

論文・解説

29

# ロボットのリプロデュース精度向上

## Reproduce Accuracy Improvement of Robot

野 島 歆 之<sup>\*1</sup>  
Yoshiyuki Nojima

### 要 約

近年、産業用ロボットを導入している様々な業界において、量産準備期間の短縮などを目的に、コンピュータ上でロボットの動作設計と検証を行うオフラインプログラミングシステムの導入が進められている。しかし、コンピュータ上で設計したロボット動作を製造現場で精度良くリプロデュース（再現）する手法は確立されておらず、システムを使用するユーザ共通の課題となっている。この課題に対し、デミオの量産準備においてリプロデュース精度向上の取り組みを実施し、現地立ち上げ期間の短縮に成功した。本稿ではその活動の概要を紹介する。

### Summary

In recent years, for the purpose of shortening of mass-production preparation period, various industries using industrial robot have been introducing off-line programming system that does the design and the verification of the robot operation on the computer. But users of these systems have common issue that the technique to reproduce robot operation designed on the computer by the manufacturing premise in high accuracy has not been established. To this problem, we worked on the reproduce accuracy improvement in mass-production preparation of Demio and succeeded in shortening at the launch period of manufacturing premise. It introduces the outline of the activity in this text.

### 1. はじめに

マツダでは、量産準備プロセスにおける手戻りの撲滅を目的として、製造現場（以下、現場）で行っていたロボット動作の設計をオフライン（コンピュータ上）にて完了させ、現場へそのままリプロデュース（再現）する活動を行っている。これまでの活動で、作業部位への到達性評価や設備との干渉評価、ロボットティーチングのオフライン化を実施してきた（Fig.1）。

しかし、オフラインにおけるロボットのティーチング（オフラインプログラミング、以下OLP）を実施しても、現地立ち上げにおいてプログラムを無修正で再生できることはほとんどなく、その修正に多大な工数を費やしていた。場合によっては、ロボット追加や工程追加等の大きな手戻りを発生させ、オフラインでの検証が無駄になることもあ

り、手戻り撲滅に対して十分な効果を発揮していなかった。これに対して、1年前のMPVの量産準備にて、ロボット

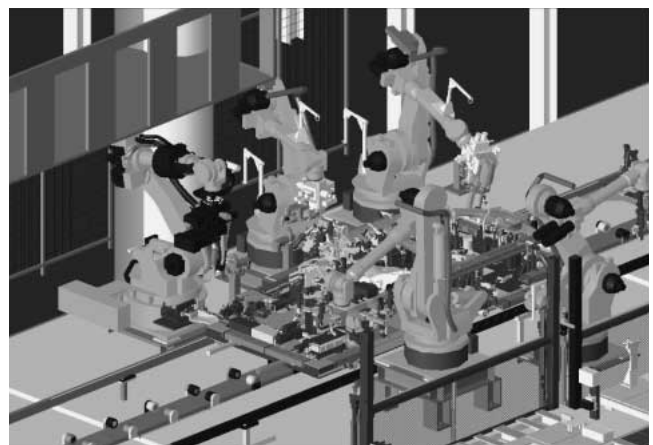


Fig.1 Robot Operation Design in Off-Line

\*1 車体技術部  
Body Production Engineering Dept.

据え付け位置補正及びサイクルタイム算出を一部工程で実施し、現場でのリプロデュースにおける精度向上に効果があることを確認した。

デミオの量産準備では、更なるリプロデュース精度の向上を図る手法を確立することと、その手法を全工程へ展開することで現場での作業（修正）工数を削減することを目指して活動を行った。その結果、現場での手戻りが大幅に減少し、現地立ち上げ期間の短縮に成功した。

本稿では、車体組立領域の代表的な加工であるスポット溶接について、それらの活動概要を紹介する。

## 2. OLPと現場リプロデュースの現状

### 2.1 現場リプロデュースに必要な要件

現場リプロデュースで手戻りを発生させないためには、到達位置・干渉のない動作経路・サイクルタイムの評価において、現場とズレのない高精度なOLP作業を実施することが重要である。そのためには、上述した評価作業ごとに必要となる作業要件がある。以下に、その作業要件を示す。

