

次世代のエレクトロニクスを作る

増刊

トランジスタ技術 SPECIAL

温度/位置/速度/力…外乱に強いフィードバック・システム作りと評価技術

高効率・高速応答! サーボ&ベクトル制御 実用設計

LTspice対応

渡辺 健芳 著

狙った獲物は
逃さない!
高精度追従 &
低損失ドライブ!



ご購入はこちら。
<http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSPZ201603.htm>

CD-ROM付属

〓 設計&動作確認済み 〓
LTspice製
回路ファイル100超!

CQ出版社

CQ出版社

見本

まえがき

「機械は見えるが、電気は見えない」

回路図は電子部品とそれら相互間の接続を描いた図であり、回路動作に関する情報を直接読み取ることはできません。また、動作中の電子機器を見ても回路動作そのものは見えません。

「サーボ・システムは直感的には、わかりにくい」

機械系であれ電気系であれ(見えても見えなくても)、いったん供給された出力が入力に戻り同じ経路をたどって再び出力される、言い換えれば同じループをぐるぐる回るというサーボ・システムの特長が、ほかの事象からの連想を許さず感覚的な理解を妨げます。

サーボ・システムの起源とされる、ワットの蒸気機関の調速機は1700年台後半に出現しました。しかし当初からその制御メカニズムが十分に解明されていたわけではなく、制御理論(古典制御理論)として確立されたのは1900年代前半でした。出現から確立までに100年以上を要したことから、解明が容易ではなかったことがうかがえます。

現在では回路理論もサーボ理論も、研究・開発・設計のための解析ツールとして利用することができ、解説書も数多く出版されています。動作やメカニズムを数式を使って解説する手法も多く見られますが、数式の理解に苦勞することもあります。さまざまな数式を日常的に扱うわけではない技術者にとっては、数式とは別に理解を深めるための手法も必要だと感じます。

本書は、サーボ制御およびブラシレス・モータのサーボ制御をテーマとしています。サーボ・システムの基本動作からスタートし、ブラシレス・モータの周波数・時間応答特性や駆動方法などを経て、これらの関連技術からベクトル制御までを解説します。

技術者は単に技術の理解だけではなく、扱うシステムにその技術を適用し、問題が発生すれば解決することも求められます。したがって、本書では理解とその後の設計を含めて考えます。

回路もサーボも、そのメカニズムをできるかぎりブロック図、特性図、波形などで示し、改善方向も図形的に考えるようにしています。とはいえ数式を使わないわけではなく、他の方法より適当であれば数式も使っています。その場合もできる限り四則演算にとどめ、微分方程式やラプラス演算式を持ち出すとしても、基本的なメカニズムを求めた後は結果のみを利用することとし、設計段階ではできるかぎり図的解法を意図しています。

本書では、CQ出版社から発売された「トラ技3相インバータ実験キット(INV-1TGKIT-A)」のブラシレス・モータを「基準モータ」としています。モータ駆動回路やモータ・サーボ・システムなどは、この基準モータの定数や動作条件をもとに設計しています。

視覚的、直感的に理解を深めるために、設計の検証やさまざまな検討の多くは、リニアテクノロジー社が無償で提供する回路シミュレータ「LTspice IV」で行っています。LTspiceの回路図は、一部のシンプルなものを除き、対応するブロック図も記載し、理解しやすいようにしました。LTspiceの使い方に関する詳細な解説は行っていないませんが、回路図作成ルール、解析結果の見方に関する概略情報を巻末のAppendixにまとめて記載しました。

本書で解析したLTspiceの回路図ファイルは付録CD-ROMに収録しています。本書では上記のように「基準モータ」を対象に解析していますが、この回路図ファイルの定数を変更することによって、他の定数や動作条件における解析ができます。LTspiceの解析時間ができるだけ短時間となるように工夫もしています。

