

溶接用オフラインティーチングシステムの開発

Development of Auto Programming System for Welding Robot

技術本部 藤田 憲^{*1} 坂上 弘美^{*2}
 坪川 浩明^{*3}
 神戸造船所 渡邊 望^{*4}
 横浜製作所 土田 榮二^{*5}

溶接ロボットは、無人化の有力な手段である。しかし、事前に動作を教示（ティーチング）しておく必要があり、多品種少量生産では溶接時間に対する教示時間の割合が高くなるため、ロボット化のメリットが出にくい。これを解決するため、CADデータから人手を煩わせずに自動的にロボットの動作データを作成するシステムを開発した。本システムを橋梁の鈹桁（ばんげた）の溶接に適用した結果、教示時間が大幅に削減された。また、橋梁の箱桁（げた）内面溶接では、狭い箇所での自動干渉回避の機能を開発し、高いロボット適用率向上の見通しを得た。

Robot automation is essential to efficient welding production. In small-volume production with varied size and shape, robots provide only minimal advantages because the rate of previous programming time to welding time increases. We developed welding robot autoprogramming system to generate robot teaching data automatically from CAD data. This system was applied to bridge panels and highly advanced automation.

1. ま え が き

今日の製造業においては、生産性向上のためにはロボットの導入等による自動化は欠かせない。溶接の分野も例外ではなく、様々な製品分野で溶接ロボットの導入が図られている。

溶接ロボットはティーチングプレイバック式のものが多く、溶接トーチの先端位置や移動順序などの動作は事前に教示（ティーチング）しておく必要がある。

人が実際のロボットを動かして教示する場合には、溶接線の短い部材や形状が複雑な部材ではティーチング作業が溶接時間に対して多くなり、ロボットの効果が低くなる。

そこで、生産性向上及び溶接ロボットの適用拡大をねらって、CADデータから人手を煩わせずに自動的にロボットの動作データを作成するオフラインティーチングシステムを開発することとした。さらに当社の製品の種類が多いことより、様々な製品に適用できるように汎用性の高いシステムを作成することとした。

2. システムの構成と仕様

実際のロボットを使用して動作を教示するオンラインティーチングと異なり、オフラインティーチングではコンピュータ上に構築された仮想空間での教示となるため、ロボットの動作をシミュレーションして部材と干渉しないか確認などの作業が必要となる。この確認作業には三次元ロボットシミュレータが必要不可欠であるが、最近では性能の良いものが市販されているので、これを使用することとした。三次元ロボットシミュレータは、動作シミュレーションだけでなく、ロボット教示データの出力にそのまま利用できる。また、ユーザが自由にロボットモデルを定義することができる。さらにカスタマイズ機能を利用することで、ノウハウを盛込んだより高度な独自システムとすることができる。

