

Robotization of Steel Frame Welding



福原 昇

Noboru Fukuhara

エンジニアリング事業
部 研究開発センター
施工研究室 主任研究
員(掛長)

志賀 厚

Atsushi Shiga

エンジニアリング事業
部 技術総括部長

橋本 順次

Junji Hashimoto

エンジニアリング事業
部 建築技術部開発設
計室 主査(課長)

安田 博和

Hirokazu Yasuda

エンジニアリング事業
部 建築技術部開発設
計室

中島 松重

Matsushige Nakajima

四国鉄工(株) 丸亀工
場技術開発室 課長

則長 保南

Yasuhiro Norinaga

四国鉄工(株) 丸亀工
場技術開発室 課長

1 緒 言

近年、溶接ロボットは多方面に広く利用され、多大の成果が得られている。しかし、建築鉄骨部材は重厚長大かつ一品一様であるため、その溶接に関してはロボットの適用がかなり遅れている。すなわち、鉄骨の反転あるいはロボットの移動に大規模な装置が必要となるうえ、従来方法ではロボットに溶接線の位置や動作順序の指示に長時間を費すために、一般的にはその投資に見合うだけの効果を期待することができなかった。

しかしながら、昨今の高学歴化および若年労働者の3次産業への流れが原因で熟練溶接者の確保が困難になりつつあり、建築鉄骨業界においても生産形態の革新を早急に推進せざるを得ない状況が近づきつつある。本報ではこのような状況に対応すべく開発した「鉄骨柱大組溶接ロボットシステム」について述べる。

2 鉄骨柱の製作工程

建築用鉄骨柱は柱断面形状により箱型と十字型に、また柱・梁仕

要旨

建築鉄骨柱製作工場における柱大組工程の溶接作業効率化を目的に、市販の垂直多関節型溶接ロボットを核にした、パソコン、溶接ロボット、ロボット移動台車および柱ボジショナで構成される自動溶接システムを開発した。柱仮組後の主要寸法をパソコンへ単純に数値入力するだけでロボットおよび反転機や台車等周辺機器の制御に必要なすべてのデータが自動作成される方式とした点に最大の長があり、極めて短時間でロボットへの指示ができる。したがって、当システムは一品一様生産の代表である鉄骨柱を対象としてもロボット適用の成果が期待できるものである。標準的な柱に当システムを適用した結果、溶接工1人にほぼ等しい能率が得られた。

Synopsis:

In order to reduce the manufacturing cost, an automatic robot welding system for steel frame construction has been developed. This system is composed of a commercial welding robot, a transport vehicle for the robot, turning equipment for frame connection work and a controller (personal computer). The movements of all the components are systematically controlled based on the dimensions of column concerning the starting and finishing points of each weld line. Those dimensions are input manually to the controller prior to welding operation. One of the special features of this system is that the command program for the movements of each component is automatically produced from the input dimensions. The command program is produced quickly and it is easy to input dimensions. Another feature of the system is that sensing mechanisms are widely utilized in the welding robot in order to maintain the accuracy of torch positioning to the weld line.

口の構造により梁貫通方式と柱貫通方式とに分類される。一例として、Fig. 1 に梁貫通方式による十字型柱の製作順序を示す。柱の製作は大板の切断に始まり柱主材と仕口とを並行して製作し、それぞれができ上がったところで柱主材と仕口を組み立てて1本の柱製作が完了する。

この柱製作上の重要な溶接作業は柱主材の組立溶接、仕口の組立溶接および柱大組溶接であるが、柱主材の組立溶接は単純な隅肉溶接が主体なので比較的簡単な自動溶接機で対応可能であり、従来からその導入が図られてきている。しかし、仕口の組立溶接と柱大組溶接は、溶接線の位置、方向、姿勢、板厚および継手形状が種々混在しているため容易に自動化は進まず、人手による溶接に頼らざるを得ないのが現状である。

このような鉄骨柱製作上の問題に対して、単体の部材製作、仕口仮組後の溶接および柱主材と仕口の仮組(大組)後の溶接を対象に、それぞれに適したさまざまな溶接ロボットシステムの開発が各所で試みられている¹⁻⁵⁾。