本書では条件として明示したもの以外は省略したパラメータなどがあり、また特性の非線形性などを無視したものもあり、解析結果と実機動作は必ずしも一致しない場合があると思われますので、この点に注意

ください。

見本

■ 読者ターゲット

本書の読者ターゲットは、サーボ・システムの設計や調整を命じられた技術者です。職場の上司や先輩から、何をどうすれば振る舞いがどうなるかという最低限の知識は教えてもらいました。でも、サーボ技術に対して十分な知識がないため、なぜそういう振る舞いになるのかが分かりません。仕様を満たすサーボを設計するために、何をどう調べて何を目的に作業を進めればいいのかと途方に暮れているという人を想定しています。

実はこのような状況は、サーボ・システムの設計に限らず新たな技術分野に挑む場合によくあることであり、筆者自身もそうでした。周りの人も忙しいので、自分で解決策を探さなくてはなりません。

本書は、そのような人のためにサーボ制御の動作のしくみと設計・評価方法を解説します。

■ 本書の構成

第1部 サーボ・ループの設計と評価

【第1章】 自動制御システムを実現する技術として「サーボ制御」があります。サーボ制御とは、出力をフィードバックして指令値に出力値を従わせる制御のことです。サーボ制御を組み込んだシステムが「サーボ・システム」です。第1章では、良好に制御するためのサーボ・システムの基本事項について述べます。

【第2章】 サーボ・システムの応答特性は、サーボ・ループ一巡のゲイン(ループ・ゲイン)の周波数特性によって決まります。定常偏差はループ・ゲインによって決まり、本章ではその関係を定量的に計算で求めます。

【第3章】 サーボにより得られる効果は、定常偏差以外にもひずみやノイズの低減、出力インピーダンスの増減、入力インピーダンスの増大があります。これらのサーボ効果とループ・ゲインとの関係を定量的に求めます。

【第4章】 サーボ・システムの特性評価用ツールとして、「過渡応答波形」、「ボード線図」、「ナイキスト線図」、「ニコルス線図」などを紹介します。

【第5章】 ループ・ゲインなどの周波数特性を検討するための便利なツールである「伝達要素」、「伝達関数」、「ラプラス変換」を説明します。

【第6章】 サーボ・ループの設計は、モータなどのプラントの周波数特性を測定・推定し、プラントを含むループ一巡の特性が条件を満たすようなサーボ・コントローラの周波数特性を求めることです。本章では、サーボ・コントローラが必要条件を満たす周波数特性となるように設計します。

【第7章】 実際によく使われるタイプのプラントを例として取り上げ、これを制御するサーボ・システムを具体的に設計します。サーボ・コントローラとしては、「PIコントローラ」、「PIDコントローラ」、より実用的な「実用微分型PIDコントローラ」を取り上げます。

第2部 ブラシレス・モータの最適制御条件

【第8章】 ブラシレス・モータの基本的な構造や機能を調べます。回転により発生する誘起電圧、回転検出用のホールICの取り付け位置や出力電圧、さらにステータ・コイルに鎖交するマグネット磁束について、構造から得られる理論的な位相関係などを求めます。

【第9章】 基準モータ2台のシャフトを連結した実験セットを製作し、一方のモータが他方を回します。発電機として発生する誘起電圧とホールIC出力電圧の各波形を実際に観測します。

【第10章】 ブラシレス・モータの正弦波駆動の電氣的モデルにおいて、各部電圧、電流、電力、トルクを求める計算式から、高い電力効率やトルク効率が得られるモータ制御の条件を求めます。

【第11章】 基準モータのカタログ・スペックをもとに、定格運転時の制御条件を最高効率となるように設定した場合の各部電圧、電流の振幅、位相を計算により求めます。

【第12章】 3相インバータによる正弦波駆動の動作波形を観測し、電力・トルク効率、回転品質などを求めます。使用機会の多い120°矩形波駆動についても動作波形を観測し、正弦波駆動と比較します。

