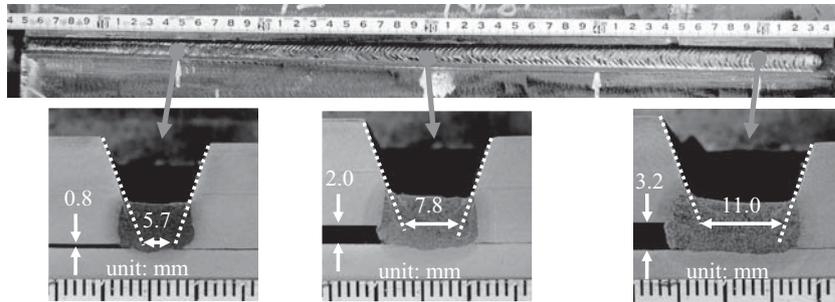


写真2 本視覚センサを搭載した自動溶接装置の溶接ビード外観と断面（下向溶接）

Photo 2 Appearance and cross sections of weld bead made by the automatic welding machine using the visual sensor (Flat position)

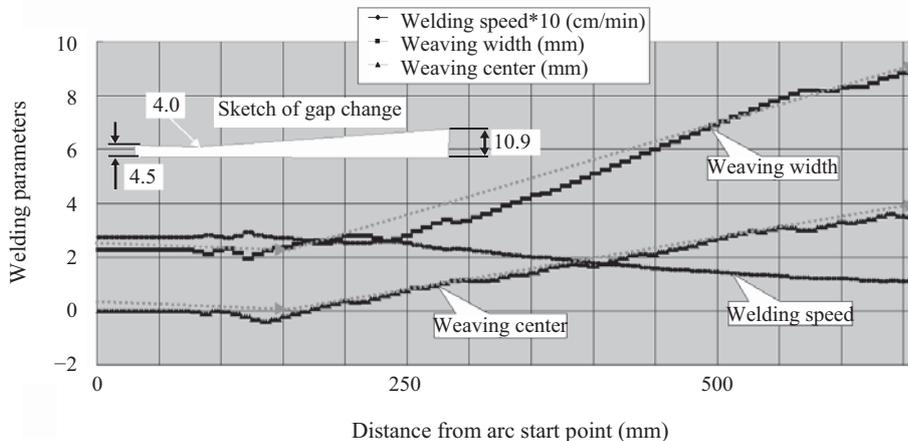


図3 本視覚センサを搭載した自動溶接装置の溶接パラメータ制御結果（立向上進溶接）

Fig. 3 Welding parameters control result of the automatic welding machine using the visual sensor (Upward position)

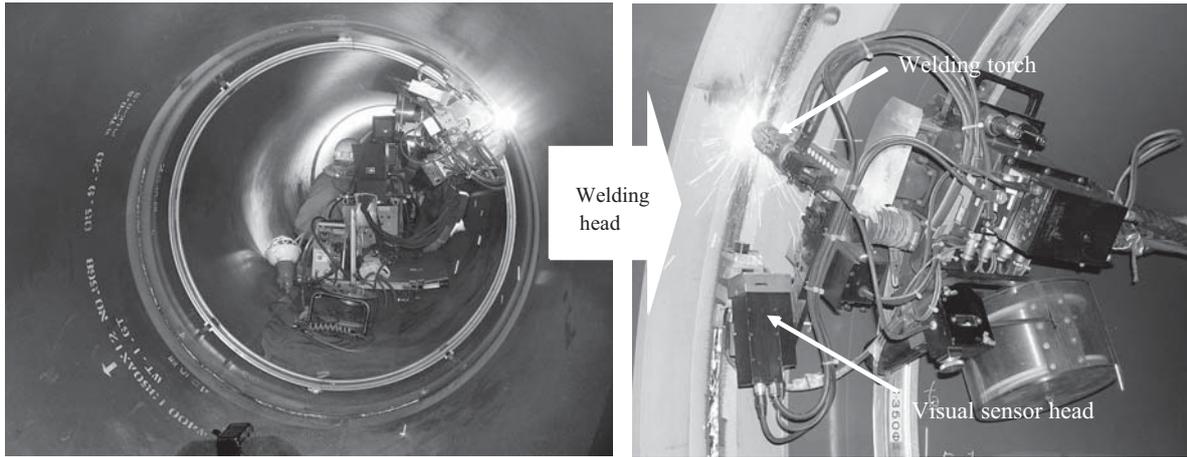


写真3 本視覚センサを搭載した自動溶接機の現地配管溶接への適用

Photo 3 Application of the automatic welding machine using this visual sensor to the on-site welding of pipeline

板裏当て金付き、目違いはゼロ、ルートギャップ変化は約4～11mmであった。図3に示すように、溶接線倣い、トーチ揺動幅および溶接速度の制御はいずれも安定した結果を示している。

これらの結果から、本自動溶接装置が良好な初層溶接安定性を有することが確認できた。

写真3に本視覚センサを使用した大径管全自動溶接装置（ソリッドワイヤ、MAG溶接）の現場適用状況を示す。この現場適用結果から、鋼板裏当て金を持つV形開先継手の溶接継手許容変動範囲は、溶接姿勢に関係なくルートギャップが4～11mmで、目違いが0～3mm（上向き姿勢では2mm以下）であることが確認された。

4. おわりに

本報は視覚センサによる自動溶接装置の構築とその溶接結果を紹介した。主な内容を以下に示す。

- (1) 視覚センサによる自動溶接システムの構築を説明した。本システムは溶接線倣い制御、トーチ揺動幅の開先幅倣い制御および開先幅倣い制御と溶接速度による溶着量の制御を同時に実現した。
- (2) 視覚センサのセンシング方法および溶接制御方法を述べた。まず、撮影した溶融池画像から独自の仮想溶融池を作り出し、その仮想溶融池の幅 L_1 と、ワイヤ軸線と仮想溶融池幅中心位置とのずれ量 L_2 を計測する。次に、 L_1 の変化に基づきトーチ揺動幅と溶接速度の制御、 L_2

の変化に基づき溶接線倣い制御が行われる。また、初層溶接時には、さらに仮想溶融池の幅高さ L_3 の変化を検出して、溶接速度の付加的制御を行い、裏当て隙間などに起因した必要な溶着量の不規則変化を補うことにした。

- (3) 本センサを使った自動溶接装置の適用例を紹介した。鋼板裏当て金を持つV形開先の場合、全姿勢溶接でも、開先変動はルートギャップ4～11mm、目違い3mm以下（上向き位置では2mm以下）が許容できることが確認された。

参考文献

- 1) 大嶋健司ほか. 狭開先ロボット溶接におけるギャップ変動に対する適応制御, 溶接プロセスの高効率化(溶接法ガイドブック5). P II 172-176.
- 2) 池辺真人ほか. インプロセス制御によるパイプライン用自動溶接方法, 溶接プロセスの高効率化(溶接法ガイドブック5). P II 260-263.
- 3) 前田剛ほか. 高能率全姿勢全自動パイプライン溶接技術の開発, 溶接プロセスの高効率化(溶接法ガイドブック5). P II 264-268.



毛 文傑



勝木 誠