# モータドライブの制御系解析によるロバスト性能の向上



## Improved Robustness through Analysis of the Motor Drive Control System

金子　貴之 Takayuki Kaneko　　櫻井　賢彦 Masahiko Sakurai　　松本　康 Yasushi Matsumoto

ドライブ制御機器の性能解析を行うことは，市場要求にあった製品提供と，最適な制御パラメータ調整などの観点から重要である。富士電機ではモータドライブにおけるロバスト性能評価として，機械モデルと制御シミュレーションの連携解析を行っている。例えば，サーボモータで動作するテーブル駆動系について，SimulationX を使って機構部をモデル化し，MATLAB/Simulink による制御モデルに組み込んで連携解析を行った。周波数特性や過渡応答を実機と比較したところ，シミュレーション結果と実機特性のよい一致が確認できた。

Analysis of the performance of drive control devices is important from the standpoint of providing products that satisfy market needs and for adjusting control parameters to their optimal values. At Fuji Electric, analyses are performed by combining mechanical models generated from CAD data with control system simulations. For example, in the case of a table drive system operated by a servo motor, the mechanical portion is modeled using SimulationX, and then a combined analysis is performed by incorporating that mechanical model into a control model based on MATLAB/Simulink. The frequency characteristics and transient response were compared to those of an actual motor, and the simulation results were verified to be in close agreement with the actual motor characteristics.

## 1　まえがき

汎用インバータやサーボシステムなどのドライブ制御機器は，機械や設備のオートメーション化，省エネルギー化に貢献しながら発展し，今日に至っている。適用分野の拡大に伴い，ドライブ制御機器単体としての性能の向上，小型化，低価格化が進められてきた。

汎用インバータ分野では，搭載するマイクロプロセッサの低価格化，高性能化に伴い，低価格のインバータにおいてもベクトル制御などの高度な制御機能が搭載できるようになってきている。モータのベクトル制御では，トルク制御精度や周波数応答性能が向上した。その影響から，これまで機械の共振周波数よりも応答周波数が低く大きな問題とはなっていなかった機械系への振動対策に関する技術が注目されつつある。[(1),(2)]

一方，サーボシステムはモータドライブという概念にとどまることなく，“機械の最適なモーション制御”を実現するシステム機器の概念へと移行しつつある。このため，安定な制御を実現するための機械共振特性の解析機能や低周波数の機械振動をサーボ制御により抑制する“制振制御”などが標準搭載されるようになった。制御全体の応答を損ねることなく，振動成分のみを抑制できる機能として，常時トルク振動を監視し，振動周波数を自動的に抽出し抑制する“オートノッチフィルタ”なども搭載されるようになった。これらの機能・性能を搭載しながらも，モータやアンプの小型化による機械のコンパクト化も進んでいる。

## 2　ドライブ制御における課題

こうしたドライブ制御機器の製品開発や，設置における制御パラメータ調整といったエンジニアリングにおいて，対象となる装置すべてを用意し，性能検証することは難しい。そのため，信頼性の高いシミュレーションにより装置を模擬し，制御対象のパラメータ変動も含めたロバスト性能解析を行うことはますます重要になってきている。

汎用サーボシステムでは，適用分野がロボットや工作機などから，半導体，液晶，電子部品製造などまでと幅広いため，これらすべての機械に対して，詳細な調査を実施し精密なモデルを作成することは難しい。また，時間を多く要するため，ある程度の経験から近似などを用いた簡単なモデルを作成し評価を行っている。しかし，簡単なモデルでの評価には限界がある。

これらの問題の解決のために，機械モデルを制御シミュレーションに正確に組み込んで連携解析において，パラメータ変動に対するロバスト解析を行えば，従来と比べて精度，信頼性の高いドライブ機器を提供することができる。本稿では，適用事例として，サーボシステムでの制御シミュレーション解析の取組みについて紹介する。

## 3　シミュレーション技術概要

サーボシステムにおける制御系の性能解析において，現在は MATLAB/Simulink[〈注1〉,〈注2〉] を使用し，制御および機械モデルの作成を行っている。機械モデルの作成においては，要素ブロックの数が多く煩雑であり，複雑化，多様化する機械に対して，MATLAB/Simulink により正確に機械モデルを作成し評価することは難しい。また，機械モデルを作成する際に，CAD（Computer Aided Design）データから機械モデルを作成し，MATLAB/Simulink と連携解析

〈注1〉MATLAB：米国 The MathWorks, Inc. の商標または登録商標
〈注2〉Simulink：米国 The MathWorks, Inc. の商標または登録商標