第3部 ベクトル制御サーボ・システムの設計

【第13章】 モータの等価モデルを作成して、モータ特性を求めます。モータをプラントとしてループ内に含むサーボ・システムを設計するためには、モータの周波数特性を知る必要があります。

【第14章】 ブラシレス・モータを制御対象とするサーボ・システムを設計します。内側のループから順に電流、速度、位置を制御する多重ループのシステムです。

【第15章】 前章のシステムにベクトル制御機能を加え、電圧、電流などの波形を観測します。ベクトル制御により最適制御状態に自動的に追従制御できることを確認します。

見本

第1部 サーボ・ループの設計と評価

第1章 モータ/増幅器/ロボット… 制御対象に関わらず理論は共通

サーボの基礎知識

1

サーボの基礎知識

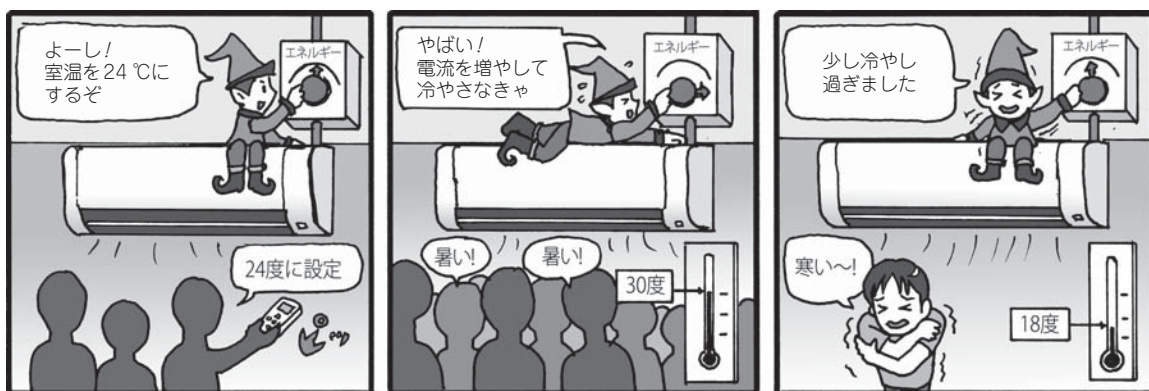


図1 エアコンは室内の温度を一定に自動制御するサーボ・システムの一つ

● 常に自動的に最適状態を保持したい…サーボ技術の導入

例えば、ブラシレス・モータの制御では、回転速度や位置などを目標の値(指令値)に自動的に向かわせてくれる駆動回路(サーボ・システム)に、誘起電圧とモータ電流の位相を合わせる制御(ベクトル制御)を加えると、トルク効率と電力効率が常に高い状態に保持されるようになり、高性能なモータ制御が可能になります。

