

高精度アークセンサを搭載した小型自走溶接ロボットの開発

Portable Welding Robot with Multifunction Arc Sensor

技術本部 児玉 克^{*1} 河野 隆之^{*2}

郷田 穂積^{*3}

長崎造船所 岩 淵 寛^{*4}

アーク現象を利用したアークセンサは、ロボットなどの自動溶接装置に広く適用されているが、その原理上アークを揺動させる必要があり、狭あい箇所へ適用するためには装置の小型化が求められている。本研究では、電磁力によるアーク揺動機構を内蔵した小型トーチを考察し、それを用いた高速オシレートアーク法のアーク挙動を明らかにして高精度アークセンサを見いだした。本センサは、溶接線ずれ量、開先ギャップ幅を同時に検出でき、これを搭載した小型自動溶接装置は、溶接線ずれ、ギャップ幅適応制御が可能のため、狭あい箇所の溶接自動化に有効である。

Arc sensors using the arc phenomenon are widely applied in automatic welding robots. In principle, the arc must be moved back and forth. Welding equipment is down-sized to enable it to be used in areas with limited space. We focused on a small torch having an internal, electromagnetically driven arc vibrator. We clarified high-frequency arc oscillation and developed a highly accurate arc sensor that simultaneously detects welding torch positioning deviations and the width of groove gaps. A compact automated welding robot using this sensor demonstrated its suitability for automated welding in confined areas.

1. ま え が き

造船、橋梁、鉄構などの分野では、生産性向上・高能率化が積極的に進められている。製造技術の基盤である溶接・接合技術はこれらの構造物に広く適用されており、GMA（ガスシールドメタルアーク）溶接を中心にロボット等を利用して溶接自動化が図られているものの、複雑な構造では既存技術で対応できない場合がある。

例えば、造船構造における狭あい空間で、かつ開先精度が比較的良好でない溶接部である。造船に見られる三次元的な曲面構造のすみ肉溶接箇所では、部材は傾き、溶接線は曲がっている。さらに、部材の曲げ加工精度の限界から溶接開先にはふぞろいな開先ギャップが発生する。このような溶接部に対して、安定した溶接品質を維持しながら溶接の自動化を達成するためには、不安定要因をリアルタイムで検出できるセンシング技術が必要不可欠である。つまり、狭あい空間に適用でき、溶接線とギャップ幅を同時に検出できるセンサが求められる。

溶接自動化のキー技術であるアーク溶接用センサには、ブルー接触センサ、電極接触センサ、光センサ、電磁気センサ及びアークセンサなどがある。しかし、トーチ周辺に検出機器が必要なセンシング法は、狭あい空間への適用が制限される。この意味でアーク現象を利用したアークセンサが実用性に富む。アークセンサを適用するためには、その原理上、アークのオシレート動作が必要不可欠であるが、従来法では、トーチをオシレートするため比較的高トルクの専用設備が必要であり、アーク揺動機構の小型化が課題であった。これらの課題を解決するために、高速オシレートアーク法⁽¹⁾のアーク現象を利用した多機能アークセンサと、本センサを搭載した小型・軽量の自動溶接装置を開発した。高速オシレートアーク法は、アークの高速オシレートを可能とし、小型・軽量の駆動機構を実現した溶接法である。

本報では、高速オシレートアーク法を適用したアークセンサ及びこれを搭載した小型自動溶接装置の開発について述べる。

2. 高速オシレートアーク法

図1に高速オシレートアーク法の模式図を示す。左右一対の永久磁石と電磁石から成る電磁アクチュエータがオシレートの駆動源である。永久磁石は、トーチ（図示されていない）に揺動可能に取付けられた電極振動子に固定され、振動子の先端には給電チップが固定されている。この電極振動子を磁力でオシレートすることにより、トーチを固定したままでワイヤ先端、つまりアークのみを高速にオシレートすることができる。図1に示す電磁アクチュエータの重量は約0.2 kgfであり、トーチ本体を含めても1.0 kgf以下である。

