

# ACサーボの高速・高精度位置決めと簡単調整を実現する制御技術の開発

Development of AC Servo Driver to Realize both High-Speed and High-Accuracy Positioning without Time-Consuming Servo Tuning

今田 裕介  
Yusuke Imada

鈴木 健一  
Kenichi Suzuki

園田 大輔  
Daisuke Sonoda

藤原 弘  
Hiroshi Fujiwara

## 要 旨

産業用装置に搭載されているサーボモータには、高速化・高精度化といった基本性能のさらなる進化とともに、高度化・複雑化する制御機能をいかに簡単に、短時間で、最適に調整できるか、といったユーザビリティ向上が求められている。当社では、これらのニーズに対応するため、高速位置決めと低振動化を両立し、位置決め時間を従来比1/10以下に短縮し、停止時振動も1/3以下に抑える当社独自構成の2自由度制御技術を開発した。また、サーボへの熟練度が低い調整者でも、簡単な初期設定のみで短時間で目的の特性を実現する制御機能の自動調整技術を開発した。

## Abstract

For servo motors installed in industrial equipment, not only basic performance such as high-accuracy, high-speed positioning but also ease of servo tuning to realize optimal performance in a shorter time are required. To meet those requirements, we have developed our own two-degree-of-freedom control system to simultaneously achieve the optimal tuning of both high-speed positioning and low residual vibration. The total positioning time and residual vibration is reduced to 1/10 and 1/3 of conventional example, respectively. In addition, we have successfully implemented an auto-tuning algorithm which allows even a beginner without special skill to tune the servo performance in a short period of time.

## 1. はじめに

サーボモータは、半導体製造装置、工作機械、産業用ロボットなど、産業用装置に幅広く用いられている。これらの装置では、人件費高騰に伴う生産工場の省力化・自動化のための高タクト化、半導体の微細化に伴う電子部品の小型化による高精度化、低コストかつ高性能な新装置をいち早く市場に投入して競争力を強化するための装置立ち上げ工数短縮、といった要求が高まっている。

このようななか、サーボモータを制御するサーボアンプには、高速化・高精度化といった制御性能のさらなる進化とともに、高度化・複雑化する制御機能をいかに簡単に、短時間で、最適に調整できるかといったユーザビリティ向上が求められている。

当社では、これら市場ニーズを実現し、産業用装置の革新に貢献するため、動作対象をより高速で、かつ精度良く制御することができる位置決め制御技術と、高度で複雑な制御機能を誰でも簡単に使いこなすことができるユーザビリティ向上を実現するサーボ自動調整技術の開発に取り組んだ。その結果、動作対象を目標位置に到達させるまでの遅れ時間を従来比1/10以下に短縮し、かつ目標位置到達時の振動も1/3以下に抑制する位置決め性能の向上を達成した。また、各種制御機能の調整には難易度と調整者のスキルに応じて半日～1日程度要してい

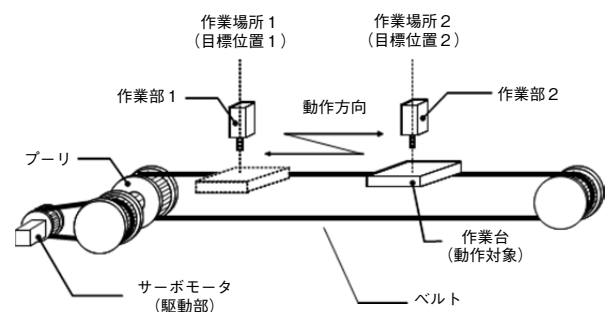
たが、それを調整者のスキルによらず、約10分程度で完了させるとともに、サーボ調整の熟練者と同等レベルの調整結果が得られるユーザビリティの向上を達成した。