可能な機構系解析ソフトウェアが多く市販されている。しかし，これら機構系解析ソフトウェアを使用する場合，機構の詳細なデータが必要となることと，シミュレーションに要する時間が膨大になるため，制御系の性能解析を迅速に行うことが難しい。そこで今回は機械モデルの作成にSimulationX〈注3〉を新たに導入した。

SimulationXは，マルチドメイン物理モデリングソフトウェアであり，大規模な装置全体のモデルに関して，制御を含めたシステム全体の解析やサーボシステムを含めた装置全体の性能評価や機能評価が可能である。GUI環境にて各種物理モデルが用意されたライブラリから部品を選定して，ブロックダイヤグラムを組むことで簡単に取り扱うことができる。また，Modelica[3]言語に準拠したカスタマイズツールが用意されており，ライブラリも簡単に追加できる。MATLAB/Simulinkなど制御系解析ソフトとのインタフェースが用意されており，従来の開発資産とリンクして利用できる。過去に作成したMATLAB/Simulinkの制御モデルが活用でき，SimulationXにより作成した機械モデルと連携解析が可能となる。これにより，シミュレーション段階で制御構造や制御パラメータの妥当性評価やシステム全体での性能評価が迅速に行える。また，複雑化し続ける機械に対して，制御系を迅速に構築し，対応することが可能である。

今回採用した制御系解析ソフトウェア＋物理モデリングソフトウェアの特徴を明確にするために，制御系解析ソフトウェア，制御系解析ソフトウェア＋機構系解析ソフトウェア，制御系解析ソフトウェア＋物理モデリングソフトウェアによる解析時間，工数，モデル精度の特徴を**表1**に示す。

## 4　解析事例

今回，サーボシステムの制御技術開発において，SimulationXを使ってテーブル駆動系を物理モデル化し，それをMATLAB/Simulinkで作成した制御モデルに組み込み，連携解析を行うことで，サーボシステムの制御性能向上を図った事例について紹介する。

### 4.1　制御対象

**図1**に制御対象とするボールねじ機構を用いたテーブル駆動系の概略を示す。本機構は被駆動体（テーブル）と案内機構，ボールねじ軸，ナット，支持軸受，サーボモータおよびカップリングにより構成され，ねじ機構と転がり要素を組み合わせた構成となっている。動作原理は，サーボモータによりねじ軸が回転し，ナット部で回転運動が直線運動に変換され，直動案内されたテーブルが駆動する。また，機構の特徴としては，ボールねじの軸方向振動およびねじり振動に起因する二つの共振点を持っている。

### 4.2　解析モデル

この機械系の固有振動数は機械の設計パラメータにより変動する。今回テーブル駆動系をモデル化するに当たり，駆動機構は**図2**に示すような集中定数系のモデルとして扱い[4]，サーボモータとボールねじ軸をカップリングで結合するものとする。

### 4.3　実機との周波数特性比較

前途のテーブル駆動系を富士電機のサーボシステム「ALPHA5」に搭載されているサーボアナライズ機能（トルク加振することにより機械系の共振，反共振などの周波数特性を測定する機能）を使用し，周波数特性を測定した結果を**図3**に示す。SimulationXにより作成した機械モデルの周波数解析を行ったシミュレーション結果を**図4**に示す。実機およびシミュレーション結果の周波数特性におい

〈注3〉SimulationX：ドイツITI GmbHの商標または登録商標

表1　解析手法の比較

| | 解析時間 | 工　数 | モデル精度 |
|---|---|---|---|
| 制御系解析ソフトウェア | ◎ | △ | △ |
| 制御系解析ソフトウェア＋機構系解析ソフトウェア | △ | △ | ◎ |
| 制御系解析ソフトウェア＋物理系モデリングソフトウェア | ◎ | ◎ | ○ |

