

# 変化・変動に迅速・柔軟に対応できる 自律型ロボットシステム

## Quick-adapting and Flexible Autonomous Robot System

● 尾崎行雄      ● 小林泰山      ● 富田順二

### あらまし

富士通は、変化・変動に迅速・柔軟に対応できるものづくりを実現するため、部品のばらつきや設備の経年劣化に対応する自律型ロボットシステムの開発に取り組んでいる。ロボットを動作させるためには、専門技術者が動作プログラムを作成し、部品供給・組み立て位置のティーチングを行い、その後ロボットに組み立て作業を行わせることになる。しかし、このような方法では多大な工数を費やすことが問題となっていた。また、量産時には、部品のばらつきなどの製造環境変化により、ロボットの停止が頻繁に発生していた。そこで、ロボット動作プログラムを自動生成し、使用するロボットに適したデータ形式に自動変換してロボットへデータ転送する技術を開発した。更に、ロボットが自ら「感じ」「考え」「行動」する自律・協調制御技術の開発を推進している。本技術により、変化・変動への柔軟な対応を可能とすることで、段取り替え・作業組み替えのミニマム化を図り、ロボット導入の障壁を解消する。

本稿では、変種変量生産に適用することによって、生産効率化を実現する自律型ロボットシステムの開発について述べる。

### Abstract

Fujitsu is working on developing an autonomous robot system that can adapt itself quickly and flexibly to changes and fluctuations in a production environment, such as inconsistency in product parts and facility deterioration. The deployment of robots in production lines requires programming by expert engineers, and the robots need to be teaching with the positions of parts supply and assembly, before they are deployed in the assembly lines. However, a development process such as this incurs a significant amount of work. Meanwhile in mass-production, certain changes in the production environment, such as inconsistencies in parts measurements, often cause the system to stop. Therefore, we have developed technology that is capable of automatically generating programs that control robot movements. The technology also makes it easier to automatically convert the programs into applicable data formats, and transmit them to the robot. We are further working to develop technologies that allow the robots to “sense,” “think” and “act” so that we can achieve autonomous and congruous control. These technologies help to overcome disadvantages in robot deployment in production, as the adaptable and flexible system makes it possible to minimize the impact of changes made to assembly orders or line processes. This paper describes this autonomous robot system, which can be applied to adaptable and variable manufacturing for enhanced production efficiency.

ま え が き

富士通では、サーバ、ノートPC、携帯電話、通信基地局装置などの情報通信機器の製造・販売を行っており、グループ各社の製造工場では、ロボットを活用してその生産効率化を推進している。しかし、製品に使用する電子機器には、部品・ユニットの間を電氣的に接続するケーブルが欠かせないため、その組み立て作業は難易度が高くロボットを適用できない状況にある。

ほかの大手企業においても、ロボットによる電子機器の組み立てが試行・適用され始めてはいるが、ロボットを動かすには専門の技術者が必要となるため、導入が進まない原因となっている。また、新機種への適用までの準備や生産量に合わせた工程変更にかかることから、需要のある製品をタイムリーに生産する変種変量生産へのロボットの適用は難しいのが現状である。更に、ロボットメーカーごとに制御プログラム言語の仕様が異なり、非互換であることも導入を阻害する一因となっている。RTM (RT-Middleware) やROS (Robot Operating System) といった共通ソフトも提案されているが、まだデファクトスタンダードと言えるまでには普及していない。これは、ロボットメーカーと専門の生産技術者を有する大手企業がロボット業界を主導してきた経緯によるもので、中小企業などの専門技術者を持たないユーザーからは、ロボットの機種に依存しない汎用的なシステムの実現が切望されている。

本稿では、変種変量生産へロボットを適用し、生産効率化を実現するために富士通が取り組んでいる自律型ロボットシステムの開発について述べる。

変種変量生産への対応

変種変量生産における所要変動への対応は人海戦術で行っており、定時まで稼働できない定時割れや、多残業といった問題が発生する(図-1)。また、製品ライフサイクルが短くなり、短期間で新機種を立ち上げる必要性が急速に増している。

富士通では、平準化による生産量変動の抑制や、自律改善活動による生産性向上を推進してきた。また、自動化による変量吸収を目指し取り組みを始めている。更に、種々の作業における工法を考