* 平成2年9月6日原稿受付

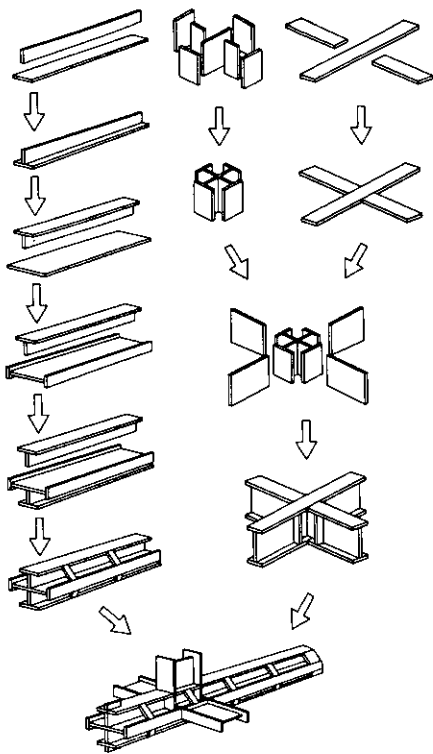


Fig. 1 Fabrication process of column

3 ロボット適用上の問題点と開発課題

3.1 従来技術の問題点

(1) ロボットの教示

ロボットは汎用装置であり、その仕様範囲でどのような動作でも行う。換言すれば、そのままではロボットは自由度が高すぎて動けない。そのため人が具体的な動作経路すなわち始動から溶接線へのアプローチ、溶接、退避そして停止に至るすべての動作順序を規定する必要がある。

ティーチング・ブレーバック・ロボットは、ロボットが動く予定の移動経路をオペレータが実際にロボットアームを動かして教示する方式であり、その教示には実動作時間以上の作業時間を要する。一度の教示作業で複数の柱を溶接できるのであれば自動化の効果は期待できるが、鉄骨柱は一品一様なのでこのような教示方法は実用的でない。また数値制御 (NC) ロボットは起動する前にその動作順序をすべてプログラムされていなければ動けない。このプログラム作成はティーチング・ブレーバック・ロボットを教示する以上に長時間の作業を必要とする。

したがって、ティーチング・ブレーバックあるいは NC ロボットでも市販の溶接ロボットをそのまま利用しただけでは効率的な鉄骨柱大組溶接システムを開発することはできない。

(2) 周辺設備の精度

仮組した鉄骨柱の溶接箇所は長大な柱の先端から末端まで、ロボットの動作範囲を大きく超える所にあるので、ロボットが柱のいずれかを移動する必要がある。さらに、溶接箇所は柱の上面、下面、ロボット側、また反対面にもある。したがって、溶接時には常に下向姿勢で溶接するため、溶接箇所が上面にくるように順次柱を回転する必要がある。

溶接ロボットはその位置決め精度が $\pm 0.2 \text{ mm}$ 程度の精密機械であるが、ロボットの動作範囲を補う移動台車や柱を回転させるポジションをこのロボットの精度に合わせて開発することはできない。これが可能であればロボットと柱の位置関係の規定は容易になるが、非常に高額な設備になるのでロボット化によるコスト削減は期待できなくなる。

(3) 統括制御

柱の形状は一品一様であり、1本の柱に仕口が1段の場合や3段の場合、また梁が4方(十字)あるいは2方(L字)の場合等柱形状を構成する要素の組み合わせは無数にある。そのため個々の柱ごとに移動台車、ポジションおよびロボットの運転順序が変わり、また移動台車の走行距離、ポジションの回転角度や定位置での繰返し回数に変化する。

オペレータが手動で台車、ポジションおよびロボットを操作する、あるいは柱ごとにシーケンスプログラムを作成するのであれば、ロボットによる柱の溶接は可能になるが、それでは手溶接以上の工数が掛かってしまいロボット化による省人効果は期待できなくなる。

