

解説3 位置決め機構のための精密制御系の構成と効果－補償器の役割と事例

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

運動システムの性能は、機構とコントローラの特性的影響を大きく受ける。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、情報処理デバイスの高性能化、低コスト化が進み、非線形補償器を含めた多様な補償器の組み込みが可能になっている。一方で、必要とする知識や労力の増加が設計者・管理者の負担を増やしていることは変わらない。近年、位置・運動制御を必要とするシステムの活用場が広がっており、その設計・調整を容易にし、設計者・管理者の負担を減らすこと、誰でも利用できることが強く望まれている。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活かし、わかりやすい補償器を適切に

配置することが重要である。

本稿では、その基礎となる知見として、まず誤差の発生経過を定性的に説明し、次に補償器の配置と役割の関係を説明する。その後、設計・調整の容易な方法を実例とともに紹介する。

コントローラの基本的な振る舞いと誤差要因

フィードバックコントローラは、検出された偏差から出力信号を導出し偏差の抑制・除去を図る。出力の後、次に偏差を測定するまでに、出力信号による影響や運動エネルギーの効果といった過渡特性、さらには予期しない外乱力など環境の影響により、機構の運動は変化する。そのためそれらを適切に考慮されるか否かによって、性能が左右される。アクチュエータ/機構の応答性が良ければ出力の効果はすぐ反映され、さらに制御周波数が高ければ状態量の変化は小さく、予測値からのずれも小さくなる。よって高応答アクチュエータで高い制御周波数で動作させれば、簡単なコントローラでも精度向上が可能である。むしろ機構特性に関する詳細情報を必要とする複雑で遅れを含むコントローラでは、良い結果が得られないことがある。問題は、無視できない遅れが、不明確で複雑な特性によって生じる場合である。

性能を劣化させる代表的な特性には、摩擦特性や不感帯、高周波振動、無駄時間や遅れ特性があり、ヒステリシス特性や飽和特性、非線形ゲインもしばしば特性劣化要因として挙げられる(図1)。前の5種類の特性で共通するのは、挙動が急峻に

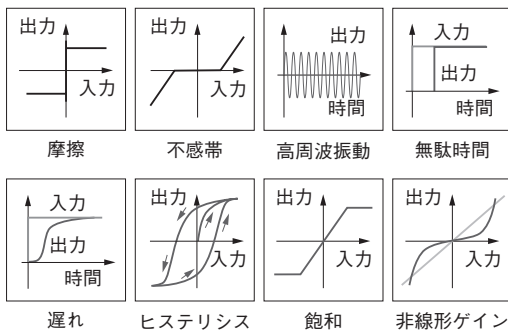


図1 運動システムの性能劣化要因

変化して適切な出力ができない、あるいは出力信号に対する反応が鈍いため期待しない時点で効果が現れることである。そのような特性は、挙動を予測し補償する必要がある。通常は力学モデルが用いられるが、変動が急峻あるいは遅れが顕著であると、モデルに正確性が求められ、実現が難しくなる。中には時間経過とともに変動する特性もあり、過渡な正確性の追求は現実的でない。したがって、変化の急峻な変動や遅れの激しい特性を大まかに補償できる補償器と、汎用性の高い補償器を組み合わせるのが良い。

補償器の配置と役割

補償器の効果はその構造はもちろん、配置によっても大きく変化する。図2は制御系の構成例を示している。図2の制御系は多くの補償器を含んでいるが、大きく4種類に分けられる。すなわち、制御対象に直列に配置される直列補償器、フィードバックループに配置されるフィードバック補償器、フィードフォワード補償器、目標値信号を成形するプリフィルタである。以降では、図2を基礎にそれぞれの配置と役割について説明する。

(1) 直列補償器

図2の C_1 、 C_2 が該当する。 C_1 は制御系の主補償器で、機構の応答性を向上す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最適制御、スライディングモード制御、外乱オブザーバを用いた外乱抑制制御においても、PID要素がよく用いられる。フィードバック制御系の一部としてのPID要素は、汎用的な補償器である。 C_2 は特定の問題を除くための補償器である。不感帯や非線形ゲインの悪影響の除去や、特定の共振振動の抑制・除去、遅れ特性の改善のために、この位置に適切な補償器が配置されることが多い。問題と補償器特性が直結しているため、設計は比較的容易である。ただし、逆モデルの組込みと同じでモデル誤差の影響は現れやすい。

(2) フィードバック補償器

図2の H_1 、 H_2 が該当する。フィードバックループ

への配置は、振動や外乱抑制といった望まれない動作を抑制するためになされる。 H_1 は機構の振動特性を低減するための配置を想定しており、微分器や2重微分器を用いた要素が利用される。フィードバックループへ配置することで、直列補償器と比較して、目標値追従性への影響を抑えて振動を抑制することが可能になる。規範モデルの応答に対する実機応答のずれを補償する補償器は、 H_2 に配置される。その代表的な要素が外乱オブザーバである。規範モデルの応答が実際の機構で十分追従可能であれば、未知の外乱力やモデル誤差があっても効果的な抑制が期待できる。しかしフィードバック信号を用い、ノイズ抑制も必要となるため、高い周波数成分を持つ外乱力やモデル誤差を抑制するには不向きで、十分な効果が得られないことがある。