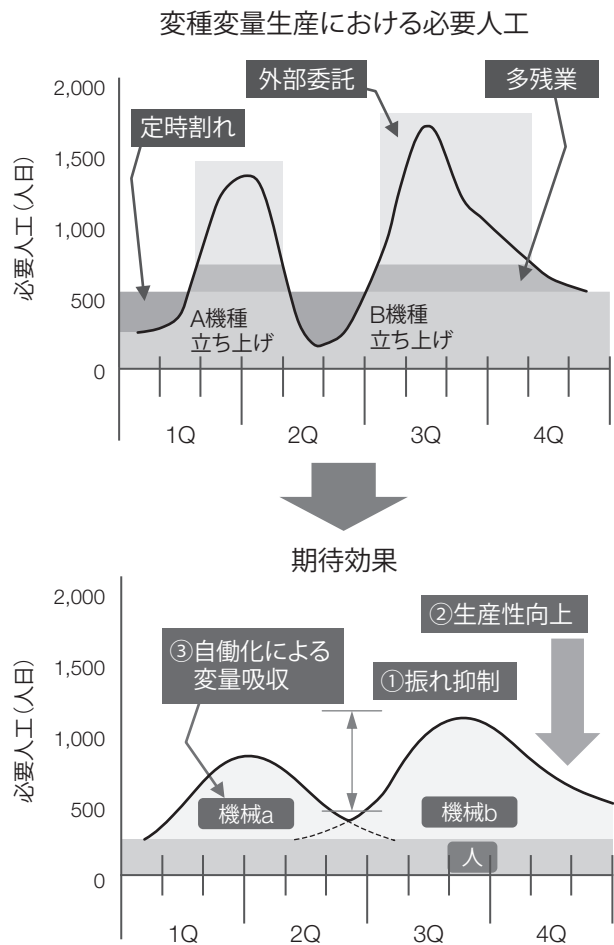


図-1 変種変量対応の現状とアプローチ

案し、ロボットの適用可能範囲を拡大している。

自動化による変種変量生産に対応するため、人と機械の協調ラインを構築し、人と機械が高い自由度で仕事を分担できる範囲を拡大することが必要となる。そのために、機械には低コストな汎用性と高い段替え性（機種切り換え）が求められている。

富士通の自律型ロボットシステムの概要

富士通で開発を進めている自律型ロボットシステムの構成を図-2に示す。自律型ロボットシステムは、部品のばらつきや設備の経年劣化に対応する自律化制御部と、使用するロボットの機種に依存せず動作可能な機種非依存ロボット制御部で構成され、ロボットが自律的に行動し、周辺機器をコントロールする。

ユーザーは設計データに基づき、簡単な操作で動作アルゴリズム・軌道などのロボット動作をシ

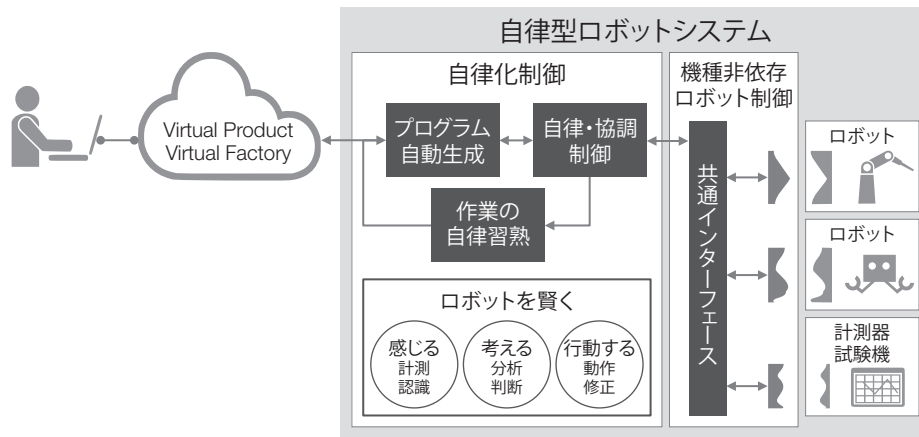


図-2 自律型ロボットシステムの構成

ミュレーション（動作計画の自動化）し、シミュレーション結果の妥当性を確認後、ロボットの動作プログラムを自動で生成できる。自動生成した動作プログラムは、ロボットへデータ転送する際に、使用するロボットに合わせたデータ形式に自動変換される。

