特集

アーク溶接自動化
技術の現状と課題

⑤ 建設機械におけるアーク溶接 自動化技術の現状と課題*

高野 悠 敬**

The-State-of-the-Art and the Subjects of Arc Welding Automation in Construction Machine Industry*

by Yutaka Takano**

キーワード：溶接自動化，仮付溶接の自動化，建設機械製造

1. はじめに

建設機械産業は最近の二十年間でほとんど製品価格が上昇しなかった産業である。特に油圧ショベルは二十年前に比較して、実際の販売価格は逆に数%下がっている。しかしながら生産量は高成長を続け、現在では世界の生産量の過半数を占めるようになっている。この原因は種々考えられるが、激的な機能とコストの競争があり生産性の向上を常に目指して来たこともその一つとして挙げられる。溶接の自動化に早くから取組で来たのもこのような状況に関連している。現在は溶接自動化率の向上が一段落し、自動化の質の向上が計られている。又大型建機部品の溶接自動化では、次の技術的発展の方向を模索している。

本稿では油圧ショベル部品の自動化例から、建機部品の特徴と自動化の現状および課題について述べる。

2. 溶接自動化にあたっての諸条件

溶接の自動化を考える時、対象とする製品によりそのアプローチの方法は全く異って来る。従って同業他社のやり方は参考になるものの他の産業分野については、共通に使える要素をいかに探すかにかかっている。この辺に生産技術者の苦勞と感性の発

揮し所が有りそうである。具体的には下記(1)～(4)項が自動化へのアプローチの方法を決めている。

- (1) 生産数量（特に繰返し生産であるか否か）
- (2) ワークの属性（使用材質，板厚，大きさ等）
- (3) 要求される溶接施工と品質
- (4) 自動化のために設計変更する自由度の大きさ

生産数量が年に数個であったり繰返し性が無い場合は自動化は出来ても無人化は現実問題として極めて難しい。ワークの属性は、材質，板厚，形状，重量，加工精度等さまざまであるが、製品別に類別すると特徴のあるグループに分けられる。これにより溶接施工の方法がある程度定まって来る。要求される溶接施工の品質は溶接自動化を図る時に見落されがちであるが非常に重要な問題である。これは単に熟練した溶接作業員と同等な品質を要求するのではなく、何が同等かまで分解して示す必要がある。すなわち溶け込み深さのバラツキが少ないのを要求している。又は溶接速度の等速性を要求しているならばこれを自動溶接で実現するのは容易である。しかし部材の溶接開先のバラツキに対応するとなるとかなり高度な自動化となる。さらに溶接中に起きた異常や欠陥を察知してこれに対応する処置や動作を行なう事を要求されると自動化はかなり遠のく。しかしながら熟練した溶接作業員は溶接作業の中でこれらの種々の要求を常に取扱って良好な品質を確保している。最近の技術的進歩の目標はこの辺に向けられているものが多いが、今だ越え難きハードルになっているものが多い。この技術の進歩の不足を補

*原稿受付 平成5年6月30日

**正員 日立建機㈱ Member, Hitachi Construction Machinery

なう方法として、設計を変更してより作り易くして品質が保たれるようにする事が必要となる。

建設機械の溶接構造物の自動化の条件をこれらの項目で比較すると生産数量については図 1 で表わすことが出来る。当社で生産している最も生産数量の多い中型油圧ショベルで月産数百台であり乗用車と比較すると 1 桁少ない生産量である。この生産量はバス、トラックの生産量と類似している。大型油圧ショベルやクローラークレーンになるとさらに 1 桁生産量が少なくなり重量も増して来る。この範囲は冷凍機や送風機などの産業機械の分野と類似して来る。すなわち中型油圧ショベルではトラック生産の自動化と共通点があり、大型油圧ショベルでは産業機械の溶接自動化例が参考になる。

表 1 に建設機械溶接構造物のワークの特徴をとりまとめた。使用板厚は 8 mm~25 mm の中板厚が大

図 1 建設機械溶接構造物の分布

表 1 建設機械構造物の主な特徴

項 目	内 容
使 用 板 厚	板厚 8mm~25mm の中板厚が大部分 溶接脚長は板厚×0.7 が多い。
溶 接 線 長 さ	溶接線長さは 60% が 1m 以下、最大で 10m
継 手 形 状	すみ肉継手が 95%、突合せ継手は 少ない。
使 用 材 質	軟鋼材が 94%、残り 6% が 60kg/mm ² までの高張力、ステンレス・アルミは 無い。
溶着金属量 製品重量	非常に多い (3~5%)