高速オシレートアーク法は、揺動機構の小型・軽量化を可能とし、より狭あいな箇所への適用が可能となった。また、従来法のオシレートの周波数は、せいぜい数 Hz が限界であったが、本法では、最大 40 Hz までのオシレートが可能である。これは、アーク

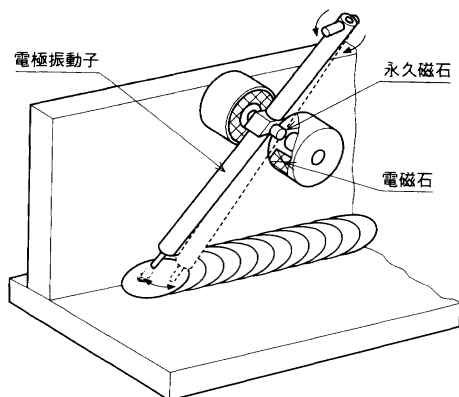


図1 高速オシレートアーク法 電磁力を利用して、トーチは固定したままアークを高速でオシレートする溶接方法及びその溶接トーチの構造を示す。
High frequency oscillating arc

*1 長崎研究所材料・溶接研究室

*3 長崎研究所第一実験課

*2 長崎研究所材料・溶接研究室主幹

*4 香焼工作部主席

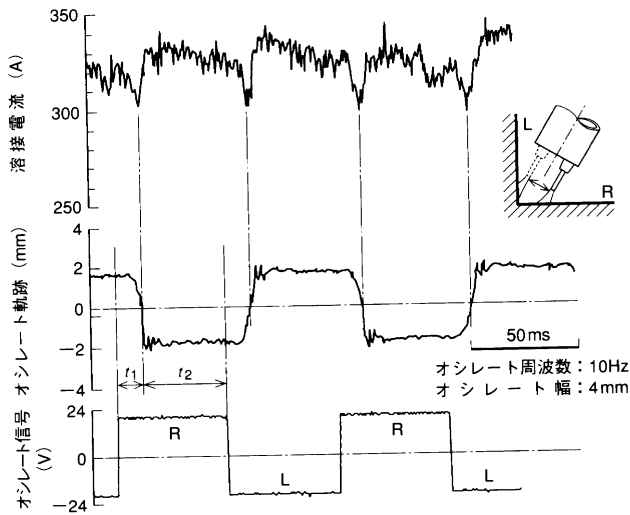


図2 高速オシレートアーク法の溶接電流波形 水平すみ肉溶接における高速オシレートアークの溶接電流波形を示す。アークが移動するときに溶接電流は大きく変化する。
Welding current waveform with high frequency oscillating arc

センサに適用した場合、サンプリング間隔を短くでき、信頼性の高い制御が可能になることを意味している。高速オシレートアーク法のアークセンサへの適用を図るため、本法のアーク特性を解析した。

図2に高速オシレートアーク法を水平すみ肉溶接に適用したときのアーク特性を示す。図2は、オシレート周波数10Hzのときのオシレート信号（電磁石の励磁電圧）、ワイヤ先端（アークの位置）のオシレート軌跡及び溶接電流波形を示す。オシレート軌跡は、ワイヤ突出し長さ20mmでのオシレート幅を4mmとしたときの動作をあらかじめ変位計で計測したものである。このオシレート軌跡と溶接電流波形から、高速オシレートアークは、次のアーク特性が認められる。

- (1) アークは開先両側で停止し、安定した溶接電流となる。
- (2) アークは開先内を高速移動し、溶接電流は急激に変化する。

(1)の開先両端ではアークは約80～90ms間停止するため、一定のチップ～母材間距離で安定した溶接電流となり、開先ギャップの影響を受けにくい。一方、(2)の開先内ではアークはオシレート幅4mmを約11msで移動しており、その移動速度は360mm/sに達する。そのため、アークの自己制御作用が不十分となり開先形状に合わせてアーク長が変化し、これに対応して溶接電流が急激に低下・上昇する。