図1　ボールねじ機構を用いたテーブル駆動系

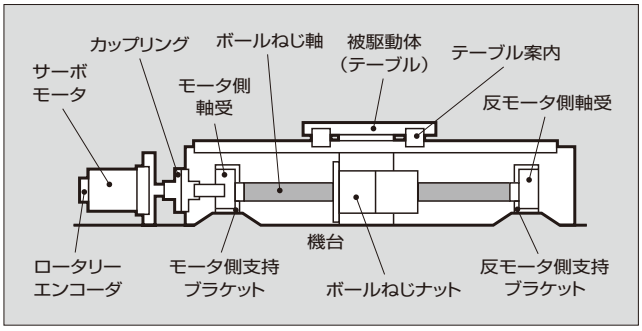
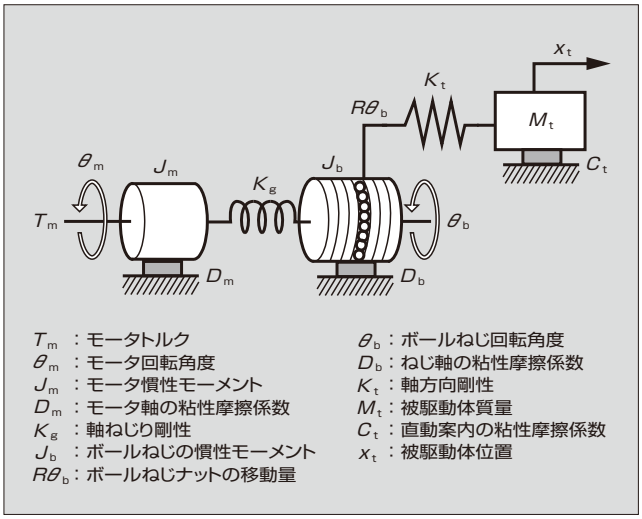



図2　対象の集中定数系モデル



て，高周波帯域に関しては，実機では今回シミュレーションモデルに組み込んでいないカップリングによる共振が現れている。低周波帯域および軸方向振動，ねじれ振動による共振点に関してはおおよそ一致しており，周波数特性に関する精度は良好であると考えられる。

### 4. 4　実機との過渡応答比較

**図 5** に実機の測定結果およびシミュレーションによる解析結果の比較を示す。実機のデータは，ALPHA5 により慣性推定および制御系のパラメータを自動調整できるイージーチューニング機能を使用した。負荷慣性比および位置制御系，速度制御系のゲイン，積分時定数などの制御パラメータを自動調整した結果を使用し，駆動パターンを指定することで自動運転が可能なパターン運転機能によりパターン運転を行い，パソコン上の操作支援ツールにより波形データを取得した。

シミュレーションデータは，MATLAB/Simulink により構成されている ALPHA5 の制御モデルに対して，SimulationX にて作成したボールねじ機構のモデルを組み込んだ。実機駆動時と同様の制御パラメータにより連携解析を実行し，波形データを取得した。実機の測定結果とシミュレーション結果は良好に一致しており，周波数解析および過渡解析での物理モデリングソフトウェアを用いた機械モデル作成および作成したモデルと制御系解析ソフトウェアとの連携解析の有用性が確認できた。

紹介したシミュレーション手段は，制御アルゴリズムの開発への適用のみならず，エンジニアリングに対しても適用が可能である。例として，顧客機械の概略を考慮したシミュレーションを実施することで，機械のパラメータ変動も考慮した，最適な制御パラメータを事前に検討することが可能となり，設置・調整の時間短縮および顧客機械のトータルな性能向上が期待できる。