部分であり、溶接線長さは 60% が 1 m 以下である。これは溶接中にワークのポジショニングを頻繁に行なう必要があることを示している。継手形状はすみ肉継手が多い。このためすみ肉継手をうまく自動化する事を考えなければならない。使用材質は軟鋼材が大部分で有り溶接の難易度は比較的容易である。最大の特徴は建機が地球に対して仕事をするためには機械自体にある程度の自重を必要とする。このため構造物自体が重くなっている。加えて溶接継手部の強度も板厚分必要で結果として、溶着金属量が多くなり溶着金属重量が部品重量の 3~5% になる。このため大型の建設機械部品ではひとつの部品の溶着金属量が 1000 kg を越えるものがある。溶着金属量が多い事は総加工時間に占める溶接加工時間比率が高いことを表わしており溶接自動化のニーズは大きくなる。溶接品質は未溶着部を残した継手も多数用いられており、压力容器等に比較すると要求品質は低いと言える。設計の変更に対する自由度は自社の責任より行なえるため一般的な産業機械と同等である。

総合的に見れば、中小型油圧ショベル部品のように数量が比較的によく 500 kg~2000 kg のワークについてはアーク溶接ロボットが最も効率良く使える分野である。このため 1976 年最初に開発された溶接位置検出センサー付の溶接ロボットは中小型油圧ショベル部品を対象としたものであった。以来普及は急速に進み現在では溶接ロボットでの溶接比率はこの大きさの部品では 80~90% に達している。しかしながら大型建設機械の部品では 30% 程度であり他の産業機械より格別進んでいるとは言えない。これは中小型の建設機械部品と大型の建設機械部品で、自動化のアプローチが同じでは限界が有ることを示している。

3. 中型油圧ショベル部品の溶接自動化

3.1 継手形状の改善による自動化の推進

中小型油圧ショベルの溶接構造物の使用板厚は 9~12 mm が一番多い。この板厚は特に腕にあたる図 2 に示すブーム、アームに使用されている。溶接自動化を推進するためには溶接開先を簡素化するのが肝要であるがその 1 例として開先を廃止した設計変更例を図 3 で示す。図 3 で板厚 10 mm に対し 2 mm のルートフェイスを残し 45° の V 型開先を取り 1 層目の溶接行ない 2 層目で 7 mm のすみ肉脚長を付ける設計であった。この継手の自動溶接施工の問題点は

1層目にある。レ型開先の溶接ではルートフェイスが少ないため溶接時の突抜けが発生し易く、又ワイヤのねらい位置が少しずれると未溶着が設計許容限度以上に大きくなる。このため自動化しても品質の確保が難しかった。これに対して炭酸ガスアーク溶接では図4のように使用電流に比例して、すみ肉溶接の溶け込み量は増加して360 Aでは4 mm以上の溶け込みを得ることが出来る。

しかしながらこれは実験値であり実際の溶接ではワイヤのねらい位置はワイヤの先端曲りや、センシング時の誤差のため左右にずれる、これによりある確率密度で溶け込みが変わって来る。このように実際に起る溶け込み量の分布を求めたのが図5である。

図5においてMAG自動溶接の溶け込み量は平均3.7 mmである。又同じ部位のCO₂の半自動溶接の

図2 中型油圧ショベル EX 200

図3 すみ肉溶接継手の設計変更

溶け込み量の平均は3.1 mmであり、あまり差はないが分布は大きな差がある。このため溶け込み量が3 mm以上になる確率密度は自動溶接が77%，半自動溶接が48%と大きな差が出て来る。これにより自動化すると品質のパラツキが少なくなるメリットが分る。図4の推定値を基に溶け込みによるのど厚の増加を計算に入れてレ型開先2層溶接を図3の如くすみ肉1層継手に変更した。この変更により開先加工時間、溶接時間共に大幅に低減し、かつ安定した自動溶接が可能となった。

3.2 溶接 FMS ライン

自動溶接に適する構造や継手形状に設計を変更す

図4 溶接電流と溶け込み量の関係

溶接法	確 率 密 度			
	溶け込み 4mm 以上	3mm 以上	2mm 以上	1mm 以上
MAG 自動溶接	37.8 %	77.1 %	93.5 %	99.8 %
CO ₂ 半自動溶接	30.8 %	48.0 %	72.9 %	87.7 %