3.2 開発課題

以上のような従来技術の問題点を考慮すると、下記の課題に主眼を置いたシステム開発が必要となる。

(1) 教示システム

ロボットの移動先を1点ごとに教示しなければならないという煩わしい作業や、各教示点に対応させながらロボットの移動経路プログラムを作成するような特殊技術を要する作業を排除した、効率的かつ実用的な「溶接ロボット教示方法」を開発する。

(2) センシングシステム

ロボット移動台車およびポジションの機械精度あるいは柱の仮組精度が原因になって、溶接線とロボットの位置関係にばらつきが生じて、ロボット自身が実際の溶接線をセンシングすることによって溶接始終点の正確な位置を把握し、誤差を修正することができる「溶接始終点センシングシステム」を開発する。

(3) 制御プログラムの自動作成

ロボット移動台車(走行、横行)、ポジションおよび溶接ロボットの運転順序と移動(回転)量は柱1本ごとに変わる。その変化に対応するため、個々の柱形状に適したシーケンスプログラムを前記教示データからそのつど自動作成し、即実行する「統括制御システム」を開発する。

4 ロボット溶接システムの内容

4.1 システムの特徴

本システムはパソコン、シーケンサ、溶接ロボット、H型鋼反転機およびノズルクリーナ等の低価格の市販品を主体に構成されている。その結果、開発要素を抑えたコストパフォーマンスの高いシステムとなっている。

また実用的見地から、コンピュータ画面上で模擬的に案内教示を行う一般的なオフラインティーチング方式を採らず、柱寸法等を単純に数値入力するだけでロボットおよび周辺機械に必要なすべてのデータが自動作成される方式とした点に最大の特徴がある。

4.2 設備仕様

(1) パソコン

パソコンは日本電気㈱製「PC 9801 VX」、プログラム言語は「ターボC」を使用している。

(2) 溶接ロボット

溶接ロボットは㈱小松製作所製5軸垂直多関節型「RWL-008」、溶接電源はサイリスタ制御で定格出力500 A/45 V、定格使用率100%のナショナル製「PANA-AUTO SUPER S 500」である。また、ワイヤ突出し長さ設定およびノズル付着スパッタ除去にマツモト機械㈱製「ロボメイト」を使用している。

(3) ロボット移動用台車

ロボット移動用台車は積載荷重1 000 kgf、走行距離15 m(速度7.8 m/min)、横行距離3.8 m(速度8.8 m/min)の能力を有する自社開発品である。

(4) ポジショナ

ポジショナは市販のH型鋼回転機を一部改良して使用した。すなわち、停止精度を向上させるためにインバータ制御にし、さらに位置測定のため原点検出用リミットスイッチとロータリーエンコーダを取り付けた。また能力は最大積載荷重6 000 kgf、最大回転速度0.4 rpmである。

4.3 制御方法

4.3.1 システム構成

制御システムの構成をFig. 2に示す。オペレータはオフラインパソコンへ柱形状データの入力を行い、また柱とポジショナの位置およびルートギャップをオフラインパソコンへ入力する。オンラインパソコンはロボットコントローラおよびシーケンサに接続されている。ロボットコントローラはロボット本体と溶接電源を制御し、シーケンサはポジショナと台車を制御する。運転を開始すると、オンラインパソコンはDIOケーブルを介してロボットコントローラと通信し、またRS 232C光ケーブルを介してシーケンサと通信する。ロボットおよびシーケンサはオンラインパソコンからデータを受信すると、それぞれの内部プログラムが起動して、ロボット本体と溶接電源あるいは台車とポジショナの動作を制御する。また、1本の溶接線を溶接完了するとノズルクリーニングおよびワイヤカットが行われる。

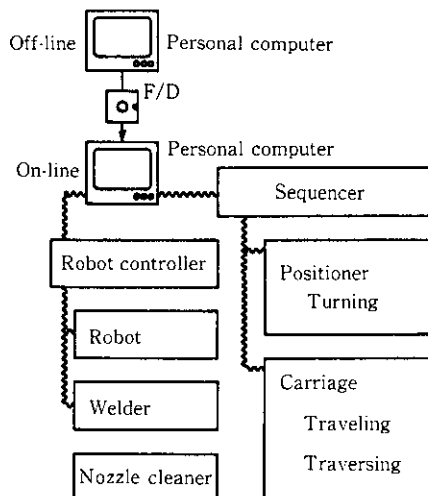


Fig. 2 Block diagram of equipment

4.3.2 シーケンサの制御

このような装置における手動運転を想定すると、オペレータはまずポジショナを位置決めし、さらに台車を操作してロボットを目的の位置まで移動した後ロボットを自動運転する。そして、ロボットの溶接が終わるのを確認して次の溶接線へ同様の手順でアプローチする。この作業を溶接線の数だけ繰り返すことで1本の柱の溶接が完了する。