図 3　実機の周波数特性

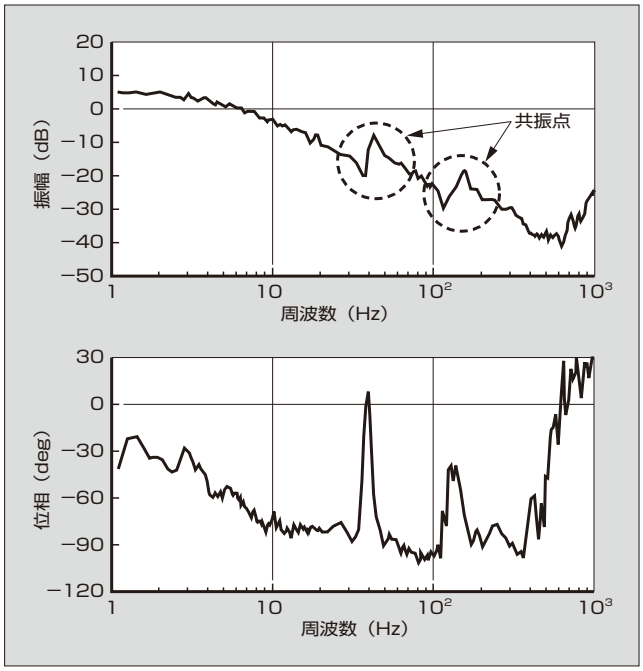



図 4　シミュレーションの周波数特性

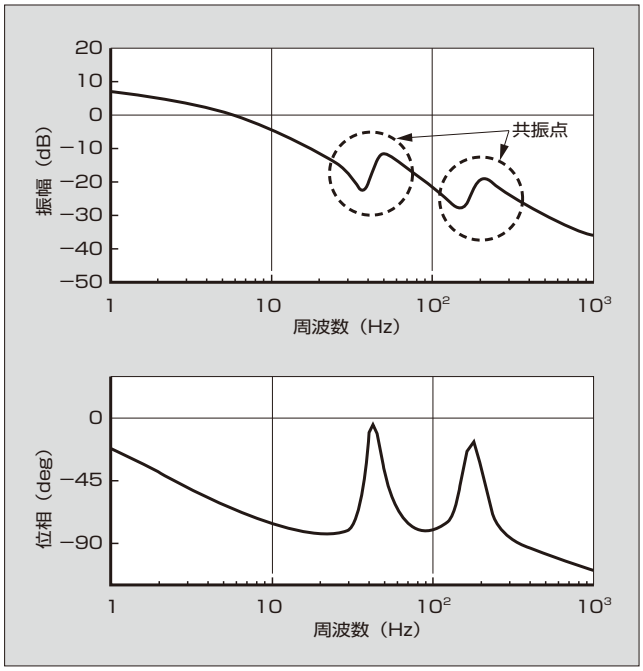
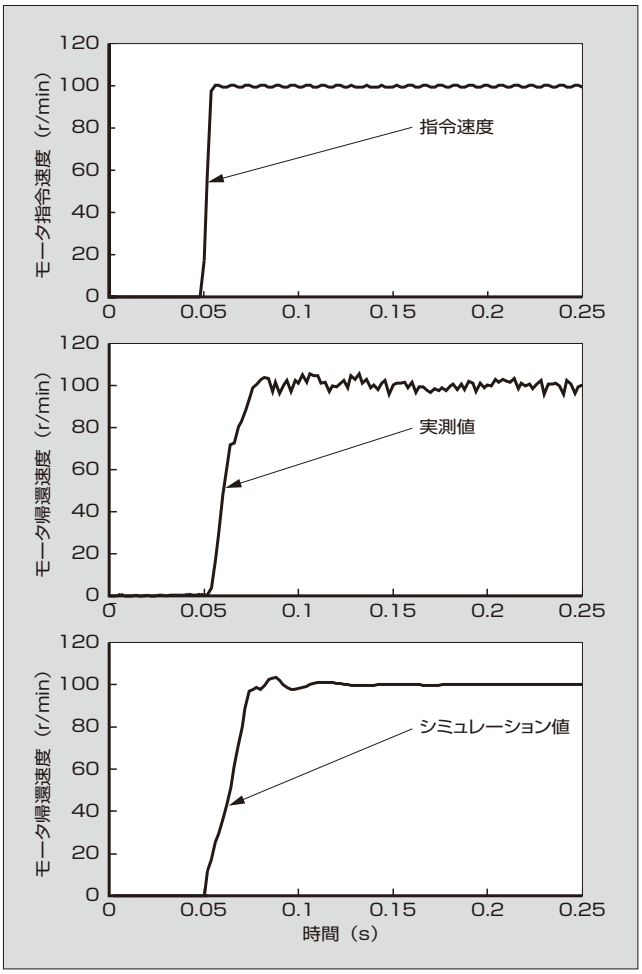



図 5　モータ速度波形



特集

## 5　あとがき

富士電機が取り組んでいるモータドライブ制御の制御系解析に新たにマルチドメイン物理モデリングソフトウェアを導入し，シミュレーションによる機械系のパラメータ変動に対する信頼性向上に取り組んだ事例について紹介した。今後，ますます多様化，複雑化するであろうモータドライブ分野に対して，信頼性の高いドライブ機器を提供していく所存である。

### 参考文献


(1)　吉田雅和ほか. ドライブ制御機器の現状と展望. 富士時報. 2007, vol.80, no.5, p.306-309.

(2)　吉田収志ほか. 高速・高精度を実現する制御系設計技術. 富士時報. 2004, vol.77, no.6, p.444-447.

(3)　Modelica 協会, http://www.modelica.org/,（参照 2009-03-23）.

(4)　松原厚. 精密位置決め・送り系設計のための制御工学. 森北出版, 2008, p.123-142.

**金子　貴之**

パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術センターパワエレ機器開発部。博士（工学）。電気学会会員。

**櫻井　賢彦**

パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術センターシステム機器開発部。電気学会会員。

**松本　　康**

パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術センター。パワエレ機器開発部長。博士（工学）。電気学会会員。IEEE 会員。

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。