#### (1) 到達位置

スポット溶接の加工時に溶接ガンの電極先端が到達する位置のことである（Fig.2）。製品図面上に指示された溶接打点位置に正確に到達する必要がある。OLP実施時には、製品図面の溶接打点位置座標をそのまま使用することにより正確な到達が実現できているため、現場リプロデュース時にOLP実施時の到達位置を正確に再現することが求められる。

#### (2) 干渉のない動作経路

OLP実施時には部品や設備との干渉を避けるように動作経路を作成し、一連の動作について干渉チェックを実施する。この時、OLPを実施するためのモデル（以下、OLPモデル）で部品や設備の形状に欠落があると、OLP実施時に干渉がなくても現場リプロデュースで干渉が発生することがある。このため、OLPモデルにも現場と同じ部品や設備の形状を欠落なく再現する必要がある。

また、ロボットや設備の相互動作において干渉領域が存

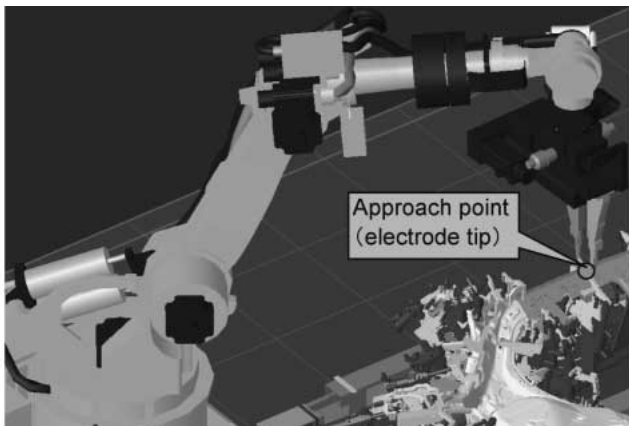


Fig.2 Approach Point

在する場合は、インターロック信号を設けることにより干渉領域への侵入順序を決め干渉を回避している。このため、OLP実施時にインターロックの設計と検証作業を完了させ、現場リプロデュース時の信号入出力ステップフローをそのまま再現させることが必要となる。

#### (3) サイクルタイム

量産準備では、一連の工程動作で目標とされるサイクルタイムを達成しなければならない。未達の場合は、実機でのプログラム変更や軽負荷のロボットへの溶接打点移管を実施することになる。場合によっては、ロボット追加や工程追加等の大きな手戻りを発生させてしまう。逆に過達の場合は、不要な工程やロボットがあることを示し、過剰な投資をしていることになる。

そのため、OLP実施時にサイクルタイムを精度良く算出し、算出された時間が目標のサイクルタイムに一致するか、わずかに下回る必要がある。

### 2.2 OLPと現場リプロデュースの現状

前節で述べた要件に対し、MPVの量産準備では、以下の状況であった。

#### (1) 到達位置

一部工程でOLPツールのレイアウト補正機能を使用し、OLPモデルにおけるロボット据え付け位置精度向上の取り組みを実施した。この機能は、以下によりOLPモデル上のロボット据え付け位置を現場に合わせて修正するものである。以下にレイアウト補正の作業手順を示す。

- ① 3点以上のステップを持つティーチングデータを作成し、現場での到達位置を測定
- ② ①のティーチングデータをOLPモデルに再現
- ③ OLPモデルで①と②の到達位置を比較し、据え付け位置のズレ量を算出
- ④ ③で算出されたズレ量を元にOLPモデルのロボット据え付け位置を修正

上記の据え付け位置修正を行うことにより、以前は現場リプロデュース時の到達位置のズレにそのまま含まれていたロボット据え付け位置の誤差を補正することができるようになった。この据え付け位置補正を活用することにより溶接ガン電極先端位置のズレ量を $\pm 3\text{mm}$ に抑えることができたロボットもあり、現場における手戻りの防止やティーチング修正工数の短縮に貢献できることを確認した。

しかしMPVの量産準備では、据え付け位置補正を全工程のロボットへ展開するまで至ってなかった。このため、据え付け位置補正適用外のロボットでは現場リプロデュースにおける到達位置のズレ量が大きく、多大なティーチング修正工数が発生していた。