図5 溶け込み量の推定

これらについてはロボットメーカ、ユーザ共に長年に渡り対策方法を考え商品化して来ている。しかしながら有効性は使用される状況が様々なために普遍的ではないのが問題である。FMSラインにとっては最後の1名を無人化すると共にサイクルタイムの変動を無くするのが今後の課題である。FMSラインの経験の長い自動車産業、又は建機産業がこの両方を満足する長時間無人運転について他産業に先駆けて進むと思われる。

3.3 溶接ロボットの前後工程の自動化

溶接FMSラインは溶接ロボットで溶接する部分は無人化に近づいているが、その前工程である製缶組立と仮付溶接は有人である。又後工程に仕上溶接工程と呼ばれる、溶接ロボットが溶接出来ない部分を溶接し、かつロボットの溶接不具合を修正する工程を置くのが普通である。これらの有人工程をいかにして自動化するかが今後の課題である。本稿では製缶組立、仮付溶接の自動化の試みについて述べる。

人間が行っているように片方の手で部材を正しい位置に位置決めして押え、片方の手で仮付溶接する作業をロボットに置き換える方法は二通り考えられる。一つは部材が小さく、ロボットを周囲に配置するスペースが十分にある場合である。この場合は2台以上のロボットを配置して協調動作をさせる事が可能である。しかしながら部材が100 kg以上の重さになると、部材を動かすロボットと溶接トーチを持つロボットでは構造と強度が違って来る。また、部材を運搬する距離を大きく取る必要がある場合は大ストロークのロボットが必要になる。そこで大ストロークの搬送ロボットに溶接ロボットを取付る双腕ロボットを考えた。

図8は中小型ショベルのブームブロックをハンドリングするため搬送ロボットとして門型の直角座標ロボットを採用した例である。これにより広い作業範囲(10m×5m×1.5m)を確保し、高速(50m/

min)、大可搬重量(500 kg)で高精度な位置決めが可能である。ロボットの軸構成は図9の如く、搬送ロボットが6軸($X, Y, Z, \beta_1, \beta_2, \beta_3$)溶接ロボットが5軸($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$)である。

この双腕ロボットを使用した製缶組立作業は治具を使つての人手による作業と比較してサイクルタイムが長くなるのが欠点であったが、部材の把持方法の改良や組立治具の工夫により最近の改良システムでは人手よりも速く組立てられるのも出て来た。今後は実用化の速度を速めて行くと思われる。図10はブームブロックの仮付溶接を行なう双腕ロボットの腕の部分である。搬送ロボットは鋼板搬送用の電磁マグネットをつかんでいる。

図9 組立溶接ロボットの軸構成

図10 組立溶接ロボットの双腕部

図8 直交座標型組立溶接ロボット

4. 大型油圧ショベル部品の溶接自動化

大型建設機械部品、ここではその代表例として大型油圧ショベル部品の自動化について述べる。大型油圧ショベルは製品の重量が数十トンから数百トンまでのものがある。図11は国産最大の350トンクラスの油圧ショベルである。これらの大型機械は鉱山や碎石場で使用される事が多く、機械の稼働率を上

げるためオペレータが交代し昼夜使われる。このため顧客が満足する耐用時間も中小型油圧ショベルの2～3倍必要である。そこで溶接構造物の疲労強度を向上させるため溶接ビードの止端の形状を滑らかにする必要がある。又板厚が厚くなると多層多パスの溶接になる。十数パスの自動溶接を行って良い溶接品質を得るためにはティーチング時のデータベースが相当にしっかりしたものでなければならない。

さらに板厚が50mmを越えて厚くなる。又は炭素当量の高い鋳鋼品との溶接では予熱作業が必要となり、この自動化も考えなければならない。溶接施工の問題以外にも装置が大型になると設備投資の損益が悪くなる。

表2に大型油圧ショベル部品の溶接自動化の問題点を表わす。

図12は大型油圧ショベルブームの溶接ロボットである。システム構成は走行、前後の2軸の補軸の上に、5軸のロボット、ワイヤパック、ヒューム集塵

図 11 大型油圧ショベル EX 3500 (重量 350 トン)

表 2 大型油圧ショベル部品の自動化の難しさ

項 目	条 件	自動化に対する難しさ
生産数量 (月当り)	1台～20台	自動化の投資効率が悪い
ワーク重量	5,000kg ～30,000kg	大荷重用のボジョナーが必要(投資額増加)
構造物が 要求される 耐用時間	中小型ショベル の2～3倍	溶接止端処理が必要 溶接欠陥の許容度が少ない
使用板厚	20mm ～150mm	溶接時に予熱が必要
溶接施工 積層法	多層多パス	ティーチング時に溶接 データベースが必要 溶接時にAI技術が必要