(3) フィードフォワード補償器

問題となる特性の応答が速い場合や制御系に高い応答性が求められる場合は、フィードバックループを伴わない補償器が利用され、図2の F_1 が該当する。上記(1)(2)の補償器配置では、フィードバックループのために高い応答性が期待できない。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。目標値追従性の向上には(対象の逆モデル+ローパスフィルタ)が一般に用いられる。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、上記(1)(2)の補償器を設計する際には、高い誤差抑制特性が求められる。

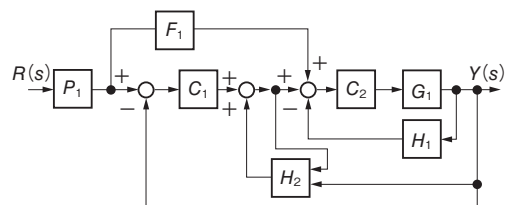


図2 運動システムの性能劣化要因

(4) プリフィルタの効果

高い運動性能をもつ制御系では、ステップ波形が入力されると、その高い応答性のためオーバーシュートが発生し、振動的になることがある。高い運動応答性とオーバーシュートが抑制されたステップ応答を両立した精密位置決め/精密運動を実現するために、図2の P_1 に高周波成分を除くフィルタを配置することが行われている。 P_1 の役割は、最初の立ち上がり時のみのオーバーシュートを抑制するためローパスフィルタが利用されることがあり、その効果は実証されている¹⁾²⁾。

事例1ー 電磁モータをアクチュエータとして含むボールねじ機構の制御

ボールねじ機構を用いて、超精密位置決め/精密運動を容易に実現する方法を紹介する。図3は、制御対象として利用したボールねじ機構の写真である。リード2 mm/revのボールねじが、アクチュエータである電磁回転モータに高剛性カップリングで結合され、回転運動を直線運動に変換する。案内としてリニアボールガイドが設置されている。テーブル質量は3.57 kgである。モータはPWM電流アンプにより駆動される。電磁モータは応答性が高く、PWM電流アンプを用いているため、インダクタンスに起因する遅れも無視される。出力電圧・電流の飽和特性のため、最大加速度、最大速度は制限されるが、制御周波数は5 kHzと短く、コントローラ出力の応答性の問題は無視できる。しかし摩擦特性、飽和特性の影響を顕著に受ける。

この機構に著者が提案しているNominal Characteristic Trajectory Following (NCTF) 制御³⁾⁻⁵⁾を適用した制御系を図4に示す。コントローラは、

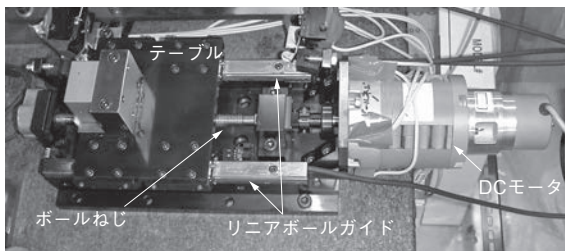


図3 制御対象として用いたボールねじ機構¹²⁾

規範となり位相面上に記述される規範特性軌跡(NCT)とその軌跡に制御対象の動作を合わせるための補償器(ここではPI要素)から構成される。NCTは機構の減速時の応答波形から直接得られるため簡単に構成でき、特性劣化要因となる非線形性も反映した追従可能な軌跡となる。補償器は、定常状態での残留振動を基礎に、簡単に決定できる。NCTは性能劣化要因となる特性の結果であり、間接的にその影響を補償させる役割を持つ。そしてその先に汎用性のある補償器が設置されている。ブロック線図では直列補償器のみに見えるが、限定的な非線形2自由度制御系になっている。飽和特性などの非線形性が考慮され、目標値に近い領域で高ゲイン化できるため、高精度な制御が可能である。

図5は適用結果の例で、高さ1 mmのステップ応答を示している。振動的な挙動を示さず、定常誤差5 nm以下の超精密位置決めが実現されている。

事例2ー 超高加速・高速コア付き電磁リニアモータの制御⁶⁾⁷⁾

コア付き電磁リニアモータは、大推力・高加速を必要とする機構の代表的なアクチュエータになっている。図6は加速度・速度性能の極限を追求した超高加速・高速リニアモータの写真である。両側にコア付き電磁石固定子が配置された永久磁石可動式リニア同期型モータで、ボールガイドで支持されている。このモータは3,000 Nを超える推力を発生できる一方で、大きなインダクタンス

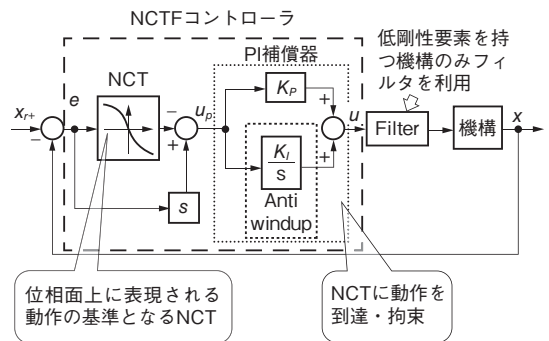


図4 連続運動用 NCTF 制御系の構成