図1にシステム構成を示す⁽¹⁾。

設計で作成した部材の三次元CADデータを基に、最終的にはロボットの教示データを出力する構成になっている。市販の三次元

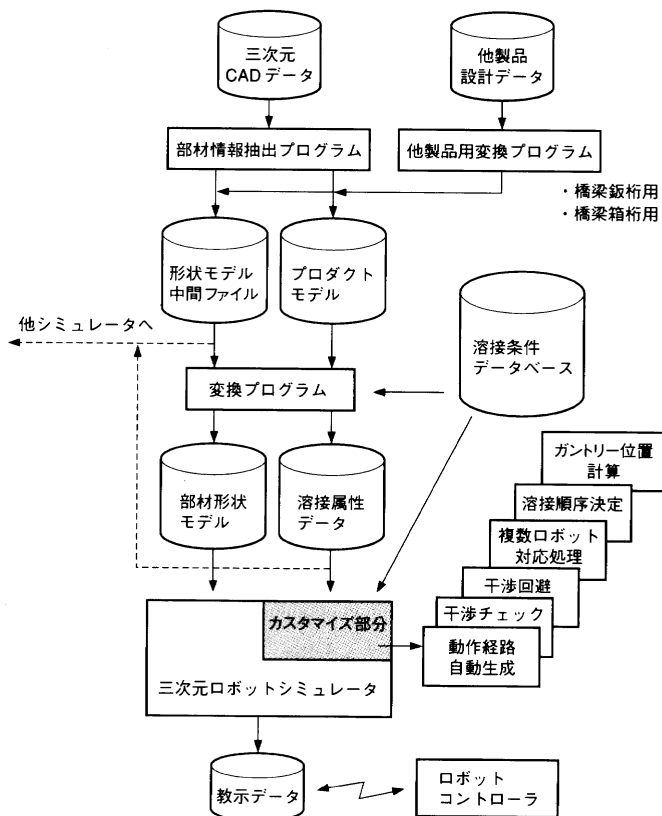


図1 システム構成
System configuration

ロボットシミュレータは日進月歩で進歩するため、できるだけシミュレータソフトに依存しないように考慮した。また特定の製品だけを対象としたシステムでは汎用性が低いので、できるだけ多くの製品に対応できるように考慮した。そのため、部材形状と溶接線の情報を中間ファイルとして介する構成とした。

*1 高砂研究所製造技術開発センター主席

*2 エレクトロニクス技術部システム技術開発センター

*3 横浜研究所鉄構研究室

*4 業務部主席

*5 鉄構工作部長

三次元 CAD のデータが存在する一般的な部材の場合、まず部材情報抽出プログラムによって、三次元 CAD データを読み込み、部材の形状データと溶接に必要な情報をプロダクトモデルとして抽出する。その後変換プログラムにより、各溶接線についてロボットの動作経路を生成する上で必要な情報を付加し、溶接属性データとして出力する。

三次元 CAD のデータを持たない製品では、設計データ（二次元 CAD 等から自動出力されたデータ等）から、製品個別の変換プログラムによって、部材の形状モデル中間ファイルとプロダクトモデルを出力することで対応する。設計データのフォーマットが様々なため、製品ごとに変換プログラムを用意することになる。

三次元ロボットシミュレータのカスタマイズ部分では、前述の形状モデルと溶接属性データに基づき、ロボットの動作経路を生成するが、このときアプローチやタッチセンシング、始終端での角巻き溶接といった動作データが必要になる。これらは、溶接条件データベースに格納されている。

溶接条件データベースには、動作データだけでなく製品に応じた溶接条件（電流、電圧、速度）など、教示データを作成する上で必要な様々な情報が格納されている。

以上のことから、本システムを個々の製品に適用する際は、三次元ロボットシミュレータで使用するロボット設備のモデル、溶接条件データベース、三次元 CAD データがない場合は専用の変換プログラムといった製品に依存する部分のみを用意すればよいことになる。

3. システムの機能

オフラインティーチングはオンラインティーチングに比べ効率が良いとはいえ、各教示点を一つ一つ定義しては時間が掛かる。本システムでは、教示作業の時間を削減するため、ロボット動作経路の新規作成はできるだけ自動化し、動作経路の修正など人の判断が介入する作業は手動で行うことを方針とした。

本システムの主な機能としては、以下のものがある。

- (1) 部材形状モデルと溶接線の生成
- (2) 干渉回避を含むロボット動作経路の自動生成
- (3) 溶接条件の自動選定
- (4) 複数ロボットのテリトリ分け
- (5) 溶接順序の自動決定
- (6) ガントリー位置の自動決定
- (7) ロボットの動作シミュレーション
- (8) 干渉チェック

これらについて、以下に詳細を述べる。

3.1 部材形状モデルと溶接線の生成

設計データの読み込みにおいては、一般の部材では市販の三次元 CAD のデータを読み込むが、最初に適用した橋梁では MIPSON と MASTERSON^{※1}から出力される専用フォーマットのデータを利用しているため、専用の変換プログラムで読み込むこととした。