本稿では、その技術成果について詳細に報告する。

## 2. 高速・高精度位置決め制御技術開発

高速・高精度位置決めとは、動作対象を目標位置へ到達させるまでの遅れ時間を短くし、かつ、目標位置到達時に振動なく停止させることを狙うものである。

具体的に、産業用装置の駆動機構の例を用いて説明する(第1図参照)。本機構は、サーボモータの回転により、

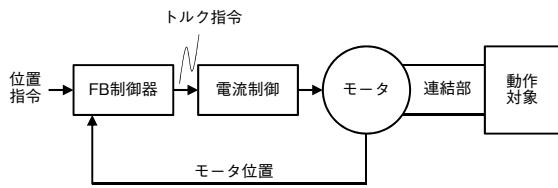


第1図 産業用装置の駆動機構例

Fig. 1 Servo motor usage in belt drive system

プーリとベルトを介して動作対象である作業台を左右に移動し、作業台に搭載された物を搬送するものであり、特にベルトを介しているため、サーボモータと作業台の連結部の機械剛性が低い機構となっている。このような機構の場合、高速・高応答にサーボモータを動作させると、機械剛性の低さや摩擦などの外乱成分の影響により、目標位置到達時の振動成分が大きくなり、高速・高精度な位置決め特性を達成できず、装置の高タクト化の阻害要因となっていた。

このような機械剛性の低い機構に対し、当社の従来のサーボアンプに搭載されたサーボ制御構成（第2図参照）での課題を説明する。従来のサーボ制御構成では、上位コントローラからの位置指令に対し、モータ位置を一致させるようにフィードバック制御器（以下、FB制御器と記載する）で必要なトルク指令を算出し、そのトルク指令通りのトルクをモータが発生するよう、モータに通電する電流を制御する構成になっていた。



第2図 従来の制御構成  
Fig. 2 Conventional control system

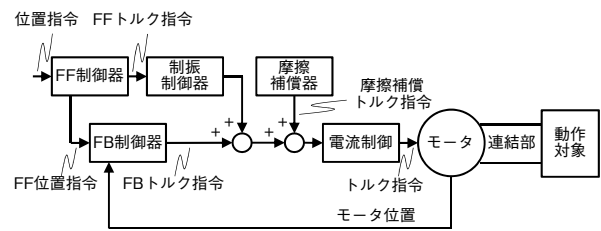
このような制御構成では、位置指令に対するモータ位置の応答特性（以下、指令応答特性と記載する）と、摩擦などの外乱成分により生じるモータ位置の振動に対する抑制特性（以下、外乱抑圧特性と記載する）の両方をFB制御器の応答性で決めている。これら指令応答特性と外乱抑圧特性はともに高いほうが良く、機械剛性が高い装置ではこのFB制御器の応答性を十分高くできることから、本制御構成でも高速・高精度な位置決め特性を達成することができる。しかし、第1図に示すような機械剛性の低い装置では、指令応答特性を高くすると機械剛性の低さに起因した振動が発生するため、FB制御器の応答性を十分に高くできない。その結果、外乱抑圧特性が低くなり、摩擦などの外乱成分による影響を十分に抑制することができず、目標位置到達時に振動が発生してしまう。つまり、機械剛性の低い装置において、指令応答特性と外乱抑圧特性を両立させることは困難であり、結果として高速・高精度な位置決め特性を実現できないという課題があった。

そこで、まず指令応答特性と外乱抑圧特性を独立して

調整可能とする当社独自の2自由度制御技術を開発することで、機械剛性の低い機構においても指令応答特性と外乱抑圧特性の最適設定を可能とした。さらに、2自由度制御構成に対して、モータと動作対象の連結部の機械剛性モデルを加えることで目標位置到達時の振動を低減させる制振制御技術、外乱成分の主要因である摩擦による影響を予測して打ち消す摩擦補償技術を開発することで、さらなる位置決め性能の向上を実現した。以下、その詳細を説明する。

## 2.1 2自由度制御技術開発

開発した2自由度制御構成を第3図に示す。従来の制御構成に対し、フィードフォワード制御器（以下、FF制御器と記載する）、制振制御器、摩擦補償器を追加している。本節では、指令応答特性と外乱抑圧特性を独立して調整可能とした当社独自の2自由度制御構成についてのみ説明し、制振制御器と摩擦補償器については、後述する制振制御技術開発と摩擦補償技術開発にて説明する。