#### (2) 干渉のない動作経路

前節で述べたように、現場と同じ部品や設備の形状を欠落なくOLPモデルに再現し、インターロックの設計と検証を完了させることが重要である。

部品形状については製品CADデータから変換したものを使用しており、欠落は発生していない。設備形状も設備設計で作成したCADデータをそのまま変換していたが、変換後のデータ量が大きいためOLPツールの限界量を超える、変換エラーでデータを作成できない、などの問題が発生していた。このため、OLPモデルに設備を取り込まない、OLPツールで簡略な設備形状作成する、など現場設備形状と異なる不十分なモデルを用いた作業を行うこととなり、OLP実施時に干渉がなくても現場リプロデュースで干渉が発生することがあった。

また、インターロック信号の設計と検証を行うためには信号の仕様を事前に決めなくてはならないが、この仕様を現地トライアル直前に決めていた。このため、信号入出力ステップの決定と検証がOLPで実施できていなかった。

(3) サイクルタイム

一部工程においてOLPモデルでサイクルタイム算出を実施した。精度の良い算出を行うため、OLPツールはRCSモジュール (Realistic Control Simulation) を使ってサイクルタイムの算出を行っている。RCSモジュールは、OLPツール上で現場ロボットと同じ制御ロジックによる動作軌跡生成とサイクルタイムの算出を行うためのものである。その結果、OLPと現場リプロデュースのサイクルタイムの差を5%以内に抑えることができたロボットもあった。

しかし、下記のためにOLP実施後の後追いでしかサイクルタイムの算出ができなかった。

- ① RCSモジュールに設定すべきロボットパラメータを現場へのロボット据え付け前に入手することができなかった。
- ② 溶接条件の設定を現地トライアル直前にしており、OLP実施時には加工時間の算出ができなかった。
- ③ 各ロボットの加工対象となる溶接打点の配分 (以下、打点配分) に漏れがあり、現場リプロデュース時に打点配分の変更が発生していた。
- ④ (2)で述べたようにインターロック信号の設計と検証がOLP実施時に完了していなかったため、干渉領域への侵入待ち時間が算出できなかった。

3. 到達位置のリプロデュース精度向上

3.1 据え付け位置補正の全工程展開への要件

ロボットを新しく据え付ける場合、据え付け位置補正は現場ロボットの据え付け終了時からティーチングプログラム再生確認までの期間に行う必要がある。このため、新規ラインでは多数のロボットに対する据え付け位置補正作業を短時間で完了させることが求められる。しかし、MPVの量産準備で行った現場での測定方法は誤差が発生しやすく、再測定の手戻りにつながっていた。

MPVの量産準備における測定では、溶接ガンの電極先端位置をベクトロン (多関節型3次元測定機) で測定して

いた。これはベクトロンの「円測定」機能を使用して、電極先端平面の3点と電極側面の円柱を4点測定し、電極先端平面の3点から作成される面に円柱の4点を投影して、投影された点から円を生成し中心座標を算出するものである (Fig.3)。

ところが、先端平面が小さいために平面生成時にズレが生じやすく、これが誤差の要因となっていた。デミオは新規ラインに対する量産準備であり、据え付け位置補正を全工程に展開するためには、この課題を解決し作業の簡素化及び高精度化を図る必要があった。

3.2 到達位置のリプロデュース精度向上の取り組み

前節で述べた問題を解決するため、電極先端ではなくツール取り付け面を測定する方法を考えた。

ベクトロンの「円測定」機能で、ツール側のロボットへの取り付け面3点とロボット側のツール取り付け面周辺の円柱を4点測定し、電極先端時と同様のロジックで円の中心座標を求める (Fig.4)。ロボットへの取り付け面の面積は電極先端平面と比較すると100倍以上の広さがあり、測定作業のバラツキを抑制することが可能であると考えた。これにより、再測定の手戻り削減を実現した。

