

## 「波動歯車装置を内在する位置決め機構に対する高速高精度制御系設計の研究と製品開発」にまつわる話

名古屋工業大学 岩崎 誠 (株)ハーモニック・ドライブ・システムズ 山元純文, 沖津良史

### 1. はじめに

波動歯車装置を内在した位置決め機構を有するさまざまな産業用機器には、一般に高い加工生産性や高精度性が要求されるため、各種非線形要素の補償、機構振動の抑制、機械設置環境・製品個体差や経年・経時変化による特性変動や外乱に対するロバスト性能を具備した高速高精度制御系の構築が必須である。本研究開発による製品実用化に際しては、モータ・ドライバの高トルク化や小型化の実現のみならず、精密モデルベースのフィードフォワード（以下、FF）補償や適応・ロバスト制御によって、多様な要求制御仕様の満足を目指している。さらに、オートチューニング機能を導入することで、サーボパラメータ調整に対する省力化と調整者間のばらつき低減、操作性・メンテナンス性の向上なども実現させている（具体的な研究開発項目は、グラビアページの図1を参照されたい）。

ここでは、本研究開発に至る精密位置決め制御に関する筆者の想いと、精密位置決めを実現する制御技術の展開について紹介したい。

### 2. 精密位置決めとの出会い

筆者の岩崎は、大学院の研究テーマとして誘導電動機のベクトル制御、すなわち「パワーエレクトロニクス」「モータ制御」を選び、その後大学に奉職するころから「メカトロニクス」「運動制御」に教育・研究の軸足を置いてきた。そのため、主に電気学会を活動の場としてきたが、当時の講演会や技術委員会では、外乱推定と補償、共振振動系のモデル化と制振制御な

ど、ロバスト制御や適応制御などの制御工学に基づくフィードバック（以下、FB）制御による手法が多く議論されていた。そんな折に、精密工学会の講習会（第180回講習会「最近の精密位置決め技術」平成3年11月15日）を受講する機会を得た。それまでは、上述のようにFB制御ありきで運動制御系を捉えていた筆者にとって、講習会のメニューで初めて出会った位置決め要素技術は機械・機構の学理に即したもので、電気工学を学んできた者にとって極めて新鮮であった。中でも、後の精密位置決めに関する研究活動に影響を与えてくれたキーワードとして、「粗微動位置決め」「ボールねじ微小変位特性」「パワースペクトラム分布によるコマンドシェーピング（以下、CS）」が挙げられ、特にモデルベースのFF制御やCSには、機構振動と制振に対する物理的な原理原則を見て、大きな可能性を感じた。そこで、モデルマッチングFF補償器設計や、共振フィルタ併用による加減速時間に着目したCSなどに取り組んだ。そのころの想いはその後の研究に続き、既約分解表現や終端状態制御などを併用した2自由度制御系の設計、外乱・摩擦補償、切り替え制御や初期値補償、モデル化や最適化などを深く追求することとなった。

そうこうしているうちに、再び講習会（第218回講習会「これからの精密位置決め技術」平成7年10月17日）を受講した。その中で、電子部品実装機に関わる高速高精度位置決め制御の具体的なスペックを拝聴し、驚愕した。それは、「どう考えてもFB制御帯域では整定時間の達成は無理」と考えざるを得ないものであった。そこ

で、

- ・応答性はFFで、ロバスト安定性はFBで（至極当たり前）、FFはCSも含めていろいろなアプローチがありそうだ、モード切り替えで整定性を良くしよう、初期値の問題も解決しなければ、
- ・FFにしてもFBにしても、設計に精密モデルが要るだろう、モデル化技術（線形・非線形要素）を極めることが肝要だ、そこではいろいろな最適化技術が適用可能だろう、
- ・モデル化誤差や環境・経時変化がFF特性を劣化させてしまうから、適応的に対応させよう、オートチューニング機能も有望だろう、
- ・振動を抑制しながら位置決めさせる必要があるから、共振周波数成分を落としながら、指定の時間で到達するCSを考えよう、さらに制振しやすい機構系もありそうだから設計につなげよう、

こんな想いを悶々と巡らせ続けながら、次章で紹介する制御技術を、減速機、電子部品加工機、半導体・液晶製造用ステージ、産業用ロボット、自動車部品などさまざまなメーカーとの産学連携共同研究を推進しながら開発していった。

### 3. 精密位置決め制御と要素技術

位置決め制御系設計の研究を進める中で、超精密位置決めにおけるアンケート調査（『精密工学会誌』2008年10月号）を拝見した。そこでは、“超精密位置決めとは？”の問いや、超精密の理由や限界要因分析、多様で変化に富む位置決め要求仕様などに言及されていた。これらの要求や仕様に対し、機械がもつ運動精度能力を限界まで引

き出してさらなる高速高精度性を追求し、かつ設置環境条件や外力にも左右されない超精密位置決めを実現するためには、「機械構造体+センサ+制御」を統合したシステムとして、“制御技術との合わせ技が必須である”とのことだった。これらは、現在でも十分通用する課題とアプローチであろう。

それでは、与えられた機械システム（制御対象）がもつ運動精度を最大限引き出すために、位置決め制御技術が提供すべき点は何であろうか？ それは、前述の課題を大まかに集約して、「高速高精度かつ外乱や機構変動にロバストな位置決め制御系を構築する」ことであり、制御工学の観点からは「FB制御ゲインを大きく選んで応答帯域を拡大する」ことが本質である。しかし、機構振動や制御系のむだ時間などの阻害要因がシステムの不安定化や精度劣化を引き起こすため、応答帯域拡大の実現は一般に容易でない。それを可能とするアプローチの一つに、制御対象の特性を積極的に利用したFF制御を付加する「2自由度制御系」の導入が挙げられる。