第3図 2自由度制御構成  
Fig. 3 Two-degree-of-freedom control system

上位コントローラからの位置指令に対して目標とする指令応答特性となるFF位置指令を算出するとともに、モータと動作対象を1つの剛体と仮定してモデル化してFF位置指令通りにモータを動作させるために必要なFFトルク指令をFF制御器で算出する。これにより、FF位置指令とモータ位置は基本的に一致し、FF制御器のみで指令応答特性を決めることができる。また、外乱成分により発生するFF位置指令に対するモータ位置の振動を抑制するために必要なFBトルク指令を、目標とする外乱抑圧特性に基づいてFB制御器が算出する。そして、FFトルク指令とFBトルク指令を加算したトルク指令に基づいてモータを制御する。本構成により、指令応答特性をFF制御器で、外乱抑圧特性をFB制御器でそれぞれ独立して調整でき、機械剛性の低い機構においても指令応答特性と外乱抑圧特性を最適に調整することが可能となる。

## 2.2 制振制御技術開発

モータと動作対象の連結部の機械剛性が低い駆動機構では、連結部のバネ成分による共振特性が目標位置到達時の振動を引き起こす。この振動はFB制御器で抑制することになるが、外乱応答特性を高くできないために十分な抑制ができない。

そこで、モータと動作対象の連結部の機械剛性モデルをもつ制振制御器を追加し、モータと動作対象を1つの剛体と仮定して算出したFFトルク指令に対して、連結部の機械剛性モデルに基づいて共振成分を除去する補正を行い、モータを制御するようにした。これにより、外乱応答特性の低いFB制御器による振動抑制を必要とせず、目標位置到達時の振動を低減することが可能となる。

## 2.3 摩擦補償技術開発

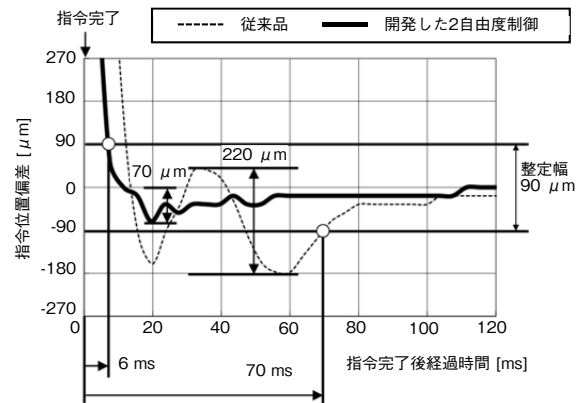
動作中に生じる摩擦トルクは一般に、固定値であるクーロン摩擦と、動作速度に比例する粘性摩擦の2つに大別される。この摩擦トルクは外乱トルクとなり、FF制御器で算出するFFトルク指令ではFF位置指令通りにモータ位置を動作させることができなくなる。このため、FF位置指令とモータ位置に偏差が生じ、FB制御器で摩擦トルクを打ち消す必要がある。しかし、モータと動作対象の連結部の機械剛性が低い駆動機構では外乱応答特性を高くできないため、加減速動作時の摩擦トルク変化に対してFB制御器では補償できない。その結果、目標位置に対するオーバーシュートが発生して停止時振動が発生する。

そこで、動作速度と摩擦トルクの関係のモデルをもつ摩擦補償器を追加し、摩擦トルクによる影響をあらかじめ予測して打ち消す摩擦補償トルク指令を算出し、モータを制御するようにした。これにより、外乱応答特性の低いFB制御器による補償を必要とせず、加減速動作時の摩擦トルク変化に即座に対応することができ、目標位置到達時の振動を低減することが可能となる。