本データでは、板材と板材上にあるスチフナの形状データと脚長等の部材データをパラメータとして記述するようになっている。橋梁においては、部材形状は外形と板厚の 2.5 次元で表され、複雑な三次元 CAD データは必要としない。

これらの設計データを基に橋梁としての板材とスチフナなどの各々の三次元形状モデルを生成する。形状モデルの中間ファイルは IGES^{※2}フォーマットで作成しているため、三次元データが記述しやすくなっている。また、橋梁以外の製品の場合でも、この中

間ファイルを作成することで、共通のフォーマットで形状モデルが表現できる。この中間ファイルは、シミュレータ用のフォーマットに変換され、取込まれる。

形状モデルの生成と同時に部材同士の接合部分を検出し、溶接線の情報を生成する。各溶接線について、溶接線の始終点以外に、すみ肉／開先、立向／下向等の溶接種類、脚長、スカラップ等の部材端部形状、部材種類、板厚、隣接部材の有無等のデータを抽出し、以降のロボット動作経路の自動生成に必要な情報を得ようになっている。

注 1：MIPSON と MASTERSON は共に橋梁における自動原寸システムで、MIPSON は鋸桁、MASTERSON は箱桁で使用される。

注 2：Initial Graphics Exchange Specification の略。米国規格協会 (ANSI) が制定した CAD データ交換の中間ファイルフォーマットで、実質的な世界標準となっている。

3.2 ロボット動作経路の自動生成

溶接品質を保つため、製品ごと、形状ごと及び工場ごとに溶接のやり方、すなわちロボットの動作方法が異なる。

この動作パターン決定のルールは、周囲の部材形状や要求される溶接強度などにより多種多様あり、部材の三次元形状を幾何学的に判断するなど複雑な処理を伴う。例えば以下のようなルールがある。

- (1) 突合せ部材がなければ角巻き溶接をする。
- (2) 隣接部材との距離が狭い場合は角巻溶接をしない。
- (3) 狭い場合でも、部材端部の形状がスカラップであれば角巻き溶接をする。
- (4) アングル部材はアプローチ角度を変える。
- (5) 溶接部材ごとにタッチセンシングを行う。
- (6) 隣接部材がある場合は、これについてもタッチセンシングを行う。
- (7) 突合せ部材だけでなく、スカラップがあればその部分もタッチセンシングを行う。

これらのルールは前述したように製品によって変えることがあり、その都度プログラミングしてははるく用性がないので、外部テーブルで記述する方法を考察した⁽³⁾。テーブルにパターン決定のロジックを記述することで、パターンが追加になった場合や、ロジックが変更になった場合でもプログラムの修正が不要となり、ユーザのみで対応することが可能となった。

電流、電圧、速度といった溶接条件はロボットの動作経路の属性と見なすことができるが、動作パターンの決定ロジックと同様に、溶接条件についても条件に応じたパターンを外部ファイルに登録しておくことで、最適な溶接条件を自動選定する仕組みとなっている。なおパターン登録の際は、脚長や溶接手法等様々なケースごとに分けて記述できるようになっている。

また、タッチセンシングの動作においては、例えば、すみ肉溶接を行う部材の始端認識では、一般的に部材腹面、部材端部、底面の 3 点をタッチする必要がある。これらの具体的な動作方法や順序はロボットメーカーが各々独自に決めているため、その制御はロボット側で行われており、一般的な市販ロボットの教示データには組込まれていないのが現状である。

そのため、タッチセンシングのティーチングや動作シミュレーションを行うことができない問題があった。

本システムでは、各メーカー各様のタッチセンシングについて、教示データの作成あるいは動作シミュレーションをはん用的に自動的に行うことができる方法を検討した。その結果、部材形状やロボットメーカーごとに異なった複数種類のセンシング動作パター

ンを、動作データとしてデータベースに登録することで対応することとした⁽²⁾。

例えば、通常は部材腹面、部材端部、底面の3点をタッチする動作経路とし、隣接部材がある場合はさらに隣接部材もタッチする動作経路とするよう、パターンを分けて登録する。動作データにはワイヤ先端の座標値やトーチ姿勢、センシング速度等を定義することでロボットの動作が表現できる。