ベクトル制御は指令値とフィードバック信号を直流信号(回転座標信号)で比較して、制御対象(プラント、ここではモータ)が指令値に近づくように働きますが、

モータに加える電流も誘起電圧も3相の交流信号なので、変換器(3相-2相変換器や2相-3相変換器)が必要です。

1.1 出力を自動的に制御したい

● 多くの制御システムが採用する自動制御技術「サーボ」

サーボ制御は、図2のような自動制御システムで実現します。

制御対象であるモータから目的に応じて電流や角周波数、位相の情報を検出し、フィードバックします。

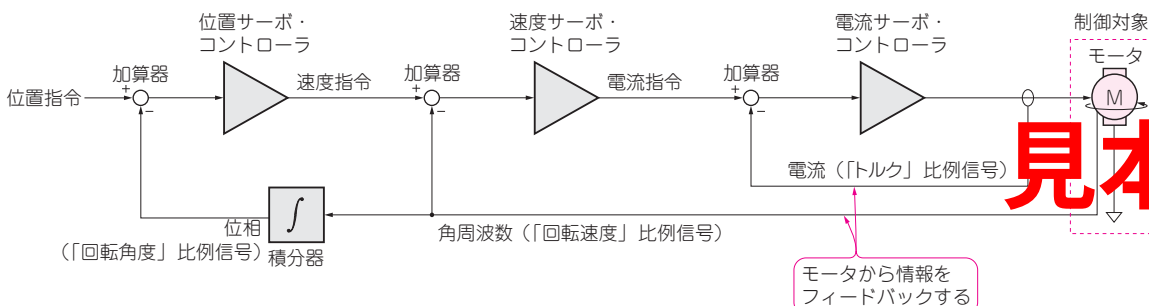


図2 サーボ制御…モータから情報をフィードバックしてトルクや回転速度、位置を制御する



第2章 ループ・ゲインを定量的に設計する

サーボ制御に必要な ゲインと位相の条件

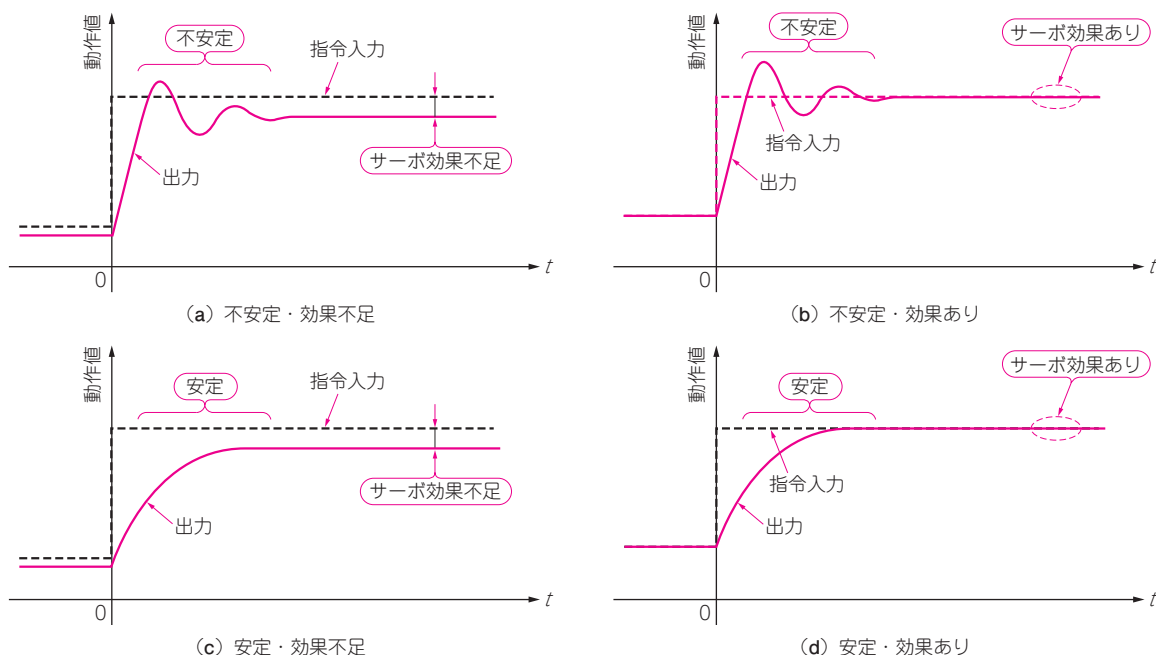


図1 理想的なサーボ・システムは、不安定な状態がなく、出力値が指令値と一致する
フィードバックされているゲインと位相が条件を満たすと、安定に期待通りの効果を得られる

