

## 解説2

位置決め用アクチュエータの精密制御  
—高精度化のための補償器とその効果

豊橋技術科学大学 佐藤 海二\*

\*さとう かいじ：機械工学系 教授

## はじめに

運動機構の問題の多くは、アクチュエータ特性を含めた機械特性に起因する。機械特性は、構造・原理によってほぼ決まってしまう、ほかの問題を生じることなく根本的に除くことはできない。以前は機構全体で問題を抑制することが行われてきたが、コスト増につながるため、許容されなくなっている。そのため、コントローラへの期待は大きくなっている。コントローラの役割は、機構特性を十分活用して高い性能を実現することであり、機械特性を正しく理解し、効果的な制御方法を利用することが重要である。近年は、情報機器の高性能化、低コスト化が進み、非線形補償器でも組込みが比較的容易になっている。

一方で、それを利かせるかは設計者に依存する。必要とする知識や労力が増加すれば作業者は制限され、結局コスト増につながってしまう。近年、位置・運動制御を必要とするシステムの活用の場が広がっており、制御系設計の専門家でなくても簡単に機構特性の問題を解決し、高精度制御系が設計できることが望まれる。そのためには、問題の性質と補償器の構成と役割の基礎をよく理解し、現在の情報機器の性能の高さを利用して、わかりやすい補償器を適切に配置することが効果的である。

本稿では、設計が容易な補償器を利用するフィードバック制御系を軸に、精度劣化要因の悪影響を抑制する補償器とその配置、合わせた効果について紹介する。まず誤差要因の性質と発生場所による影響の違いについて述べ、次に補償器の配置

について説明する。その後、異なるアクチュエータを用いた機構の精密制御のための補償器配置とその効果を紹介する。

## 誤差要因の性質と発生場所

性能を劣化させる代表的な機械特性としては、摩擦特性や不感帯、ヒステリシス特性や飽和特性などの非線形特性や、振動要素や無駄時間、遅れ特性などの振動抑制を妨げる特性があげられる。非線形特性のうち、摩擦特性や不感帯は、作用する力を急峻に変化させるため起振力となり、それらの悪影響を汎用的な線形補償器で抑制するのは難しい。さらに振動抑制を妨げる特性も併せもっていれば、非連続的な振動や高周波数成分を含む振動が発生する可能性が増え、抑制が難しい。

先に述べた性能劣化特性は、さまざまな機械要素で発生し、アクチュエータのドライバーでも生じる特性がある。これらの特性の悪影響の度合いは、その特性が生じている場所によって異なってくる。不感帯に加え振動抑制を妨げる特性は、駆動信号から制御対象までの信号が伝達される流れの中に直列に特性がある場合、すなわち、その特性が駆動信号を直接改変し、劣化させる場合に、最も悪影響を引き起こしやすい。したがって、アクチュエータや動力伝達要素に含まれるこれら特性の影響は特に大きい。図1は、駆動装置に作用するさまざまな性能劣化特性と発生場所を示している。摩擦特性や不感帯は、そのような配置でなくても劣化させる影響が大きく、軸受・案内でも

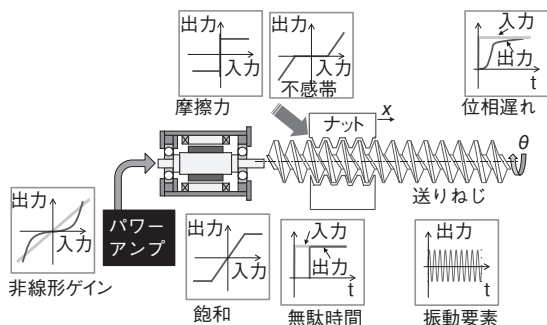


図1 駆動装置の性能劣化要因

問題となる。軸受・案内にある振動要素の影響は、駆動装置の性能に大きく依存する。

## 補償器の配置と役割

### 1. 補償器の基本配置

制御系設計では、まず機械全体の特性を考慮して補償器の配置が行われる。精密制御でも同様である。線形系であれば、2組の補償器を配置して制御系設計を行うことになる。図2は、その代表的な配置である。理論上は同様の特性をもつ複数の配置が存在する<sup>1)</sup>。図2のコントローラは、直列補償器とフィードフォワード補償器より構成され、その役割と構成は次のとおりである。

#### (1) 直列補償器

図2の直列補償器  $C_1$  は、制御系の主補償器で、制御系の安定性やロバスト性といった基本特性を決めるために調整される。多くの場合、PID要素あるいはその一部が利用されている。古典制御以降に登場した、外乱オブザーバを用いた外乱抑制制御やスライディングモード制御などもPID要素が用いられる。ただし、非線形特性や高次の特性の補償は難しいため、後述のように、それらの問題となる特性に合わせた補償器が追加される。

#### (2) フィードフォワード補償器

フィードフォワード補償器は、高い応答性が要求される問題の解決のために有効かつ必要である。図2の  $F_1$  が該当する。直列補償器はフィードバックループ内にあるため、高い応答性が期待できない。フィードフォワード補償器の構成として、

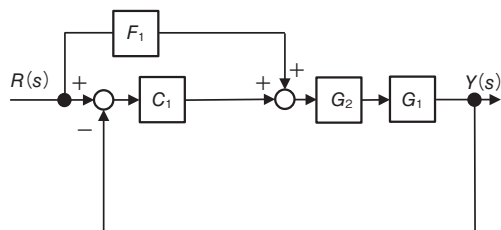


図2 制御系の基本構成

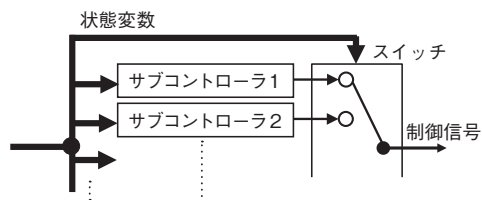


図3 構造可変型コントローラの構成

[対象の逆モデル+ローパスフィルタ] が効果的で、一般に用いられる。目標値追従性が比較的良好な制御系の場合、位置依存性の誤差補償器の入力として目標値を利用すると、速やかな誤差除去が可能になる。アクチュエータなどの遅れが問題となる場合、未来の目標値を利用して補償器の出力を求める場合もある。一方でモデル誤差に敏感であるため、直列補償器に対し、高い誤差抑制特性が求められる。

### 2. 精密制御のための補償器と配置

精密制御では、機構やデバイスの微視的特性が、しばしば大きな影響を与える。微視的領域では、巨視的領域とは異なる特性を示すことがあり、通常モデル化されない。そのため上記の補償器の設計で十分考慮されない。想定されない動作に対しては、アクチュエータ/機構の本来の応答性の高さに頼ることになる。高速なアクチュエータと高速サンプリングの組合せは、微小振動を抑制するのに効果的であるが、その性能には限界がある。そこで問題になる特性の影響を抑制・除去する専用の補償器が設計・利用される。

その方法は、大きく2種類である。一つは図3に示すように、動作領域に合わせて切り替える可変構造型コントローラを利用する方法であり、もう一つは、図4に示すように、従来の制御系に性能劣化特性をキャンセルする専用の補償器を追加