3.3 取り組み結果

デミオの量産準備において、全ての溶接ロボットに対して据え付け位置補正が実施できた。サイドフレームのスポット溶接ロボットで現場リプロデュース時のティーチング

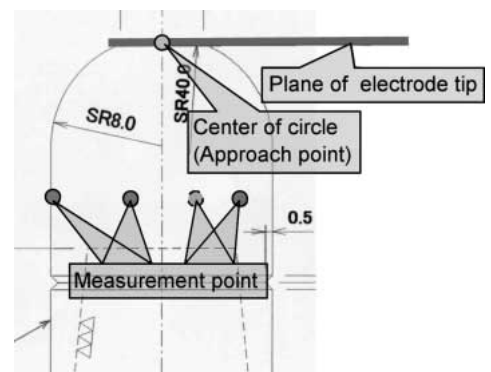


Fig.3 Measurement of a Electrode Tip

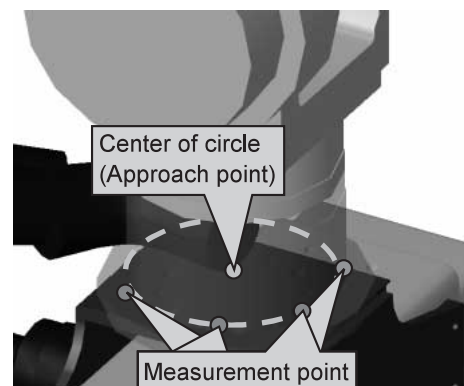


Fig.4 Measurement of a Tool Mounting Plane

修正量を確認したところ、修正量は平均8.53mm、偏差4.45mmであった。最も小さいものは2.38mmであった。

これらの取り組みの結果、MPVの量産準備時と比較して現場での修正工数が大幅に削減され、現地立ち上げ期間の短縮に貢献した。

#### 4. 干渉のない動作経路作成の取り組み

##### 4.1 全ての設備形状をOLPモデルに再現

2章で述べたように、全ての設備形状をOLPモデルに再現できていなかった。この問題を解決するために、以下の取り組みを実施した。

##### (1) データの軽量化

設備設計で作成したCADデータを直接OLPツールで変換するのではなく、JT形式を経由して変換するようにした。JT形式はUGS PLMソリューションズ(株)が提供しているシーメンスPLMソフトウェア製品群で主に閲覧可能なデータ形式である。元々閲覧用に開発されたデータ形式のため、一般的なデータ形式と比較するとデータ量が小さい。これにより、設備のデータ量が70%程度に減少し、OLPツールに全設備形状を取り込むことができるようになった。また、OLP実施中の処理速度も向上し、業務効率が向上した。

##### (2) 変換成功率の向上

JT形式を経由しても、設備設計で作成したCADデータをJT形式へ変換する時に形状欠落 (Fig.5) 等のエラーが多発し、その成功率は70%程度であった。設備設計は様々なCADを使用して行っている。これら全てのCADに対し専用データ形式からの変換ツールを揃えることは困難である。このため、一般に広く流通している中間フォーマットであるIGES形式でデータを受領している。しかし、IGES形式はCADの種類によりフォーマットの解釈が異なることがあるため、変換エラーが発生しやすい問題がある。この問題を解決するために、PDQ (Product Data Quality) ツールであるCADdoctor (株エリジオン製) を導入し、変換前にデータの検証と修正を行うようにした。

また、データが大きいとJT形式への変換でメモリを大量に消費して変換エラーが発生するため、データ受領時のファイルを分割し、1ファイル当たりのデータ量の基準を設け、手順化することで変換エラーの発生を低減した。

これらの取り組みにより、エラーの発生がなくなり (Fig.6)、ほぼ100%の変換が成功するようになった。

##### 4.2 インターロック設計と検証の実施

2章で述べたように、インターロック信号の仕様決定が遅くOLPで設計と検証が終了していなかった。これに対して、インターロック信号の仕様決定タイミングをOLP実施前に前倒した。また、インターロック信号入出力ステップの決定手順とOLPツールでの検証手順を詳細化して、業務プロセスに織り込み実行した。

