

# 機械端フィードバックによる汎用サーボの振動抑制技術

## 1. はじめに

汎用サーボシステム（以下、汎用サーボ）は、半導体製造装置や部品実装機などの産業用機械の駆動装置として組み込まれる機器であり、機械の高付加価値化や高生産性を実現するため、高速高精度な位置決め動作が要求される。これに応えるため、汎用サーボはさまざまな制御機能を搭載しているが、通常は、メカ技術者またはユーザ自身がこれら制御機能のゲインを設定し、制御仕様を満たす制御系を構築する。そのため、汎用サーボにおいては、高性能な制御機能の開発だけでなく、調整の容易性が極めて重要な要素となる。

## 2. 汎用サーボにおける最近の課題

産業界では、エンコーダ情報のみをフィードバックするセミクロズド制御が広く採用されており、摩擦など外

乱に対する感度を低減し、高精度な位置決め動作を実現するには、制御ループのゲインを高く設定する必要がある。しかし、加減速駆動の高速化が進展する一方で、軽量化や低コスト化への圧力が強まる現在、機械剛性を向上させるには限界がある。そのため、機械共振に起因した振動が問題となり、制御ループゲインを十分大きくできず、位置決め動作への妨げとなる場合がある。よって、機械振動を励起させることなく、いかに外乱に対する感度を低減するかが汎用サーボにおける重要な課題となっている。

## 3. 現在までの研究

従来より、H<sub>∞</sub>制御やオブザーバを応用した方式などフィードバック制御による機械振動を抑制する方式が多く提案されている。しかし、振動周波数が低い場合は、フィードバック制御のみで振動抑制と感度低減を両立するのは困難である。実際には、フィードフォワード制御を組み合わせた2自由度制御を構成し、フィードバック制御のハイゲイン化により低感度化を実現し、機械特性を考慮してフィードフォワード的に振動を抑制する方式が採用されている。しかしながら、モデル化誤差や外乱により励起される機械振動などを考慮すると、フィードバック制御により制振効果を向上させることも重要となる<sup>(1)(2)</sup>。

本稿では、エンコーダ情報だけでなく、機械端の加速度をフィードバックする制御系を考え、フィードバック制御による低感度化および振動抑制を実現する振動抑制技術について簡単に紹介する<sup>(1)</sup>。

## 4. 機械端フィードバックを用いた振動抑制技術

2慣性系で近似できる制御対象に対し、図1に示すセミクロズド制御方式を適用する場合を考える。このとき、モータトルク $\tau_m$ の箇所（図1中の×印）で制御ループを切り開いたときの開ループ伝達関数には、制御対象の零点（反共振零点）と制御器の零点がそのまま現れ、図2の点線に示すように、その周波数応答は、反共振周波数でゲインが小さくなる。

開ループ伝達関数の周波数応答は図2の点線となる。開ループ伝達関数には制御対象の零点（反共振零点）と制御器の零点がそのまま現れる。制御器の零点は位置および速度制御ゲインにより直接的に指定し、これら零点を開ループ交差周波数に応じて変更することで直感的なハイゲイン化が可能となる。しかし、セミクロズド制御方式は制御対象の反共振零点を変更する自由度を持たないため、ハイゲインにすると開ループ極の一部が減衰の悪い反

共振零点に近づくため制御対象の振動特性は劣化することになる。

セミクロズド制御に機械端の情報をフィードバックするループを追加すると、全状態フィードバック制御が可能となり、フィードバック制御による積極的な振動抑制を行うことができる。これは、開ループの反共振周波数とその減衰も自由に設定できることを意味する。しかし、極配置のように閉ループ特性を指標とする設計手法を用いると、ロバスト安定性が低い制御器が設計される、あるいは振動的な制御対象における制御系の応答と極配置との対応が把握しづらくなるなど、セミクロズド制御からの連続的な調整が失われることになる。

著者らが提案する加速度フィードバック制御方式を図3に示す。提案方式は、図2の実線に示すように、開ループ周波数応答の反共振減衰のみを変更するよう制御器を簡易的に構成している。開ループの反共振周波数を変更することはできないものの、セミクロズド制御と同様に制御器で付加する零点を位置および速度制御ゲインで直接的に指定するとともに、新たに追加したゲイン $k_a$ のみを調整することで開ループ零点を制御対象の反共振零点から変化させることで振動抑制を実現するものである。ゲイン $k_a$ を0から徐々に大きくするだけの簡単な調整で、セミクロズド制御のゲインを変更することなく制御対象の振動特性を改善する方向へ変化させるため、モデル化誤差に対するロバスト安定性と振動抑制とのトレードオフを考慮した調整も容易に実施できる。

図4は、本稿で述べた制御方式を位置決め制御に適用した結果である。ここでは機械系を剛体として模擬した規範モデル制御による2自由度制御を用いている。同図より、停止時近傍での機械振動を抑制できていることが確認できる。

## 5. おわりに

本稿では、機械端加速度フィードバックを用いた振動抑制について紹介した。今後も汎用サーボにおいて、簡単かつ高性能な制御性能の開発に取り組む予定である。

（原稿受付 2010年8月24日）

〔池田英俊、丸下貴弘 三菱電機（株）〕

## ●文献

- (1) Marushita, Y., ほか, Vibration Suppression Control using the Load-side Acceleration Feedback, *The 33rd Annual Conference of IECON* (2007), 810.
- (2) 山元純文・ほか, テーブル間干渉を有するシステムに対する負荷端加速度フィードバック制御, 電気学会産業計測研究会資料, IIC-09-95 (2009).