● ベクトル制御はサーボ・システムの効率を上げるために欠かせない

回転速度や位置などを目標の値(指令値)に自動的に向かわせる制御を行うのがサーボ・システムです。

表面磁石型(SPM)ブラシレス・モータを駆動するとき、サーボ・システムに、誘起電圧とモータ電流の位相を合わせる制御(ベクトル制御)を加えると、トルク効率と電力効率が常に高い状態にキープされます。自動車やポンプのように、停止したり、アクセルの状態ですべてが変動するシステムにおいて、低速(停止)から高速まで、高い効率を自動的にキープすることができるようになります。EVは、ベクトル制御を導入しており、電費(燃費の電気版)改善に一役買っています。

モータを期待通りに制御する(サーボが適切に働く)ためには、フィードバックされているゲインと位相に

条件が必要です。ゲインが足りないと、制御出力が目標値に到達しません。

本章ではループ・ゲインを定量的に設計する方法を説明します。ループ・ゲインには大きさと位相の二つのパラメータがあります。

2.1

理想的な サーボ・システムの要件

● 定常時も過渡時も出力が指令値に追従し安定している

理想的なサーボ・システムは、次の二つの条件を満たします。

- 条件① 制御出力が指令値に一致する。すなわち、適切な「サーボ効果」が得られる(定常状態)
条件② 安定である(過渡状態)

見本



第3章 ノイズやひずみを低減したり、インピーダンスを調整したり

サーボにより得られる効果

● サーボをかけることで得られる効果はほかにも

第1章の図7に示したのは、ベクトル制御を加えた高効率モータ制御サーボ・システムの一例です。

ベクトル制御とは、電力効率やトルク効率を上げるサーボ技術です。つまり、ベクトル制御を実現するには、必要かつ十分なサーボ・システムが設計されることが前提です。

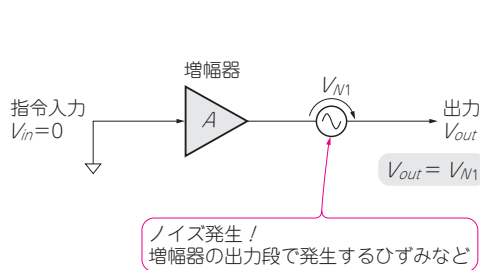
サーボ・システムには次の二つの性能が求められます。

- 出力値が指令値に一致してサーボ効果が得られること
- 指令値の変化に安定して追従すること

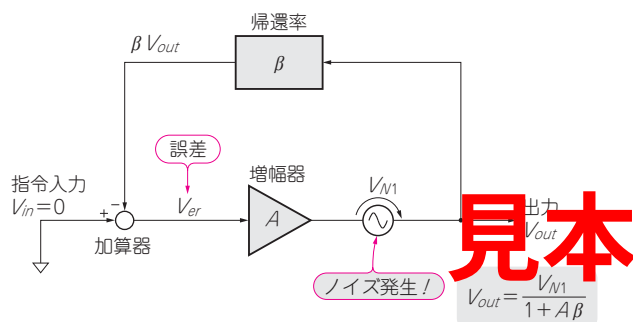
第2章では、サーボをかけることにより得られるサーボ効果として、指令値(期待値)と出力値の差(誤差)を小さくするための定量的な設計方法を解説しました。本章では、そのほかのサーボ効果を紹介します。

- (1) ひずみやノイズを減らせる
- (2) 出力インピーダンスを増減する
- (3) 入力インピーダンスを上げる

サーボにより得られる効果は、ほかにもたくさんありますが、ここでは性能に影響を与える代表的なものを採り上げます。



(a) フィードバックがない場合



(b) フィードバックをかけた場合

図1 フィードバックをかけると増幅器の出力に発生するノイズ V_{N1} が $1/(1+A\beta)$ 倍に減少する

$A\beta$ を大きくするほどノイズが小さくなる

3.1 ひずみやノイズを減らす

● 自身のノイズだけでなく侵入してくるノイズも減る

サーボ・システムは、周辺回路が発生するスイッチング・ノイズや外部電波などのさまざまな外乱にさらされる可能性があります。また、サーボ・ループ内の配線の引き回しによって生じる共通インピーダンスの電圧降下や配線のインダクタンスなどにより、ひずみやノイズが生じることもあります。