このようなプログラム自動生成と機種非依存ロボット制御により、ユーザーはロボットの機種を意識する必要がなくなる。このため、複雑なプログラミングやデバッグ作業から解放され、より複雑な作業にロボットを適用しやすくなる。また、ほかの工程や作業への使い回しが容易になることで段替えの作業時間を短縮でき、新機種製造の立ち上げを迅速化できる。

量産中の部品のばらつきなどの製造環境変化に対応するため、ロボットが自ら「感じ（計測・認識）」「考え（分析・判断）」「行動（動作・修正）」するロボットの自律・協調制御技術を富士通では開発している。本技術は、ロボットが誤作動を認識した場合、作業の中断か続行を判断し、適切な動作を選択することを目指している。

ロボットが自律的に作業を行うことで、部品のロット変動やロボットシステムの構造的な経年劣化に自動追従する。これによって、製造品質を安定化できるとともに、日々のチューニング作業から解放され、メンテナンスサイクルを長くできる。以上のように、自律型ロボットシステムにより、変化・変動に迅速・柔軟に対応できるものづくりを実現できる。次章以降では、それぞれの技術を

説明する。

### ロボット動作プログラムの自動生成

ロボット動作プログラムを自動生成するために、製品の3次元モデルなどの設計要件や作業計画・手順といった製造要件をシステムに入力する。このとき、3次元CADや製造シミュレーターと連携することで、簡単にデータの入力が可能となる。また、ロボットメーカー各社が提供するロボットの3次元モデルを取り込み、ツール位置や座標系といったロボットのモデル設定を行う（図-3）。

組み立ての作業計画・手順に、必要な要素作業を選択し、要素作業ごとにロボットの動作モードを選択することで動作設定を行う。部品の供給位置や組み立て位置は既に取り込んだ3次元データを活用し、部品を選択するだけで簡単に教示点を設定できる。

ロボットの特異点（制御できなくなる姿勢）や組み立て中の製品・周辺機との干渉を回避するため、ロボットメーカーから提供されているロボットシミュレーターでは、手動で動作軌道を作成する必要がある。しかし、本システムでは、解析条件を設定し動作をシミュレーションすることで、適切な動作軌跡の自動生成が可能である。ユーザーは、アニメーションやグラフを用いてこの動作結果の妥当性を確認できる。所望のロボット動作ができることを確認後、ロボットの動作軌跡データとして出力する。

富士通は、人と機械の協調ラインを実現するた

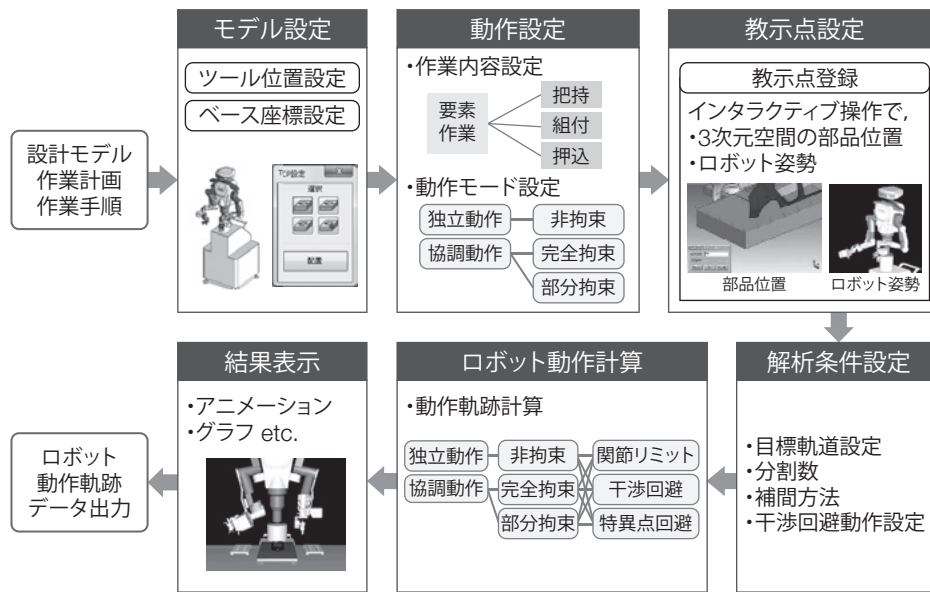


図-3 ロボット動作プログラム自動生成の流れ

め、自動化可能率を70～80%まで拡大することを計画している。電子機器組み立てにおいて、ケーブルのような柔軟物を対象とする作業は約30%以上を占めており、これらの作業は両腕による協調や片腕の補助動作を伴う難作業である。特に、柔軟物であるケーブルのフォーミング作業は、フォーミングルート全域においてケーブルの垂れや曲がり、周辺物との干渉に配慮した適切な把持位置・姿勢、抑え位置・姿勢、フォーミング軌跡の計画が必要となる。