図1は、本研究開発で扱った波動歯車装置を内在する位置決め機構をはじめ、筆者がさまざまなメカトロニクス機器の位置決め制御系に適用してきた2自由度制御系の構成図で、各コンポーネントの役割・効果を併記したものである<sup>1)</sup>。2自由度制御は、センサ情報を使ったFB制御によりシステムの安定化やロバスト化を図り、FF制御によって高速応答性を担保するものである。その結果、機構振動の抑制、外乱の抑圧、機構や環境変動の影響を排除、応答のばらつき抑制による位置決め精度の平準化など、前述の課題を幅広く解決して所望の位置決め仕様を満足可能とする。この制御系の設計に際して極めて重要な準備は、機構や外乱を含む制御対象の精密モデル（高精度シミュレータ）を獲得することである。本研究開発では、波動歯車装置に固有の摩擦・ばね特性・角度伝達誤差を含む線形・非線形要素に対する精密モデル・シミュレータの構築が、所望の制御仕様を満足する位置決め制御系

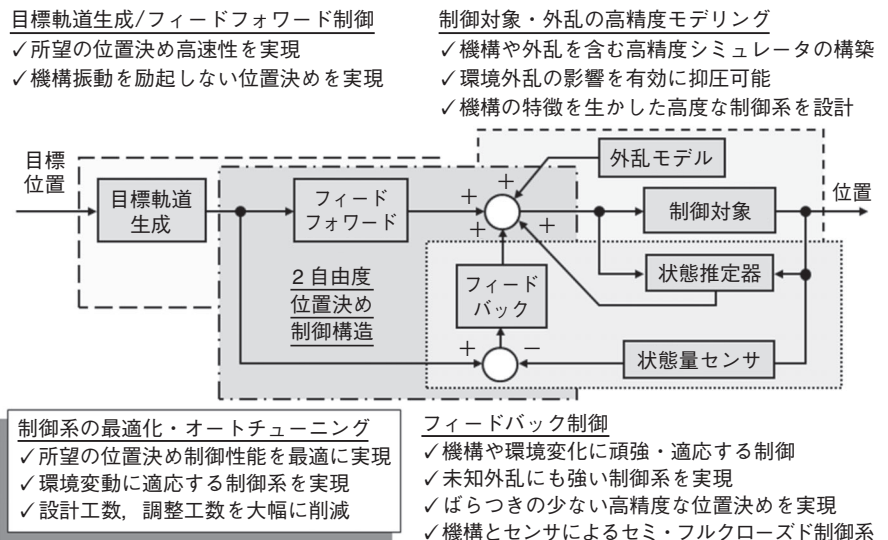


図1 高速高精度位置決めを実現する2自由度制御系の構成概念とその目的

設計において極めて重要であった。そのような対象機器に対する精密モデルを用いれば、稼働部重量や姿勢の変化、周囲温度変動、経年変化、製品間特性ばらつきや、設置床面など周囲環境からの外乱に対して、ロバストまたは適応可能なFB制御を制御工学に即して設計可能である。一方、所望の目標位置に対するCSやFF制御は、精密モデルを積極的に利用することで所望の高速性を保証し、かつ機構振動を励起しない高精度な位置決めを実現する。筆者らの研究では、駆動アクチュエータの制約（トルクや推力制限など）、設置床面との連成振動、摩擦などの外乱の影響、駆動音などを最小限のレベルに抑えるロバストな目標軌道生成法を開発し、さまざまな実製品への搭載も検討してきた。この軌道生成法はさらに、「所望の位置決め性能を達成するために、最適な機械構造はどうあるべきか？」を提示する発展性も秘めている。

#### 4. おわりに

わが国の精密加工機械は、その精度、生産性、信頼性共に現在世界トップレベルにあることは間違いないが、一方で、後発の新興国メーカーの競争力アップも目覚ましい。今後も現状の地位を維持するためにも、高付加価値かつ低価格な製品の開発によるさらなる競争力向上が望まれよう。位置決め制

御技術に対するソリューションとしては、制御系の最適化やオートチューニング技術が実用性の観点からも有望である。筆者らは以前より、適応同定理論や遺伝的アルゴリズムなどを適用したオートチューニング技術を開発し、前述の精密モデリング、制御系設計と制御パラメータの調整などを、工場出荷時や機械設置現場で自動的に行い、設計工数や調整工数の大幅な削減を実現してきた。これらの技術は、省力化や製品・製造コスト減にダイレクトにつながり、競争力の高い製品づくりに大きく寄与するものである。

#### 謝 辞

本技術に関わる研究および製品開発は、長期かつ密な産学連携共同研究活動による、実践的な産業応用に資するものです。研究に携わった大学研究室の歴代学生や多くの会社関係者にご尽力をいただきました。一方、本文中で紹介した精密工学会の講習会などは、筆者の研究活動に大きなインパクトを与えていただき、その資料を事あるごとにバイブルのごとく拝見しています。この場をお借りして深く感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

1) M. Iwasaki et al.:IEEE Industrial Electronics Magazine, 6, 1 (2012) 32-40.