サーボ・システムでは、フィードバックにより入出力を比較し、入力信号には存在しない信号成分を出力から除去しようとしています。

指令入力信号には含まれない信号成分(以下、ノイズ)が混入する場所により、出力に与える影響が異なります。ノイズが発生したり混入したりする可能性のあるのは次の4箇所です。サーボ効果によりどれくらい出力のノイズが低減するかを計算してみます。

- (1) 増幅器の出力に発生するノイズ
- (2) 増幅器の入力に発生するノイズ
- (3) 帰還路の出力側に発生するノイズ
- (4) 帰還路の入力側に発生するノイズ



第4章

ステップ応答, ボーデ線図, ナイキスト線図, ニコルス線図の使い方

サーボの安定性は位相余裕で評価する

4

サーボの安定性は位相余裕で評価する

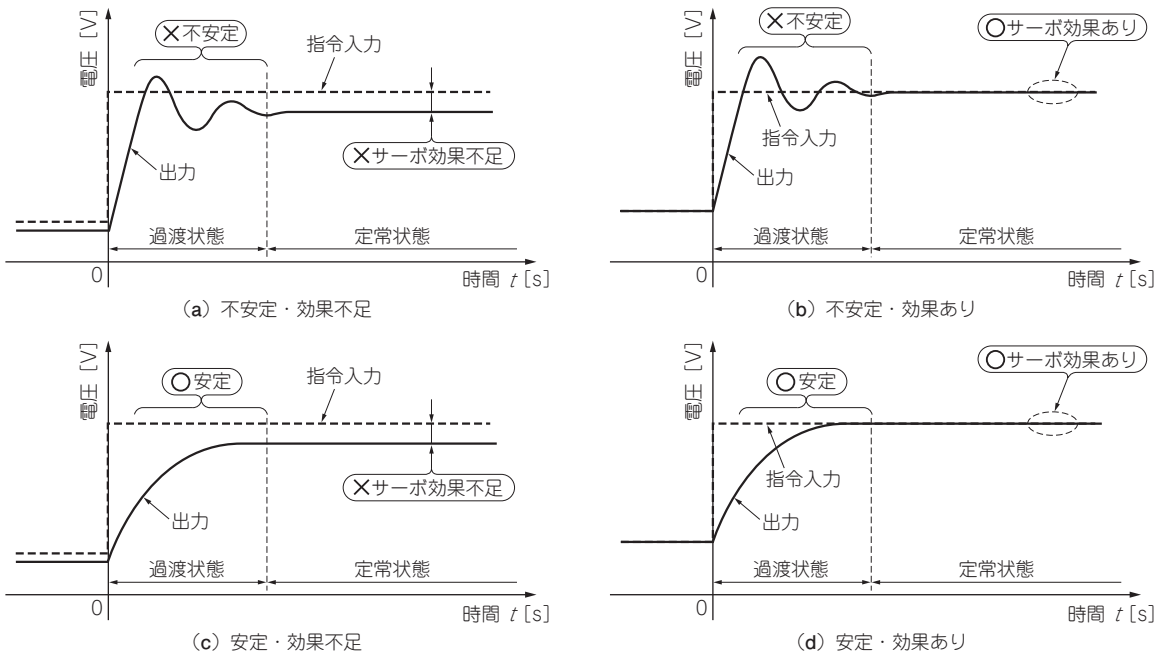


図1 サーボ・システムの基本性能「サーボ効果と安定性」は四つの状態に分けて評価する
理想的なサーボ・システムは、過渡状態で不安定な動作がなく、定常状態で指令値と出力値が一致する