機等を乗せてある。予熱装置もこの補軸に取付けてあり、シリンダーで出し入れをする。このロボットを1台の昇降式ボジョナーに対向して2台配置している。これにより予熱装置は3自由度の動きがロボットのティチングで出来るため、予熱が必要な部位を自動で予熱する事が可能である。

表3に溶接自動化の課題について中小型建機を大型建機について分けて記した。この表の中の課題の多くは技術的難度は増すが、中小型で実施した技術のトランスファで目標達成を図れると思われる。しかしながら経済性と言う点では、従来の溶接ロボットとMAG溶接の組合せでは1台のロボットで150

対象ワーク

図 12 予熱装置付溶接ロボットの使用例

表 3 建機部品溶接自動化の課題

課 題	中小型建機	大型建機
自動化時の 経済性を満足する溶接法	◎	△
オフラインティーチング	◎	○
溶接データベースとAIの 適用	○	○
溶接ビード止端加工の自動化	△	△
予熱作業の自動化	△	◎
長時間無人運転	○	○
溶接の前後作業の自動化	○	△

◎ 見通しのあるもの ○ 着手中のもの △ 将来の技術発展を待つもの

g/min の溶着速度であり、4 元ガスや、メタルフラックスコアードワイヤを使用しても 200 g/min が限界である。投資計算から見れば 500 g/min 欲しい所である。又時間当りの溶着金属量を増す他の手段として、同じ投資費用で溶接トーチを 4 本以上コントロールするロボットが考えられる。しかしながら平面的な溶接構造物と違って、同じ溶接姿勢が 4 ヶ所出て来る事は無いので各トーチが全く別個の動きをする事を考えなければならない。これを実現するには低価格なユニットとして使えるロボットの開発や、溶接姿勢に影響を受けることの少ない溶接法の開発を待たなければならない。

5. お わ り に

技術の進歩は等速であるとは言えない。長い間新

しいものが出ないで、ある時急に進展する事がある。技術開発には懐妊期間があつてこれは外からは見えないものだそうである。溶接自動化技術は、溶接法、施工法、ワイヤ、溶接機器、溶接装置のコントロール、センサ、部材精度、ワークの設計、等多くの技術要素の集合体でありそれぞれの技術が別々の懐妊期間をもっている。従つて世の中の動向を広く見て何を取り入れて改良すべきかを考えなければならない。又技術の発展の速度はニーズの強さに影響されるので各産業の要求するニーズを明確にすることが肝要であろう。建機産業の自動化のニーズは本稿で課題として挙げた方向に向うと思われる。

これらの要素技術の開発がバランス良く進展し、次の大巾な自動化の進捗につながれば幸いである。

書 評

書 名：The Science and Practice of Welding Vol. 1

—Welding Science and Technology—

著 者：A. C. Davies

発 行：Cambridge University Press

溶接工学は材料、電気、力学、エレクトロニクスなど広範な分野にまたがる学際的学問分野であるため、その理解や修得のためには幅広い知識が要求される。このため溶接工学の体系的テキストとして、その領域をすべてカバーするとなると大冊となり多数の分冊にせざるえなくなる。

しかしながら、初学者や他分野の技術者が溶接工学を学ぼうとするとき、このような大冊では要点がつかみにくく、かえって理解が困難となる点があることは否めない。本書のシリーズはこの点を考慮して溶接工学の基礎となる広範な分野を要領よく 2 分冊にまとめた溶接工学の入門書である。

その Vol. 1 にあたる本書では溶接工学に関連した材料科学、電気工学及び試験工学の基礎が解説されている。なお、Vol. 2 では、溶接法並びに溶接機器について書かれている。本書の内容は下記の章立てで構成されている。

1. 溶接の科学、2. 溶接冶金、3. 合金と状態図、4. 電気工学の基礎、5. インバーター、6. 溶接部の試験と検査、7. 溶接設計と溶接記号

本書はその初版が 1941 年に刊行されて以来、版を重ねて今回刊行本は 10 版となる。その発行期間の長さは本書が多くの読者から指示されていることの証左といえよう。また、その間絶えず溶接工学の技術や対象材料の新しい変化を採り入れながら改訂されており、全く古さを感じさせない。本書は Vol. 2 と併せてこれから溶接工学を学ぼうとする技術者や学生のための好適な入門用テキストとなろう。

(K. N)

* Vol. 2 についての書評は、本誌 63 頁に掲載しております。