この一連の手動操作におけるオペレータの重要な機能の一つは、ポジショナおよび台車の起動とモーター回転方向の決定、すなわち正転(前進)・逆転(後退)の押しボタン選択機能である。そのロジックは現在位置と移動目標位置の差の正負判定にあり、オペレータはポジショナや台車の現在位置を目視によって把握する一方、次の移動先、すなわち次に溶接すべき溶接線を決定していることになる。したがって、この自動化には、

(1) 現在位置の測定システム

(2) 次の移動目標位置を自動で設定するシステム

が必須である。

現在、位置把握機能はエンコーダを利用したシステムを導入することで容易に代替できるが、種々の柱形状で異なるポジショナおよび台車の運転順序のプログラムを、そのつどそれぞれに合わせて作成し、シーケンサに入力することは容易でない。したがって、当システムでは柱1本分のシーケンスプログラムを作ることはせずに、溶接線1本だけに対応するシーケンスプログラムとしている。すなわち、シーケンサのプログラムはポジショナ、台車走行および台車横行それぞれに対応する三つの独立したブロックで構成され、それぞれパソコンからの指令で選択・起動される。また、シーケンスプログラムの移動目標値はブロック選択時にパソコンからのデータ送信によって新たな目標値に書き換えられる。なお、溶接順序すなわち各溶接線の施工順序は柱形状入力データをもとにパソコン内部のプログラムによって決定されている。

4.3.3 溶接ロボットの制御

「シーケンサの制御」によってロボットが溶接線の近くへ移動すると、パソコンからの起動信号を受けてロボットが自動運転を始める。ロボットによる自動溶接を行うための手順はつぎのとおりである。第一に、目的とする溶接線の板厚およびルートギャップに適合する溶接条件を自動設定しなければならない。これに対し本システムでは、パソコンからの板厚およびルートギャップの送信データに基づいて、適切な溶接条件をデータベースから自動選定するプログラムを開発している。

第二にタッチ姿勢を自動で決めなければならない。すなわち梁の上フランジを溶接する時は柱末端に、下フランジを溶接する時は柱先端にタッチの向きを変える必要がある。本システムは各溶接線ごとにパソコンが適切なタッチ方向を判定し、ロボットコントローラに指示する方式にしている。

第三にタッチを溶接開始点に自動で移動しなければならない。そのためには溶接開始点がロボット座標系の3次元座標値としてロボットコントローラにメモリされる必要がある。また、良好な溶接継手を得るために、溶接ワイヤのねらいは目標値の±1 mm以内の精度にしなければならない。しかしポジショナ、台車および柱の組立精度から見て柱寸法入力によるオフライン教示方式のみでこれを実現するのは困難である。そのため、本システムは後述のタッチセンサシステムを使った高精度な自動センシング方法によって溶接終点(3次元座標値)を確定している。

4.3.4 統括制御

ロボット移動台車、ポジショナおよび溶接ロボットはパソコンで

統括制御される。この統括制御プログラムは柱形状および柱セット位置の入力値をもとにして適切な溶接順序を設定し、さらに台車、ポジショナおよびロボットの動作順序を作成すると同時に個々の溶接線に対応するそれらの移動目標値を算出する。また、ポジショナや柱とロボットの干渉チェック、さらにロボットのリーチ過不足等をチェックし、問題があると警告を表示する。