## 2.4 高速・高精度位置決め制御技術の導入効果検証

従来制御と、開発した2自由度制御の目標位置到達時の位置偏差波形を第4図に示す。なお、本評価はモータと動作対象の連結部の機械剛性の低いベルト機構の評価装置で行った。

本結果より、指令完了後にモータ位置と目標位置との偏差が所定の範囲（以下、整定幅と記載する）内に収束するまでの時間（以下、位置決め時間と記載する）は、従来制御に比べて1/10以下に短縮するとともに、停止時振動も1/3以下に抑えることができた。これにより、動作の高速化と低振動化の両立を実現した。



第4図 目標位置到達時の位置偏差波形

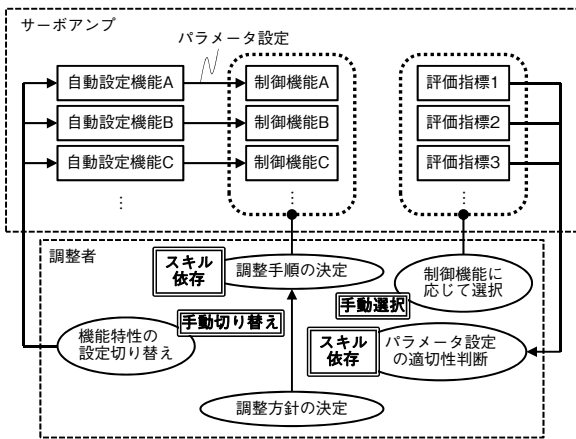
Fig. 4 Waveform of position errors in experiments

## 3. サーボ自動調整技術開発

サーボアンプには、装置特有の要求に応えるために、負荷イナーシャや偏荷重、摩擦トルクなどの負荷特性を補償する機能や、共振特性が引き起こす振動を抑制する機能など、高度で複雑な制御機能が多数搭載されている。このため、サーボ性能を最大限発揮するには、装置特性に合わせて各種制御機能の調整パラメータを最適に調整する必要があり、制御機能ごとに調整を補助するための自動設定機能が用意されている。

しかし、各種自動設定機能は個別に最適化が図られているが自動設定機能間の連携は考慮されていないため、自動設定機能を用いてすべての制御機能の調整パラメータを最適に調整するには適切な条件かつ正しい手順で自動設定機能を使用する必要がある。従来のサーボ調整(第5図参照)では、調整者は調整方針と各種制御機能の調整手順を決定し、制御機能ごとに各種自動設定機能の機能特性の設定切り替えを行い、調整に必要な評価指標を選択してサーボアンプから取得し、取得した評価指標から制御機能のパラメータ設定が適切かどうかを判断していた。これら決定・選択・判断は制御理論に関する知識に基づくサーボ調整のスキルが必要であり、このスキルによっては調整時間が長くなることや最適な調整結果が得られないという課題があった。

また、モータ速度から共振周波数をリアルタイムに推定し、共振振動を抑制する振動抑制フィルタを自動設定する機能である適応フィルタ機能においては、従来機種において2つの共振振動を抑制できるように適応フィルタの数を2つとしたが、2つの共振振動の周波数が近い場合に精度良く振動抑制フィルタを自動設定することは困難であった。したがって、サーボ調整の自動化で使用する



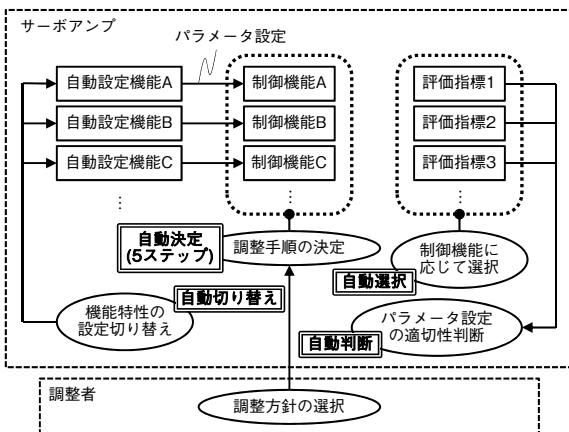
第5図 従来のサーボ調整の概略図  
Fig. 5 Schematic of conventional servo tuning