ベクトル制御とは、電力効率やトルク効率を上げるサーボ制御技術です。ベクトル制御の実現には、負荷変動に強く出力値が期待の制御値と一致し、かつ安定なサーボ・システムが設計されていることが前提です。サーボ・システムには、次の二つの条件が求められます。

- 出力値が指令値と一致してサーボ効果が得られること
- 指令値や動作条件の変化に安定して追従すること

本章では、ステップ応答、ボーデ線図、ナイキスト線図、ニコルス線図の四つのツールから得られる情報から、安定性を評価する方法を説明します。

4.1 「サーボ効果」と「安定性」を両立させる

- 安定性は過渡状態に、サーボ効果は定常状態に現れる

図1(再掲)に示すように、サーボの状態は安定性とサーボ効果の組み合わせにより、四つに分けられます。サーボ・システムは、指令入力が増加すると追従します。これを「過渡応答」と言います。過渡状態の出力信号の波形を調べると、サーボの安定性がわかります。出力の変動が収まった後を「定常状態」といいます。収束した値と目標値との差分がサーボ効果を示します。

- サーボ効果と安定性を両立させたい

DCにおけるループ・ゲインが大きいほど、定常状態での指令値と出力値の差分(定常偏差)が小さくなり、

見本



第5章

折れ線近似で合成！
加減算でさまざまな特性の検討が容易に

周波数特性の検討に 便利なツール…伝達関数

サーボ・システムが良好な応答特性を示すためには、ループ一周のループ・ゲインの周波数特性が必要条件を満たす必要があります。周波数特性を検討するためには便利なツールがあり、本章、次章ではこれらの使い方について述べます。

本章では、「伝達要素」、「伝達関数」、「ラプラス変換」などの聞きなれない用語が使われますが、これらを「便利なツール」として利用します。

サーボ・ループを構成するサーボ・コントローラやプラント（モータなどの制御対象）、帰還率などを「伝達要素」と呼びます。「伝達要素」はさらに複数の「基本伝達要素」に分解できます。

「伝達要素」の入出力の関係を表すためには「伝達関数」を用いますが、上記「基本伝達要素」の「伝達関数」はシンプルな1次式で周波数特性も単純な特性です。実用上は、周波数特性を「直線近似」することができ、これも検討を容易にします。

ループを構成する「伝達要素」は「基本伝達要素」を直列または並列に組み合わせることで表すことができるので、結局ループ全体を「基本伝達要素」の組み合わせで表せます。このとき単位として「dB」を使用することにより、位相だけでなくゲインも合成値を加減算のみで計算できます。

プラント特性を求めたり、必要条件を満たすためにサーボ・コントローラの特性を設計することになりますが、作業をわかりやすく効率的に進めるために上記の「ツール」を使います。「ラプラス変換」によって得られる「伝達関数」は作業に必要なもののみを表に示します。

5.1

サーボ・コントローラで ループ特性を最適化する

● ①サーボ・コントローラ、②プラント、③帰還率
設計対象となる一般的なサーボ・システムのモデルを図1に示します。次の三つから構成されます。

- ① サーボ・コントローラ（以下、コントローラ） A_1
- ② プラント A_2

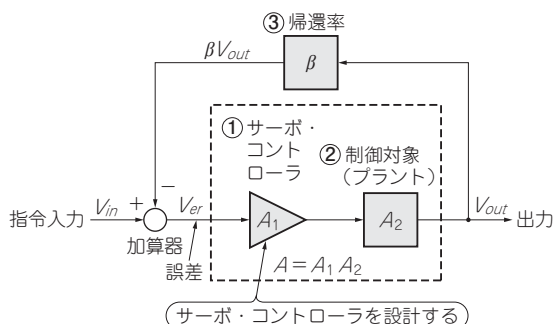


図1 サーボ・システムの安定性は①サーボ・コントローラと②プラントと③帰還率の周波数特性で決まる
変更できるのはサーボ・コントローラの周波数特性だけ

③ 帰還率 β

この三つの伝達要素は直列に結合されています。つまり、図2に示すように、①と②と③のゲインと位相を足し合わせたものが、サーボ・システムのループ・ゲイン G_L の周波数特性になります。サーボ・システムが十分なサーボ効果と安定性を得られる条件を満たすように、ループ・ゲイン G_L の大きさ（ゲイン）と位相の周波数特性を設計します。