なお、図2から分かるように、オシレート軌跡は、オシレート信号の極性的変化から時間 t_1 の間に変化し、時間 t_2 の間は一定である。時間 t_1 、 t_2 は一定であり、これらを計測することによりオシレート信号の変化からオシレート軌跡、つまり、アーク位置の時間的变化を推定することができる。

このようなアーク特性を利用して、溶接線のずれ量と開先のギャップ幅を同時に検出するアークセンサを検討した。

3. 溶接線ずれ、開先ギャップ幅同時検出アークセンサ

図3に溶接線ずれ、開先ギャップがある場合の溶接電流波形を示す。図3(f)の波形は、オシレート信号を示し、R、Lは、オシレート信号に対応してアークが開先のどちら側に移動しているかを示す。また、図3(c)は、溶接線のずれ、開先ギャップがない場

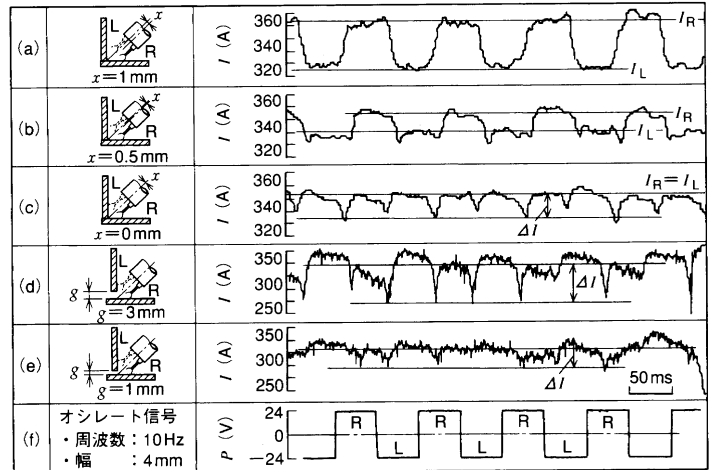


図3 溶接線ずれ及び開先ギャップがあるときの溶接電流波形 開先中心とトーチ中心のずれ量(x)、開先ギャップ幅(g)が高速オシレートアーク法の溶接電流波形に及ぼす影響を示す。
Welding current waveform with deviation of torch position(x) and groove gap(g)

合の溶接電流波形である。この溶接電流波形は図2とほぼ同様の变化が認められる。つまり、アークがオシレート先端で停止しているときの溶接電流は安定しており、R側、L側の電流値はほぼ等しい。アークが移動するときの溶接電流は開先の形状に応じて瞬間的に低下している。この状態の溶接電流変化を基準として、溶接線ずれ量、開先ギャップ幅の検出を行った。

図3(a)、(b)はオシレート中心と開先中心をずらしたときの溶接電流波形を示す。 x は、開先中心とオシレート中心のずれ量である。ここで、アークがオシレート端にあるときの溶接電流に着目する。例えば、ずれ量 $x=0$ mm [図3(c)参照]の場合、オシレート端での溶接電流は、ほぼ一定であり、約340Aである。これに対し、ずれ量 $x=0.5$ mm [図3(b)参照]では明らかにこの開先左右位置での溶接電流に差が表れており、図中に示す溶接電流差が生じている。これは、オシレート中心（トーチ中心）と開先中心がずれているために、オシレート端での位置R、Lにおけるチップ～母材間距離に差が生じ、 I_R 、 I_L の差として表れたものである。ずれ量 $x=1$ mm [図3(a)参照]では、さらに電流の差は大きくなっている。この溶接電流変化から、開先中心とオシレート中心の相対的なずれ量が検出可能となる。従来のアークセンサでも、開先内をアークが移動するときの溶接電流変化を利用して、溶接線のずれ量を検出できるが、高速オシレートアーク法の場合、オシレート端（開先左右）でアークが停止して安定した時点での溶接電流のみを溶接線ずれ検出データとして利用するため、開先ギャップの有無による外乱が少ない。