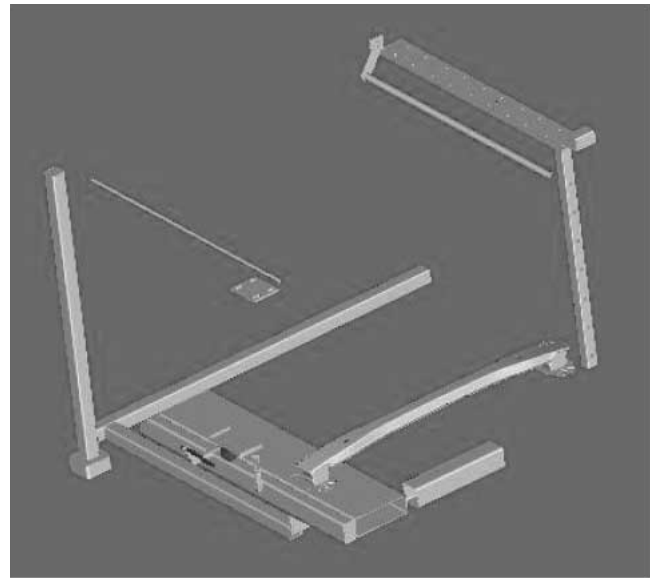


Fig.5 Lack of Shape by Conversion Error

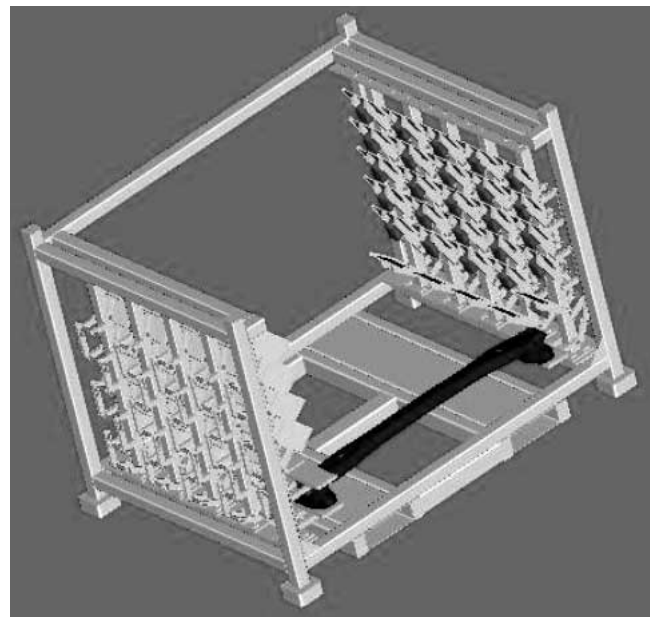


Fig.6 Evasion of Conversion Error by CADdoctor

これらにより、OLP上での設計と検証を終了させることができるようになった。

##### 4.3 取り組み結果

前節までの取り組みの結果、デミオの量産準備はMPVと比べて現場での干渉不具合による手戻りが激減し、現地立ち上げ期間の短縮に貢献した。

なお、取り組み後に発生した手戻りは63件ある。その内容は、配管・配線や付帯形状の配置ズレといった設備設計で作成するCADデータに含まれていない要素への干渉となっていた。

#### 5. サイクルタイム算出精度向上の取り組み

##### 5.1 サイクルタイム算出精度向上の要件

OLPでサイクルタイム算出を精度良く行うためには、口

ロボットの動作時間・加工時間・待ち時間のそれぞれについて、精度の良い算出が行われなければならない。これらに対する取り組みを次節以降に説明する。

5.2 ロボット動作時間の算出精度向上の取り組み

(1) 実機がない状態でのパラメータ設定

OLPツールはRCSモジュールを用いることにより、動作制御ロジックを実機と一致させている。実機には動作速度を制御するための様々なパラメータが設定されている。RCSモジュールについても実機と同様の処理が行われており、パラメータを参照しながら動作時間を算出する。このため、OLPで精度の高いロボット動作時間を算出するためには、実機パラメータの設定値をRCSモジュールにも設定する必要がある。パラメータの内容は、モータ&エンコーダ情報（分解能・電流制限・入力軸イナーシャ等）、サーボ速度情報（速度ゲイン・電流ゲイン・積分時定数等）、サーボ位置情報（最高速度・加減速時間等）、ロボットが把持しているツール情報（重量・重心等）、教示情報（速度設定値・位置決め精度設定値等）、ガン軸情報（加圧カテール・撓みテーブル・クリアランス量等）等で、これら複数のパラメータ設定値を正確に指定することが必要である。

ところが、今回のデミオでは既存ラインではなく新規ラインへの量産準備であったため、OLP実施時には実機の据え付けが終了していない。このため、実機パラメータを事前に入手してRCSに設定することは困難であった。

この問題を解決するためにパラメータ個々の内容を調査し、ロボットの型式により設定値が決まるものと、実際の動作条件にて動作調整後に設定値が算出されるものに分類し、ロボットの型式にて設定が行えないパラメータについては、類似の既設設備からパラメータを算出して設定する手順を作成した。