実際の運転モードの1サイクルはつぎのようである。オペレータが運転開始ボタンを押すとパソコンはまずポジショナの目標値(0°, 90°, 180°, 270°)をエンコーダのパルス量に変換してシーケンサに送る。ポジショナが回転し目標値に到達するとシーケンサはパソコンへ完了信号を送る。つぎに、パソコンは台車の走行目標位置をカウンタ値に換えてシーケンサに送り、走行目標位置に到達した信号を受けると、同様にして横行の位置決めを行う。

ポジショナと台車の位置決めが終わるとパソコンはロボットコントローラと通信を始める。第一にトーチの方向を、第二にルートギャップを、第三に板厚を、さらに第四にフランジ幅の中心位置をロボットに教示する。これらのデータは12本の通信線それぞれのONとOFFの組み合わせで構成される。ロボットはこれらのデータを受信してトーチ姿勢を決め、初めの移動点すなわちロボット座標系に変換されたフランジ幅の中心位置に移動すると、自身の内部プログラムにしたがって溶接始終点のセンシングを始める。溶接始終点の位置が求められると、つぎにパソコンから板厚とルートギャップ値を受信し、相当する溶接条件を自身のデータベースから取り出して溶接を開始する。

溶接が終わると横行原点に戻りノズル内部を清掃し、はさみでワイヤを自動切断する。パソコンはロボットから溶接完了およびワイヤカット終了信号を受けると、シーケンサに対して、次の溶接位置に向かって台車およびポジショナを運転するように指令する。

4.4 教示方法

4.4.1 オフラインデータ入力

ロボット導入に対する問題点の一つにティーチング方式の複雑さ、あるいはデータ入力の煩雑さが指摘されている^{6,7)}。ここではマン・マシンインタフェースとしてパソコンを介在させた極めて効率的な教示システムを開発した。本システムはオンラインあるいはオフラインでの煩わしいティーチング作業を必要とせず、柱主要寸法(継手位置)をパソコンへ単純に数値入力するだけでロボットおよび周辺機器に必要なすべてのデータが自動作成される方式である。オフラインパソコンのデータ入力フォーマットは Photo 1 に示す

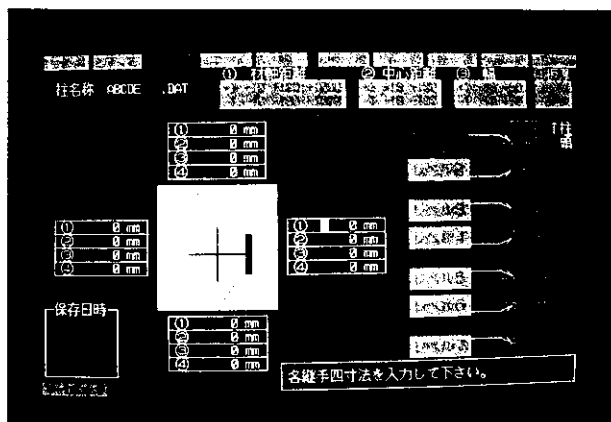


Photo 1 "Data input" screen

ように、各梁の上下フランジそれぞれについて柱先端からフランジまでの距離、柱中心からフランジまでの距離、フランジ幅およびフランジ厚の図面寸法を入力するだけになっている。

4.4.2 オンラインデータ入力

ロボットを目的の溶接箇所へ移動するには、台車の走行および横行距離を決める必要がある。またポジショナとの干渉を回避するためにはその位置を知る必要がある。柱やポジショナのセット位置は個々の柱形状によって変わるし、またこれらは天井クレーンで吊って位置決めするので予定値に対して大きな誤差が生じる。ゆえに、台車やポジショナを適切な位置へ移動するためにはオフライン入力のデータだけでは不足である。そのためオペレータはポジショナと柱をセットした後、これらの位置を台車走行原点およびポジショナ回転中心から実測して、各々の制御システム(シーケンサ)へ教示する必要がある。また、ルートギャップ値は前工程の部材加工や組立精度によって形成されるので、適正な溶接条件を選定するためにその組上がり具合を実測し、その値を溶接ロボットへ教示する必要がある。

これらのデータはオンラインで入力される。オペレータが個々の装置を意識することなくパソコンのグラフィック画面上へ測定値を入力するだけで、各々の制御システムはパソコンを介して自動的に教示される。