図3(d)及び(e)は、開先ギャップがある場合の溶接電流波形である。アークが開先ギャップを移動するときの溶接電流の変化を見ると、開先ギャップに応じて溶接電流は急激に低下・上昇する。アークが移動する時間 t_1 での最小溶接電流と、アークが停止する時間 t_2 での平均溶接電流との差 ΔI に着目する。アークが移動するときは、前述したようにアークの自己制御作用は不十分で、開先形状に応じてアーク長は変化する。このとき、開先ギャップがある場合には、ない場合に比べてアーク長はより大きく変化するため、より低い溶接電流となる。ギャップ幅 $g=3$ mm [図3(d)参照]では、ギャップ幅 $g=1$ mm [図3(e)参照]に比べて ΔI が大きく、ギャップ幅が大きくなるに従って、 ΔI が増加する傾向を示し

ている。従来のオシレート法では、オシレート速度が遅いためアークの自己制御が十分に機能し、アーク長の変化が少ないため、溶接電流の差 ΔI が生じにくく、開先ギャップの検出は困難である。本法では、オシレート速度が速いため、 ΔI からギャップ幅を推定することが可能となる。これらのアーク特性から、溶接線ずれ量とギャップ幅を同時に検出できる。

図4に高速オシレートアーク法によるアークセンサの原理を示す。オシレート信号の極性変る時間を基準として、アークが開先内を移動する時間 t_1 とアークが開先両端に停止する時間 t_2 での溶接電流を情報源として、溶接線ずれ量と、開先ギャップ幅を図4中の演算式で検出する。図4式(1)は、開先中心とオシレート中心(トーチ位置)のトーチ左右方向ずれ量、式(2)は、トーチ高さ方向のずれ量の演算式である。これらのずれ量は、オシレート端での溶接電流のみから演算されるため、開先ギャップの影響を受けない。式(3)は、開先ギャップ幅検出の演算式である。アークが停止している時間 t_2 での溶接電流の平均値と、アークが移動している時間 t_1 での溶接電流値最小値を比較し、その差をギャップの検出量

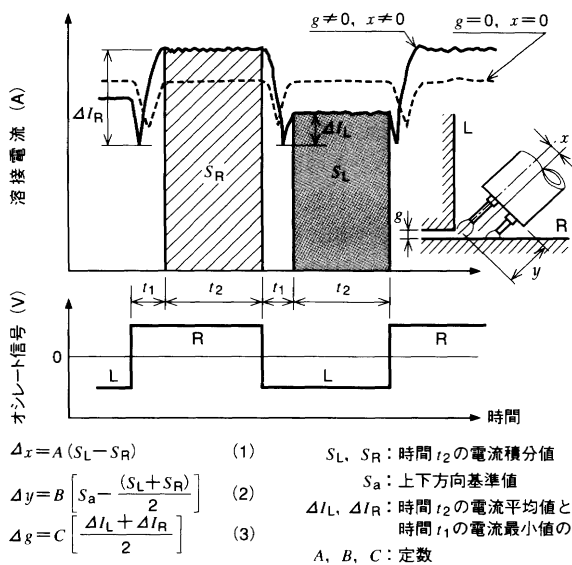


図4 アークセンサの原理 高速オシレートアーク法のアーク特性を利用したアークセンサの検出原理を示す。
Principle of arc sensor with high frequency oscillating arc

とした。これらの演算式を用いて、オシレート信号及び溶接電流から溶接線のずれ量と開先ギャップ幅を同時に演算することができる。

4. 自走式小型自動溶接装置の開発

図5に開発したアークセンサを適用した小型自動溶接装置の構成を示す。本装置は、走行台車、手元操作箱、制御装置及び高速オシレートトーチから構成されており、既設の溶接電源、ワイヤ送給装置と組合せて使用する。装置本体は、走行軸を含む直交3軸とトーチ旋回軸の4軸駆動で、水平すみ肉、立向すみ肉溶接に適用可能である。走行軸にはステアリング機構を設け、曲がったロンジの水平すみ肉溶接でも自走方向を修正しながら溶接線追従が可能である。本装置では、アークセンサにより溶接線を追いながら溶接すると同時に、検出した開先ギャップ幅に応じて溶接速度を脚長一定となるように適用制御できる。また、タッチセンサによる始端検出、アークセンサによる終端検出も可能である。装置の操作は手元操作箱で行い、溶接条件は、制御装置で設定・管理でき、パソコンにより自動溶接の動作を自由に編集可能とした。