具体的には、ロボット自身が持っている軸については出荷以降にパラメータを変更することがほとんどないために初期設定をそのまま使用すれば問題ない。しかし、サーボ溶接ガン等が持っている外部軸のパラメータやツールの重量・重心については、個々にパラメータが異なる。これら個々に異なるパラメータに関して、同じサーボ溶接ガンを持つ既設ロボットの外部軸を参照してパラメータを設定するようにした。これにより、OLP実施前に正確なパラメータを設定することが可能になった (Fig.7)。

(2) 旧式ロボットの動作時間算出

これまではRCSモジュールを活用したロボット動作時間算出について説明してきた。このRCSモジュールは現行最新型より1世代程度旧式の制御型式から提供が始まっており、それ以前の旧式ロボットにはRCSモジュールが存在しない。これらの旧式ロボットではOLPツール上の動作制御ロジックが実機と一致しないため、精度の高いサイクルタイムの算出ができない。一方、デミオの量産準備では、RCSモジュールが存在しない旧式ロボットを他ラインから転用することが多かった。

この問題に対しては、デミオで使用するロボットと同じ制御型式の実機で事前に動作時間算出実験を行った上で、OLPの動作時間算出を実施した。

5.3 加工時間算出精度向上の取り組み

OLPと現場リプロデュースの加工時間を一致させるためには、打点配分と溶接条件が一致しないといけない。しかし、OLPモデルは工程ごとにデータを作成するため、全ての溶接打点に対する打点配分漏れを確認することは容易ではなく、打点配分漏れを起因とした現場リプロデュース時の配分変更が発生していた。また、溶接条件を記載する工程図は現地トライアル直前に発行しており、OLP実施時に溶接条件の決定が間に合っていなかった。

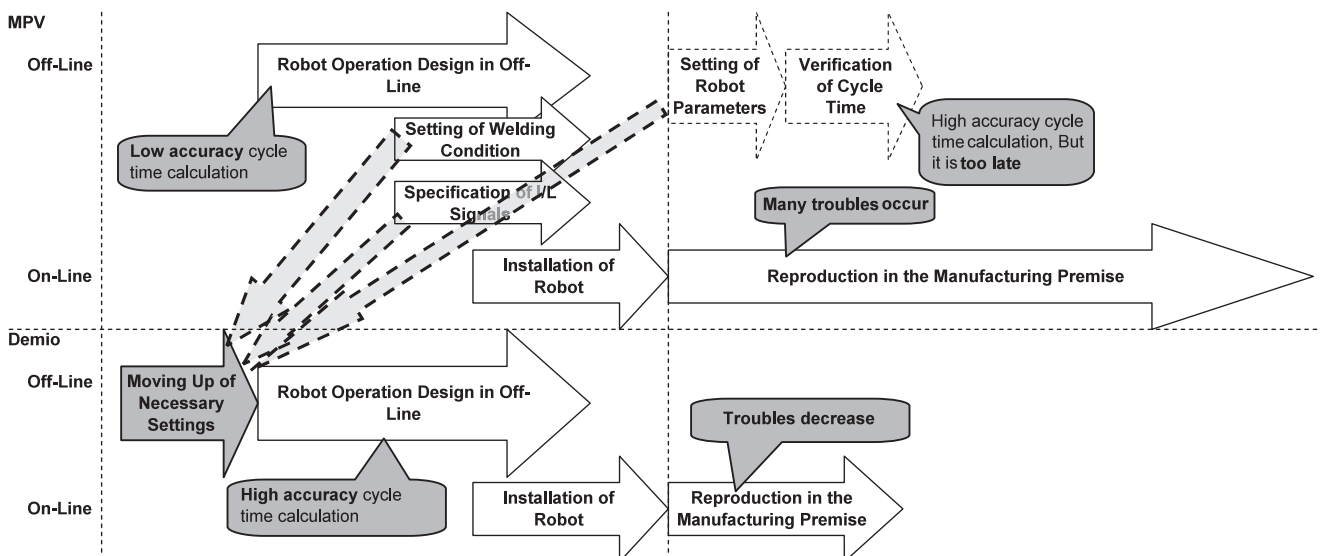


Fig.7 Change of Process for High Accuracy Cycle Time Calculation

これに対し、各工程のOLPモデルからひとつのデータベースに打点配分情報を取り込めるようにし、全打点の配分を確認できるようにした。また、データベースから工程図への情報出力を行い、作図作業を効率化して出図タイミングを早期化できるシステムを構築した。これにより、打点配分漏れを確実に確認できるようになり、OLP実施前に溶接条件決定を行うことが可能となった (Fig.7)。