4.5 ワイヤタッチセンサ

ワイヤタッチセンサは Fig. 3 に示すようにロボットコントローラ、溶接電源およびセンサユニットからなる。定常状態における接点 MR1 は、溶接電源側に接続されているが、センシングの時にだけセンサユニット側へ接続するようにロボットコントローラからの出力信号で切り換わる。ロボットがセンシングを始めるとトーチが移動してワイヤがワークにタッチする。するとセンサユニットのリレー R1 が励磁してロボットコントローラの入力信号を ON にする。ロボットコントローラはこの入力信号を監視しており、その状態(ON, OFF)によってワイヤがワークにタッチしているか否かを知ることができる。なお、溶接線の位置や方向によってトーチ姿勢やセンシング方向が異なるが、個々の溶接線に対して、パソコンの入力データをもとに、適切なトーチ姿勢とセンシング方向を得られるプログラムを開発することで本システムの実用化を可能にしている。

Fig. 4 に突合わせ溶接線のセンシング例を示す。NC データをもとに溶接線の近傍にアプローチしたトーチはフランジのエッジ(a点)すなわち溶接開始点のX座標値を検知し、次に開先内の壁(b点)すなわちY座標値を検知し、さらに開先の底(c点)すなわちZ座標値を検知することによって溶接開始点の位置(X, Y, Z)を確定することができる。溶接終止点も同様にして求められる。

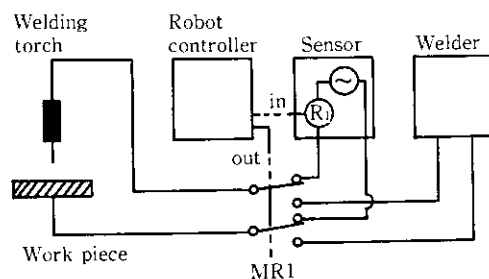


Fig. 3 Principle of sensor

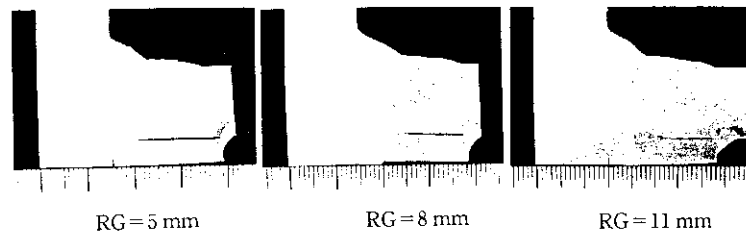


Photo 2 Examples of macroetch specimen of robot-welding

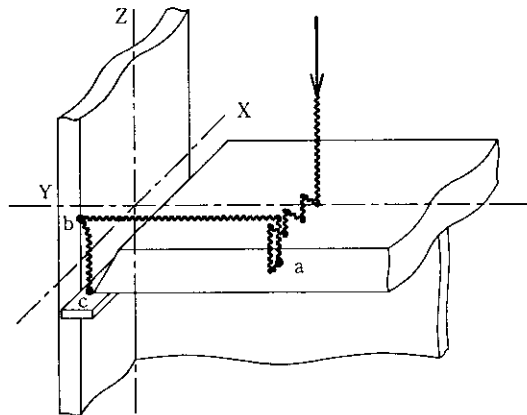


Fig. 4 Searching path of welding start point

4.6 溶接制御

4.6.1 板厚への対応

小松製作所製のロボット言語「PLAW」を使いロボットの動作プログラムおよび溶接条件データベースを開発した。はじめに、1つのルートギャップ（例えば5 mm）に関し、最大板厚（ここでは32 mm）の溶接条件を構築する。つぎに、それより薄い板厚、例えば19 mm なら、1パスから12パスまで19 mmの板厚に近いところまで32 mmの条件で積層して、そこで32 mmの条件から分岐し19 mm用キャップパスの条件で仕上げるようにした。12 mm や25 mmの場合も同様に32 mmの条件をベースにして溶接を行い、それぞれのキャップパス前で分岐し、各板厚に合ったキャップパスで仕上げるようなデータ構造にした。それによって、現在、板厚12, 16, 19, 25, 32 mm用のデータベースを有しているが、対象とする板厚が22 mm等の場合でもその板厚相当部分で分岐し、その近傍のパスだけ新たな溶接条件を設定することで容易に対応することができる。