本システムは、剛体部品組み立てにおいて、二腕を協調させたロボット動作の自動生成が実用可能となっており、継続して柔軟物組み立て作業の動作プログラムを自動生成することを目指している。

現在、ロボットの動作と合わせてケーブルの挙動を事前に予測し、ケーブルフォーミング作業のロボット動作プログラムを自動生成する技術の研究開発に取り組んでおり、2017年度の実用化を計画している。

### 機種非依存ロボット制御

シミュレーションにより生成された動作軌跡で実際にロボットを動作させるためには、制御プログラムを作成する必要がある。しかし、ロボットメーカーごとにロボットの制御プログラム言語

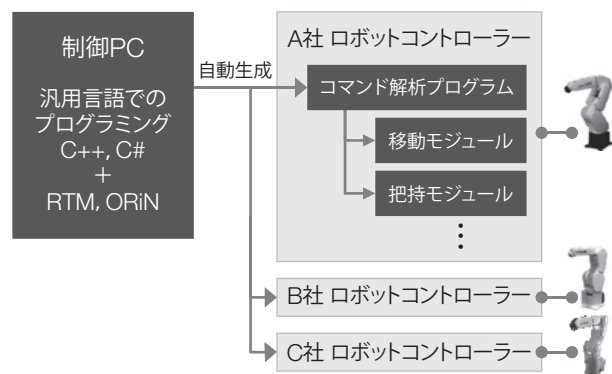


図-4 各社ロボットプログラムの自動生成

(ロボット言語)は異なっている。そこで、富士通ではロボット動作プログラムを自動生成し、使用するロボットに合わせたデータ形式に自動変換してロボットへデータ転送する技術を開発した(図-4)。

シミュレーターから出力されたロボット動作軌跡データは、共通言語(SLIM)を用いて標準動作プログラムとして生成される。使用するロボットメーカー、言語は既にシミュレーター内に情報を有しているため、各社の言語の構文解析により作成したトランスレーターを起動して、標準動作プログラムを各社の動作プログラムに自動変換する。トランスレーターの開発においては、各ロボットメーカーと連携しながら推進する。



このように、ユーザーはロボットのメーカー・機種の違いを意識する必要がなくなるため、作業に適切な機種を選定し、生産状況に合わせて使用するロボットを容易に変更できるようになる。

### 自律・協調制御

量産に移行すると、頻繁にロボットの停止が発生する。いわゆる、チョコ停である。これは、部品のばらつきなどの製造環境変化によって発生するが、ロボットは教えたことを再現するティーチングプレイバックを基本としているため、変化に追従できないことが原因である。

これまで、ユーザーはチョコ停を回避するために種々のエラー停止モードを推定し、個別にエラー回避策を講じて可動率を向上する努力を行っているが、全てのエラーを回避することは不可能である。また、チョコ停の対応には専門の生産技術者が多くの時間を費やすこととなり、ロボットの導入・適用を阻害する要因となっている。

これに対し、自律型ロボットシステムでは、自律・協調制御により変化・変動への柔軟な対応を可能とする。本システムでは、力覚センサーや触覚センサー、カメラが配置されており、ロボットの「作業状態」を計測・認識する。ここでいう作業状態とは、ロボット自身の制御状態よりも部品の状態・挙動に主眼を置いたものである。以下に、作業状態を認識するために本システムで採用している方式の特徴を示す。

力覚センサー、触覚センサーなどの各センサーからのデータは、定常域・過渡域に識別される。過渡域とはロボットが何らかの組み立て動作を行っている区間であり、データが時系列で顕著な変動をする。一方で、定常域とはロボットは組み立て動作を行っておらず、停止または移動している区間であり、過渡域のようなデータの変動はない。