#### 5.4 待ち時間算出精度向上の取り組み

ロボットの待ち時間はインターロックによる干渉領域への侵入順番待ちで発生する。このため、OLPと現場リプロデュースの待ち時間を一致させるには、インターロック信号の設計と検証をOLP実施時点にて完了させることが必要である。

これについては、前章で述べたインターロック信号仕様決定の前倒しと検証手順の詳細化を進めることで、インターロックの設計と検証をOLP実施時点にて完了させることを可能とした (Fig.7)。これにより待ち時間を精度良く算出できるようになった。

#### 5.5 取り組み結果

デミオの量産準備において、サイドフレームの溶接作業ロボットで実機サイクルタイムに対するOLPサイクルタイムの比率を確認した。その結果、RCSモジュールありのコントローラでは、平均92.02%、偏差6.50%であった。またRCSモジュールなしのコントローラでは平均78.71%、偏差18.61%であった。

この結果、特に旧式ロボットにおいて投資過多の傾向を示すものの、MPVの量産準備で多発した現場でのサイクルタイム未達による手戻りは激減し、現地立ち上げ期間の短縮に貢献した。

## 6. 今後の課題

### 6.1 到達位置精度の更なる向上

全工程において到達位置精度の向上に取り組んだことにより、現場でのティーチング修正工数が減り、デミオの量産準備における現地立ち上げ期間の短縮に貢献した。しかし、ズレ量が平均・バラツキともに残っており、実機でのティーチング修正はなくなっていない。

マツダでは更なる現地立ち上げ工数の削減のため、実機での修正が不要なレベルを目指しており、そのための許容誤差量について検討を進めている。

### 6.2 OLPモデル精度の更なる向上

全工程においてOLP上での干渉のない動作経路作成に取り組んだことにより、現場での干渉不具合が減り、デミオの量産準備における現地立ち上げ期間の短縮に貢献した。しかし、まだ63件の手戻りが発生している。

マツダでは更なる現地立ち上げ工数の削減のため、現場での手戻り撲滅を目指している。そのために、配線や配管といった現時点でモデルに含んでいないものをOLPで表現

することが必要である。

### 6.3 サイクルタイム算出精度の向上

全工程において工程サイクルタイムの算出を実施したことにより、現場でのサイクルタイム未達による不具合が減り、デミオの量産準備における現地立ち上げ期間の短縮に貢献した。しかし、OLP上でのサイクルタイム算出結果は実機よりも短い傾向にあり、そのバラツキも大きい。

最短・最速の工程を実現するためには時間当たりの加工効率向上が必要である。そのためにはロボットの性能を使い切る工程設計やティーチングが求められており、OLP上でそのような設計を行うためにサイクルタイム算出精度の向上が必要である。

### 6.4 OLP業務プロセスの効率化

デミオの量産準備では、OLP業務プロセスを手順レベルに明細化し、それを全工程で完遂させることにより、現地立ち上げ時に発生していた手戻りを大幅に減らすことができた。しかし、OLP業務で多大な工数を費やしており、この効率化が求められる。

そのために、繰り返し設計の排除、検証やシミュレーションの効率化、最適方案にたどり着くプロセスの最短化、入力やチェック作業の排除等が必要であり、これらを実現するためのプロセスやシステムの整備・改善が今後の課題となる。

## 7. おわりに

今回紹介した取り組みは、MPVの量産準備において一部工程で確認したOLPの効果を全工程で享受するために、業務プロセスやシステムの整備を行い実際に完遂させたものである。この取り組みによりデミオの量産準備における現地立ち上げ期間はMPVと比較して大幅に短縮することができた。今後は、量産準備プロセスの更なる短縮と高効率生産プロセスの追求に向けて、前章で述べた課題に取り組む所存である。

最後に、この取り組みに当たり多大なご協力を頂いたUGS PLMソリューションズ(株)、(株)電通国際情報サービス、(株)不二越、(株)安川電機、川崎重工(株)をはじめとする関係各位の方々に、深く感謝申し上げます。

著者



野島 敏之