4.6.2 ルートギャップばらつきへの対応

柱の仕上がり寸法精度を確保するためには、切り板寸法のばらつきをルートギャップの広さで補正するのが一般的である。そのため柱仮組後のルートギャップは大きくばらついている。このばらつきへ広く対応するため、本システムの溶接条件データベースはルートギャップ (RG) 5, 8 および 11 mm 用の3種類を有している。同一条件で±1 mmのRGに、例えばRG 5 mmの条件であればRG 4, 5, 6 mmに対応できるので、現在の3種類でRG 4 mmからRG 12 mmまで対応可能である。Photo 2 に板厚16 mmのマクロ断面を示す。

4.6.3 ワイヤ突出し長の設定

ロボットは溶接を終了すると原点へ退避し、ポジションおよび台

車はつぎの溶接線へと移動する。そしてまたロボットはつぎの溶接始終点のセンシングを始める。しかし、このときワイヤ先端は溶接を終えたままの状態であり、一定の突出し長にはなっていないので、正しい位置をセンシングすることができない。また溶接時の突出し長さが違うため、プリセットされている正しい溶接条件で溶接することもできなくなる⁸⁾。

したがって、各溶接線をセンシングする前には必ずワイヤ突出し長を一定に調節しなければならない。溶接を終了するとロボットは退避姿勢を取り、カッターの近くに設けた原点検出用ゲージをセンシングし、ワイヤカットのティーチングポイントを修正する。その後ロボットコントローラから溶接電源へインテグレーション指令を出してワイヤを数センチ送給してから、修正済みのワイヤカットポイントへ移動する。ワイヤがはさみの中に入るとそれをセンサが検知して自動切断することによって、目的のワイヤ突出し長に設定される。

5 稼働実績

本システムの適用例および効果について以下に示す。柱形状および主要寸法がつぎのようなものを使用した。なお、稼働状況をPhoto 3に示す。

5.1 柱形状

- (1) 型式 SRC 梁貫通方式十字型柱
- (2) 仕口 四方3段仕口
- (3) 柱全長 9 300 mm
- (4) フランジ幅 180 mm
- (5) フランジ板厚 19 mm, 22 mm

5.2 アークタイム率

柱・梁の突合わせ溶接線11本を指定して、連続で施工した。Table 1に示すように、システムの所要時間は289分である。その内訳はオペレータの作業すなわち柱交換等溶接準備が75分および教示時間が48分で、自動運転時間が166分であった。また、溶接時間いわゆるアークタイムは91分で、システムのアークタイム率は31%、自動運転中のアークタイム率は55%であった。

5.3 効果

アークタイム率は31%であり、一般に言われている溶接工のアークタイム率^{9),10)}にほぼ等しい。したがって、本システムの生産能力は溶接工1人とほぼ同等である。今回は自動運転中もオペレータは常時監視していたが、今後、自動運転中は無監視にし、オペレータは他の作業に従事することで、柱1本当たりの所要工数が166分・人削減されることになる。すなわち123分の作業で溶接工1人が289分働いたと同等の成果が得られることになる。したがって、柱・梁