表1に自動溶接装置の主な仕様を示す。装置寸法は、高速オシレートトーチを搭載した状態で405×225×225 mmと小型であり、重量は約14 kgfと軽量化を実現した。図6(a)に溶接装置本体の構

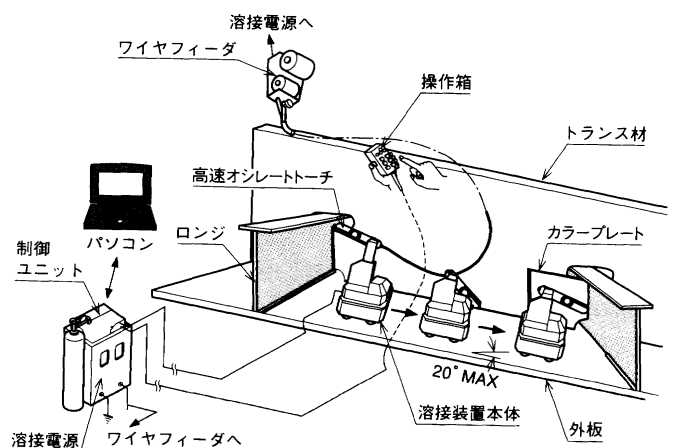
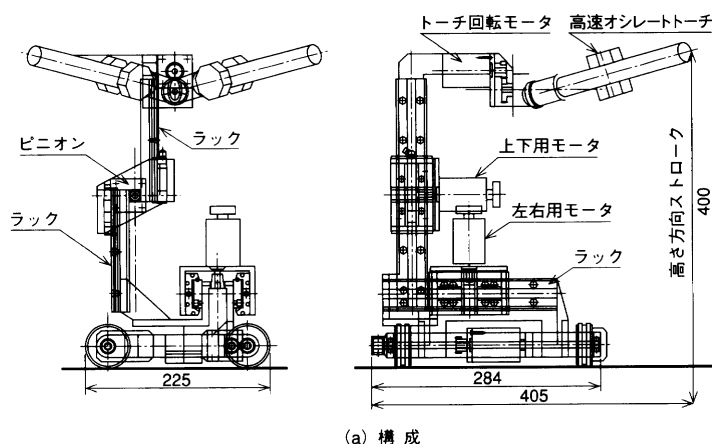


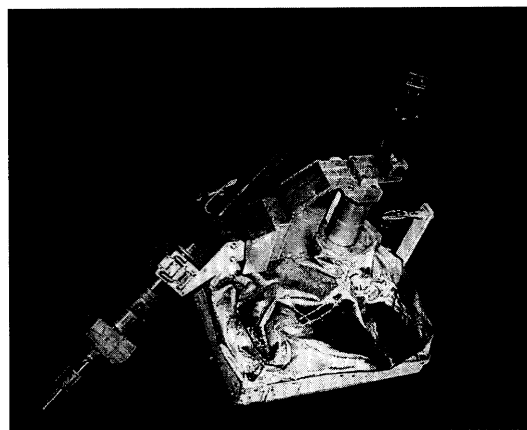
図5 アークセンサを搭載した小型自動溶接装置 高速オシレートアーク法による多機能アークセンサを適用した溶接装置の構成を示す。
Handy welding robot with multifunction arc sensor

表1 自動溶接装置の主な仕様
Specifications of welding robot

オシレートトーチ	オシレート周波数	最大 40 HZ
	オシレート振幅	最大 4 mm
	重量	1 kgf
装置本体	寸法	幅 405×高さ 225×長さ 225 mm
	重量	14 kgf (トーチ含む)
	走行軸	自走式, 最大速度 1 m/min, ステアリング機能付
	左右軸	ストローク 200 mm, 最大速度 2 m/min
	昇降軸	ストローク 400 mm, 最大速度 2 m/min
	旋回軸	ストローク 250 mm, 最大速度 2 m/min
自動溶接機能	溶接線追従	アークセンサにより溶接線検出, 精度: ± 1 mm
	開先ギャップ対応	アークセンサにより開先ギャップ幅検出 自動終端部処理
	終端部	アークセンサにより溶接線終端検出 自動終端部処理
	始端部	アークセンサにより溶接線始端部検出 自動溶接開始