このように、隣接部材との関係や部材形状ごとに動作パターンを分けて外部ファイルに登録しておくことで、プログラムを修正することなくロボットの動きを変えることができ、メーカーによる違いを吸収することもできるようになった。またこれを使って、教示データを作成するだけでなく、画面上で動作をシミュレーションし、狭い空間でのタッチセンシング時の干渉チェックを行うことも可能になる。

3.3 溶接タスクの割当

前述の機能により、部材形状やロボット動作経路といったワークに依存する情報が生成されるが、実際に溶接を行うためにはどのロボットを使用してどのような順序で行うかというタスクに関する情報も必要である。次にそれらの情報の生成機能について述べる。

3.3.1 複数ロボットのテリトリ分け

今回適用したロボット設備は、複数のロボットを有している。効率良く溶接を行うためには、できるだけ多くのロボットで同時溶接をするよう考慮する必要がある。

ロボットの台数や、各ロボットについて溶接トーチの到達可能範囲を登録しておき、それらを参照して同時溶接できるかどうかを決定するようにした。このようにして、各溶接線について使用するロボットを自動決定することで、教示作業の軽減を図るようにしている。

なお、ロボットのテリトリ分けのルールは、有するロボットの台数や周辺機器など設備に依存した処理になってくるため、現状では専用処理として個別に開発することで対処した。

3.3.2 溶接順序の自動決定

ロボットのテリトリ分けと同時に、溶接順序や溶接方向を自動決定することを可能とした。ワークの溶接後のひずみが最少になるよう、かつ巡回セールスマン問題の解法^{(4)~(7)}により空走距離を最短にして効率的な溶接ができるよう、溶接順序を決定している。

溶接順序を自動決定した例を図2に示す。対向する2台のロボットとワークを回転させるポジションを有した設備において、ロボットの自動テリトリ分けとポジショニングをしながら、できるだけ下向き溶接となるよう溶接線をポジションごとに自動選定し、溶接順序を自動決定している。

3.3.3 ガントリー位置の自動決定

できるだけ教示作業を削減するため、前述のテリトリ分けの結果を受けて、ガントリーなどの外部軸の座標も自動計算するようにした。

ガントリーの可動範囲、ロボットの取付位置、溶接トーチの到達可能範囲等が外部ファイルに格納されており、これらと溶接線の座標から自動的に計算を行うようになっている。また、外部軸としてポジションを含む場合は、前述したように溶接姿勢が下向姿勢になるよう、各溶接線についてポジション回転角を自動計算し、必要な溶接線をポジションごとに自動選定するようになっている。

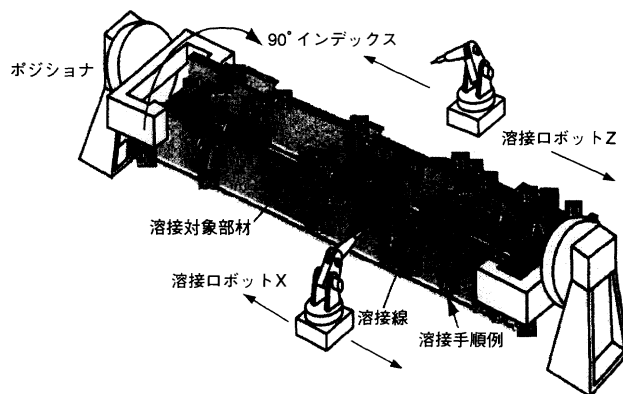


図2 溶接順序の自動決定例 建機部品への適用例を示す。図中の数字は溶接順序を示す。

Automatic decision of order in welding

3.4 ロボット動作シミュレーション

ロボット動作のシミュレーションは、三次元ロボットシミュレータの機能を利用して行う。シミュレーションの過程で干渉チェックを行うこともでき、干渉部分を赤く表示するようになっている。部材とロボットはソリッドモデルのため、正確な干渉チェックが可能である。また、トーチ先端だけでなく、ロボット本体のアームとの干渉チェックも可能である。