るには適応フィルタ機能の精度向上が必須という課題もあった。

そこで、これら2つの課題を解決するために、自動化された手順に従うだけで誰でも簡単かつ最適な調整が短時間でできるサーボ自動調整技術を開発した。さらに、2つの共振振動の周波数が近い場合においても振動抑制フィルタを適切に自動設定できる適応フィルタ機能の精度向上を行い、サーボ自動調整に使用可能とした。以下、その詳細を説明する。

### 3.1 サーボ調整の自動化

開発したサーボ自動調整機能を用いた調整の概略図を第6図に示す。



第6図 サーボ自動調整機能を用いた調整  
Fig. 6 Schematic of new servo auto-tuning

サーボ自動調整機能はPC上で動作するセットアップ支援ソフトウェアツール（以下、ツールと記載する）で

あり、サーボアンプに接続して簡単な初期設定を行った後はツールの指示に従って操作を行うだけで各種制御機能のパラメータ調整が完了するようにした。各種制御機能の正しい調整手順の決定や、調整する制御機能ごとに必要な各種自動設定機能の機能特性の設定切り替えと評価指標の選択、評価指標をサーボアンプから取得して制御機能のパラメータ設定の適切性判断などをツールで自動化することで、従来の調整者による決定・選択・判断を不要とした。

具体的には、このサーボ調整の自動化は5つの調整ステップに分かれており、以下に各ステップの調整内容を説明する。

#### 〔1〕調整方針選択

サーボに求める指令応答特性や外乱抑圧特性の重視度を選択することで、この後のステップでサーボ調整を行う制御機能をツールが自動で選択する。これにより、調整者の制御理論に関する知識にかかわらず、調整が必要な制御機能を装置要求と装置特性に合わせて最適に選択することを可能とした。

#### 〔2〕負荷特性測定

モータに連結されている動作対象の負荷イナーシャや偏荷重、摩擦トルクなどの負荷特性を自動で測定し、これら負荷特性を補償する制御機能の調整パラメータを自動設定する。負荷特性の測定に必要な動作指令をサーボアンプで自動生成することで、精度の良い負荷特性の測定を可能とした。また、ツールのボタン操作でモータを動作させて動作対象の可動範囲を事前に設定することで、動作対象が可動端に当たることを防いだ。

#### 〔3〕剛性測定

FB制御器の外乱抑圧特性の指標である剛性を上げながら、発生する振動を振動抑制フィルタ機能で抑えつつ、剛性をどこまで高めることができるかを自動で測定する。これにより、制御安定性が確保できる最高剛性を自動で導出するとともに、各剛性における振動抑制フィルタの最適なパラメータ調整を短時間でを行うことを可能とした。振動抑制フィルタ機能の調整パラメータは、後述する精度向上を行った適応フィルタ機能を用いて自動設定される。

#### 〔4〕指令応答測定

FF制御器の指令応答特性を変更し、位置決め時間や停止時振動のレベル、オーバーシュート量などの位置決め評価指標を自動で測定する。外乱抑圧特性と指令応答特性を複数組み合わせ合わせた測定パターンをツールが自動生成し、測定に伴うサーボアンプの自動設定機能の設定切り替えをツールが自動で行うことで、全測定パターンの位置決め評価指標を短時間で測定可能とした。

## 〔5〕 結果確認

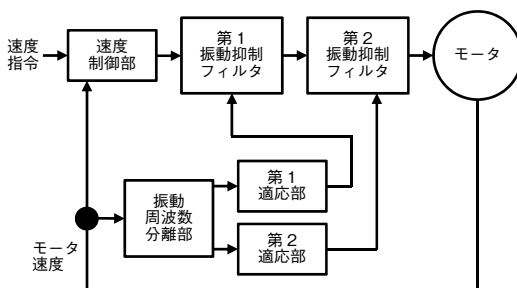
位置決め時間やオーバーシュート量などのサーボ調整の推奨設定を選択し、全測定パターンの中から推奨設定に合う測定パターンをツールが自動で導出して位置決め評価指標の測定結果を表示し、各種制御機能の調整パラメータを測定時に合わせて自動設定してサーボ調整を完了する。