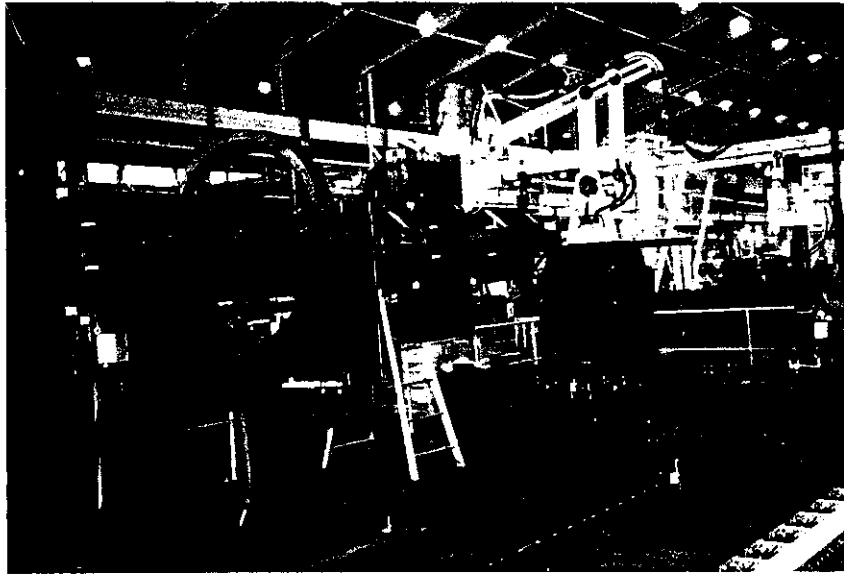


Photo 3 View of experimental application

Table 1 Cycle time of the welding robot system

Item	Time	
	(min)	(%)
Preparations	75	26
Data input	48	17
Turning and traveling	30	10
Sensing	45	16
Welding	91	31
Total	289	100

の突合わせ溶接に限定した場合その労働生産性は約 2.3 (289/123) 倍に向上するといえる。

6 結 言

(1) 市販の溶接ロボット、パソコン、ロボット移動用台車および

ポジショナで構成される「鉄骨柱大組溶接ロボットシステム」を開発した。

- (2) パソコンはロボットおよびシーケンサと接続し、シーケンサはロボット移動用台車とポジショナを制御する。その制御量のみを逐次、パソコンがシーケンサに指示するシステムとすることでパソコンの負担を軽減した。
- (3) 柱主要寸法および柱セット位置を単純にパソコンへ数値入力するだけで、ロボット等に必要なすべてのデータが自動作成される教示・制御システムを開発した。
- (4) 溶接ロボットが、実際の柱をワイヤタッチセンサでセンシングして、溶接始点の教示データを正しい値に補正するプログラムを開発した。
- (5) 各種の板厚あるいはルートギャップのばらつきに対応するため、それぞれに適した溶接条件データベースをロボットコントローラ内に構築した。
- (6) 標準的な柱に適用したところ、教示時間 48 分、自動運転時間 166 分およびアークタイム 91 分の結果を得た。これは、溶接工 1 人の能率にほぼ等しい。

参 考 文 献

- 1) 福原 昇, 志賀 厚, 安田博和, 鈴木 実, 大北芳幸, 則長保甫: 「鉄骨仕口部用無人溶接システムの開発」, 溶接学会・第 115 回溶接法研究委員会資料, 1987 年 11 月
- 2) 榊原茂典, 小川俊昭: 「IHI・オフラインティーチングシステム」, ロボット, No. 56 (1987), 91-97
- 3) 三木修武, 長尾陽一, 山内敏弘, 真子琢仁, 弘津幹雄, 高嶋邦雄, 佐々木 茂, 村上成憲: 「パソコンを用いたロボットオフライン教示システムの開発」, 川崎重工技報, 101 (1988), 9-14
- 4) 小島建夫, 福田英明: 「ロボットオフライン教示システム」, 神戸製鋼技報, 37 (1987) 4, 97-98
- 5) 田中一男, 千葉正幸: 「ロボットによるボックス柱厚板ダイヤフラムの溶接施工」, 宮地技報, No. 4 (1988), 66-77
- 6) 松本正巳: 「溶接技術この 10 年の歩みと今後の展望/建築鉄骨」, 溶接技術, 37 (1989), 96-100
- 7) 鉄骨建設業協会: 「鉄骨加工業の中・長期展望」, (1989), 49
- 8) 溶接学会: 「溶接便覧/改訂 3 版 (1977)」, 337-338
- 9) 藤代能教: 「鉄骨構造における省力化について」, 溶接学会・昭和 62 年度溶接技術講座「鉄骨構造の溶接」, 15-29
- 10) 穂積重臣, 畠中 朗, 藤平正一郎, 北山恭尚: 「鉄骨構造における溶接ロボット化について」, 溶接学会・昭和 62 年度溶接技術講座「鉄骨構造の溶接」, 31-48