干渉が発生した場合や不都合があれば、三次元ロボットシミュレータを使用して溶接線や動作経路をCRT画面上で修正することも可能である。

シミュレーションの様子を図3に示す。

3.5 自動干渉回避

橋梁の箱桁内面溶接などでは狭い部分が多いため、動作経路を生成する際に自動的に干渉を回避する機能を開発した。干渉回避の動作例としては、以下のようなものがある。

- (1) 空走中にトーチ先端が干渉する場合は、干渉部材の端部から一定距離だけ離れた位置に回避点を追加する。
- (2) 溶接中にトーチが干渉する場合は、溶接できる範囲でトーチの角度を変更して回避する。
- (3) 溶接線の端部で干渉する場合は、干渉しない位置まで溶接線を短縮する。

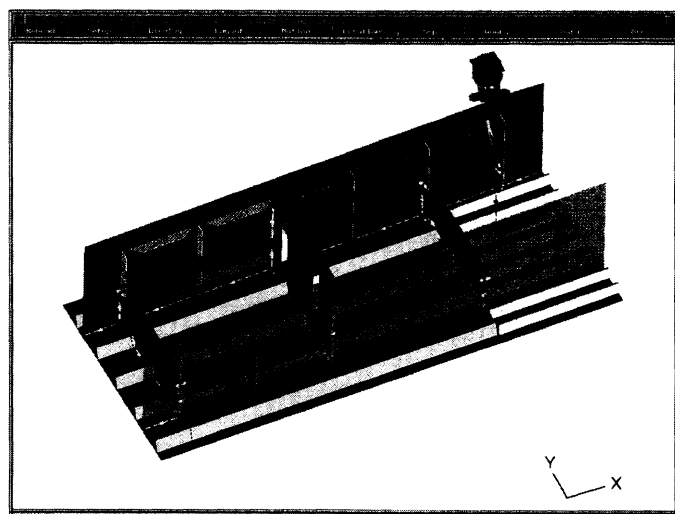
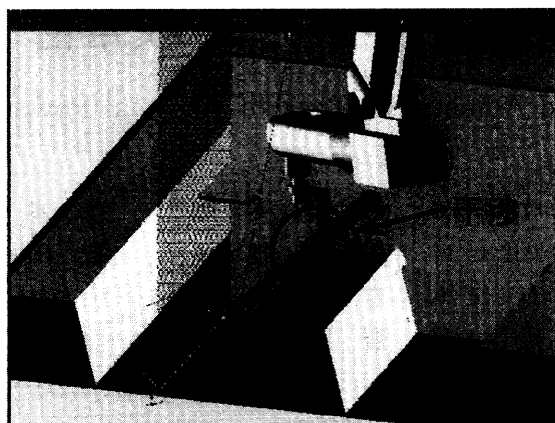
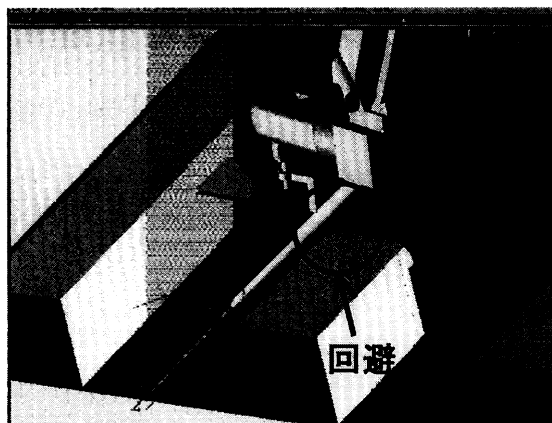