以上5つの調整ステップによるサーボ調整の自動化により、装置の難易度や調整者のスキルに依存しない装置特性に合わせた各種制御機能の最適なパラメータ調整を、試行錯誤することなく簡単かつ短時間で行うことが可能となる。さらに、全測定パターンにおける位置決め評価指標の測定結果を示すことができ、目標とする位置決め時間を満たしつつ、より制御安定性の高いサーボ調整することも可能とした。

## 3.2 適応フィルタ機能の精度向上

適応フィルタ機能は、モータ速度から共振周波数をリアルタイムに推定し、共振振動を抑制する振動抑制フィルタの調整パラメータを自動設定する機能であり、サーボ自動調整で使用するには、モータ速度からいかに精度良く共振周波数を推定できるかが重要となる。従来の適応フィルタ機能[1]では、周波数帯域の振動成分を抽出する振動抽出部を2つ設けて、2つの適応フィルタが異なる共振周波数に対応するようにしていたが、2つの共振周波数が近い場合に1つの共振周波数として検出してしまっていた。

そこで、2つの振動抽出部を統合して振動周波数分離部とし、周波数分離アルゴリズムを改良することで、確実に2つの共振周波数を抽出できるように適応フィルタ機能の精度を向上した（第7図参照）。これにより、装置特性に依存せずに適応フィルタ機能を使用でき、サーボ自動調整での振動抑制フィルタの最適パラメータ調整を可能とした。



第7図 適応フィルタ機能の制御ブロック図

Fig. 7 Block diagram of new adaptive filter

## 3.3 サーボ自動調整の導入効果検証

開発したサーボ自動調整の効果を確認するため、従来のサーボ調整との比較を行った。その結果、サーボ調整の熟練者が半日～1日程度かけて調整していた装置を誰でも約10分程度で調整可能とするとともに、調整結果についてもサーボ調整の熟練者と同等レベルとすることができた。これにより、サーボ自動調整の高いユーザビリティが確認できた。

## 4. まとめ

本稿では、ACサーボアンプに搭載する高速・高精度位置決め制御技術の開発として、当社独自構成の2自由度制御と、サーボ自動調整について述べた。

上記技術が採用されている最新機種においては、位置決め時間を従来比1/10以下に短縮し、停止時振動を1/3以下に抑制する高速・高精度位置決めと、約10分程度で熟練者と同等レベルのサーボ調整結果が得られる簡単調整を可能とし、従来機種に対して大幅な性能向上を実現した。

ユーザーにおいては、タクトタイム短縮と位置決め精度向上、装置立ち上げ工数の短縮などが期待でき、適用可能なアプリケーションが拡大できると考えている。

今後は、産業用装置の性能向上に貢献すべく、制御技術とユーザビリティの向上をさらに進める予定である。

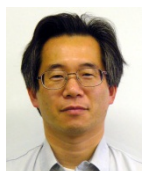
## 参考文献

- [1] 吉良嘉洋 他, "ACサーボシステムの技術開発," パナソニック技報, vol.55, no.3, pp.10-15, 2009.

## 執筆者紹介



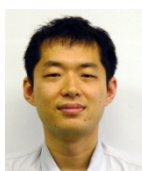
今田 裕介 Yusuke Imada  
アプライアンス社 モータ事業部  
Motor Business Div., Appliances Company



鈴木 健一 Kenichi Suzuki  
アプライアンス社 モータ事業部  
Motor Business Div., Appliances Company



園田 大輔 Daisuke Sonoda  
アプライアンス社 モータ事業部  
Motor Business Div., Appliances Company



藤原 弘 Hiroshi Fujiwara  
アプライアンス社 技術本部  
Corporate Engineering Div., Appliances Company