作業過程の状態を識別するためには、過渡域での異常検知が重要となる。過渡域では、データ波形の特徴量により判別するSVM (Support Vector Machine) 識別器による判定手法を採用し、ばらつきの大きいデータからでも確実に異常を検知可能としている。定常域では、データのばらつきから許容範囲を判別する手法を用い、動作結果のズレ量として異常を検知するようにしており、それぞ

れの状態に適した異常検知<sup>(1)</sup>を実現している。

また、カメラからの動画データは、動きの特徴として異常検知に有効とされる。立体高次局所自己相関特徴 (Cubic Higher-order Local Auto-correlations: CHLAC特徴) を利用した手法を採用している。この手法は、取得した動画の特徴を各画素の動きとして捉えるため、部品の形状に影響を受けにくく、組み立て動作時のわずかな異常の検知が可能である。

各センサーデータ、動画データを基に検知された異常情報は、融合・分析を行い、それぞれのセンサー情報の感度や複数センサー情報の相関により、統合的にリアルタイムで異常の有無を判断<sup>(2),(3)</sup>する。作業状態が異常であると判断した場合には、ロボット動作を即時停止して異常原因を分析し、正常な作業結果が得られるようにロボット動作を自律的に変更する。

実運用では、製品の試作や量産開始時に作業状態を学習 (初期学習) し、量産しながら追加学習や再学習を行うことで、人が作業に習熟するのと同じように賢いシステムへと進化していく。

以上のように、エラーにより停止する前に異常を予測検知し、異常の状態を分析して動作を変更することで、失敗しないものづくりが可能となる。これにより、変化・変動に迅速・柔軟に対応できるものづくりを実現できる。

### 工程計画・作業計画の自動化

これまで述べてきたように、自律型ロボットシステムによって、設備立ち上げ期間の短縮、量産中の作業品質・生産効率の向上が可能となる。

更に富士通では、設備から製造ライン全体へと視野を広げ、ロボットの動作を考慮した上で、組み立て工程全体として工程計画・作業計画・動作計画を最適化する取り組みを開始している。これは、人とロボットが協調するラインにおいて、製品特性や製造特性を考慮して、人とロボットの作業配分や作業順序を最適化しようとするものである。

現在、ロボットの作業は固定的に扱われているが、ロボットの適用可能範囲を拡大し自律化を推進することで、ロボットに与える作業を柔軟に変更できるようになる。しかし、人とロボットは作業の特性が異なるため、新たな工程設計・ライン

設計手法が必要となる。富士通では、これまで現場で培ってきたIE（Industrial Engineering）技術とシミュレーション技術を融合し、この課題を解決する技術の確立を目指している。

また、更なるロボットの活用拡大を目指し、人とロボットのコミュニケーション技術、自己成長技術、および環境認識技術を開発し、ロボットの智能化を進めることを計画している。

### む す び

本稿では、変化・変動に迅速・柔軟に対応できるものづくりを実現する自律型ロボットシステムの開発について述べた。今後、ロボットプログラム自動生成技術、機種非依存ロボット制御技術、自律・協調制御技術を確立し、保有する種々の技術と連携・融合することで実用システムの構築を目指していく。そして、実用可能となった技術を順次お客様に提供していく。

なお、工程計画・作業計画の自動化技術開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の課題設定型産業技術開発費助成金（「ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト」）による助成を受けて実施しているものである。

### 参考文献

- (1) 雨宮 智ほか：組立工程の自動化における異常判断技術。精密工学会，2015年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，p.953-954（2015）。
- (2) 布施貴史ほか：FA作業における正常な動きの動画学習による異常動作の検知技術。精密工学会，動的画像処理実利用化ワークショップ（DIA2015）講演論文集，OS1-1（2015）。
- (3) 布施貴史ほか：FA作業における正常な動きの動画学習による異常動作の検知技術。日本工業出版，画像ラボ，Vol.26，No.9，p.74-79（2015）。

### 著者紹介



#### 尾崎行雄（おざき ゆきお）

テクノロジー&ものづくり本部  
共通生産技術センター  
生産技術企画・開発およびロボット関連技術開発に従事。



#### 小林泰山（こばやし たいざん）

テクノロジー&ものづくり本部  
共通生産技術センター  
ものづくりのICT化技術開発と適用推進に従事。



#### 富田順二（とみた じゅんじ）

ものづくり技術研究所  
ファクトリーエンジニアリングプロジェクト  
ものづくりに関わる研究に従事。