(a) 構成



(b) 外観

図6 小型自動溶接装置の構成及び外観 高速オシレートトーチを搭載した自動溶接装置本体の部品構成及び寸法とその外観を示す。
Structure and external view of portable welding robot

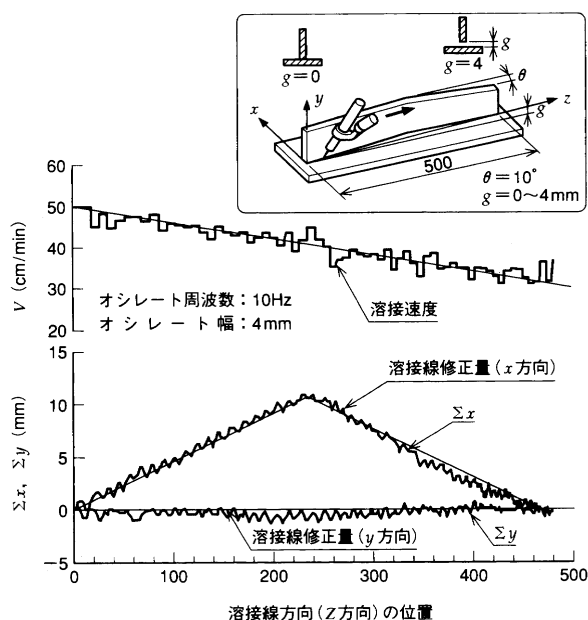


図7 自動溶接装置による溶接試験結果 溶接線ずれ, 開先ギャップ幅の同時検出結果を基に適応制御の結果を示す。
Test results of welding robot with multifunction arc sensor

ある。小型・軽量化を図りつつ、従来にない広い可動範囲を確保できた。本装置は可搬性に優れ、狭あい溶接部への適用が容易である。

図7に本装置による溶接線ずれ, 開先ギャップ幅同時検出の試験結果を示す。試験体は, 図7に示すように溶接長 500 mm に対して溶接線が中央で“への字”に約 10° 屈曲し, さらに, 開先ギャップ幅が溶接開始点から終了点にかけて直線的に増加して, 最大 4 mm となる形状とした。図7から分かるように, 溶接速度は開先ギャップ幅に対応して設定値に沿って適応制御されている。また, トーチ位置修正量の累積量 Σx , Σy は, 溶接線の形状にほぼ沿っており, 溶接線を自動倣いしていることが分かる。

以上のことから, 高速オシレートアーク法による新しいアークセンサを搭載した小型自動溶接装置は, 溶接線ずれ量と開先ギャップ幅を同時に検出可能であり, 装置の小型化を実現しているため, 開先精度が比較的良くない狭あい溶接部の溶接自動化に有効である。

5. む す び

高速オシレートアーク法を適用した高精度アークセンサ及びこれを搭載した小型自動溶接装置は, 狭あい箇所の溶接自動化に有効である。溶接技術は, 製造技術の基盤となる技術であり, 確かな品質, より効率良い物造りを目指して今後も技術開発に取り組む所存である。

参 考 文 献

- (1) 児玉ほか, 新高速すみ肉溶接法の開発, 三菱重工技報 Vol.35 No.2 (1998)

成を, (b)にその外観を示す。図6に示すように, 小型・軽量であるが広い範囲を可動できる。トーチ左右・昇降軸は2ラック1ピニオンのロングストローク機構を採用し, その可動範囲は左右方向 200 mm, 上下方向 400 mm である。トーチの旋回軸は装置の前方・後方の立向すみ肉溶接に対応可能で, 旋回角度範囲は 260° である。