図3 ロボット動作シミュレーション 箱桁におけるシミュレーションの例を示す。

View of robot simulation



(a) 干渉の発生例



(b) 干渉回避例

図4 自動干渉回避 干渉の発生例とそれを回避した例を示す。
Collision check and avoidance

本機能を橋梁の箱桁内面溶接のシミュレーションに適用した結果、前記の干渉回避動作により、部材やトーチの形状によるものなど物理的に不可能な場合を除いて、ほとんどの干渉を自動的に回避することが可能となることが判明し、ロボット適用率を向上させるめどが得られた。

橋梁の箱桁内面溶接において干渉が発生した例と、その箇所においてトーチの角度を変更して回避した例を図4に示す。

4. 溶接検証結果

橋梁の鉸桁の部材を使用して溶接を行い、画面上でのシミュレーションどおりに実際に動作することを検証した。狭あい部でのタッチセンシング動作、スカラップ部の巻き溶接、つなぎ溶接など複雑な動作にも対応できていることを実証した。

鉸桁における溶接実施状況を図5に示す。

5. む す び

設計の三次元CADデータを読み込み、部材の三次元ソリッド形状と溶接線の自動生成、溶接条件の自動選定、干渉回避を含むロボット動作経路の自動生成と動作シミュレーション、干渉チェックを行い、ロボットの教示データを作成するシステムを開発した。

本システムを橋梁の鉸桁の溶接に適用した結果、教示時間が大幅に削減され、高いロボット適用率を得た。また、橋梁の箱桁内面溶接では、狭あいな箇所での自動干渉回避の機能により、ロボ

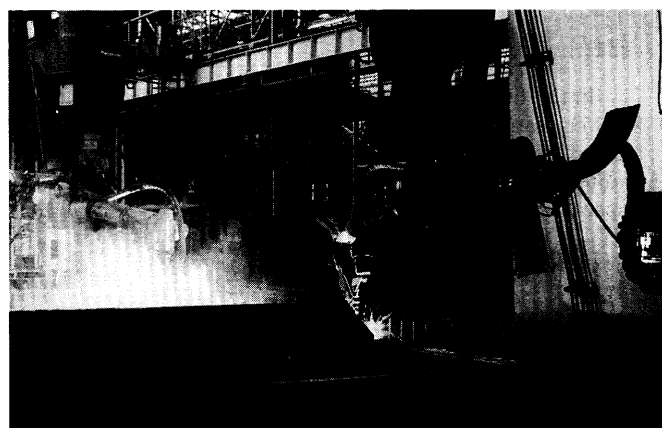


図5 鉸桁の溶接実施状況 橋梁鉸桁部材に適用した2台同時溶接の状況を示す。
View of actual welding for bridge panel

ット適用率向上の見通しを得た。

本システムは、溶接条件データベースを製品ごとに作成することで、様々な製品に適用することが可能である。また、三次元CADのデータを持たない製品については、設計のパラメータデータ等の読み込み部分を製品ごとに作成することで、対応が可能である。

今後は橋梁以外の製品にも適用拡大することで、製造技術の高度化、発展に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 藤田 憲, シンポジウム「生産・加工システムと最適化」, 溶接学会 (1998)
- (2) 藤田 憲ほか, センシングパターンのオフライン自動ティーチング方法及びセンシング動作シミュレーション方法, 特願平09-013524号
- (3) 坂上弘美ほか, ロボット動作パターン決定装置及び方法, 特願平10-27431号
- (4) 久保幹雄, 巡回セールスマン問題への招待 (I), (II), (III), オペレーションズリサーチ, Vol.39 (1994) p.25~31, p.91~96, p.156~162
- (5) Johnson, D.S., Local Optimization and the traveling Salesman Problem, In Proc, 17-th Colloquium on Automata, Languages, Programmig, Springer-Verlag (1990) p.446-461
- (6) 森 雅夫ほか, オペレーションズリサーチ I 数理計画モデル, 朝倉書店 (1991)
- (7) 山本芳嗣ほか, 巡回セールス問題への招待, 朝倉書店 (1997)