● 調節できるのはコントローラだけ

図1に示す一般的なサーボ・モデルにおいて、ループ・ゲイン G_L は次式で表されます。

$$G_L = A\beta = A_1A_2\beta \dots\dots\dots (1)$$

式(1)の A_2 は制御対象であるプラントのゲインです。モータ制御であればモータがプラントです。原則として A_2 は変更できません。また、帰還率 β は要求条件に合わせて決まるもので、通常は変更できません。したがって、 G_L の周波数特性を最適化するには、コントローラのゲイン A_1 の周波数特性を設計します。

①コントローラ A_1 のゲインと位相特性を適切に設定することにより、② A_2 、③ β を含めた3者の直列結合であるループ・ゲイン G_L を最適化します。

見本



第6章

直列や並列に接続したり、
逆システムにしたり

複数の伝達要素の合成で 新たな特性を作る

第5章では、ループ・ゲインを検討するための基となるツールとして、伝達要素について解説しました。第5章の表1には基本伝達要素8種類を示し、それぞれの伝達関数を求め、ボード線図を示しました。

本章では、複数の伝達要素を直/並列に組み合わせる「直列結合」や「並列結合」、また「逆システム」などを利用して、新たに、より複雑な特性をもつ伝達要素を合成する方法を解説します。

実は、第5章の表1の比例要素 K 、微分要素 $s\tau$ の2種類から、残り6種類すべての伝達要素を合成することができます。

一見複雑に見える一巡のループを構成する各伝達要素もシンプルな要素に分解して周波数特性を求め、さらに条件を満たすループ特性となるようにサーボ・コントローラ特性を合成することができます。このような手法により、直感的でグラフィカルなループ設計を行うことができます。

6.1

三つの基本伝達要素で作る

高安定で、定常偏差が小さいサーボ・システムを確実に作るためには、

- サーボ・コントローラ
- 帰還回路
- プラント

で構成されるループ・ゲインと位相の周波数特性を必要条件を満たすように設計する必要があります。まず第5章の表1で紹介した8種類の伝達要素を利用して、ループを構成する制御対象(プラント)と帰還回路の周波数特性をプロファイルします。同様に8種類の伝達要素を利用して、サーボ・コントローラの周波数特性を調整してループ全体の周波数特性を上げます。

プラントや帰還回路が比較的シンプルな伝達特性の場合は、

- 比例要素(P : Proportional)
- 積分要素(I : Integral)

- 微分要素(D : Differential)

の三つの伝達要素でサーボ・コントローラを構成することができます。上記の8種類の伝達要素は、これら三つの伝達要素を並列結合したり、直列結合したり、逆数をとったりして組み合わせたものです。

- P, I, Dの組み合わせでサーボ・システムをコントロールする

サーボ・システムのコントローラの周波数特性を作るときに使用する伝達要素は、一般に図1に示すように、P(比例要素)とI(積分要素)、D(微分要素)の三つです。この三つの組み合わせによりコントローラを作ります。

図2に、コントローラが応答特性にどう影響するのかの例を示します。指令値にピッタリ合う(定常偏差なし)ようにしたり、指令値が変化したときにスムーズに追従する(高安定性)ように調整します。

- Pコントローラ…単独で使われることは少ない

P要素は、図1(a)に示すように周波数全域において、ゲインが平坦で位相変化は 0° です。ゲインだけを変化させることができます。ループ全体のゲイン特性のみを、位相特性を固定したまま上下に平行移動します。一部の周波数領域だけの特性を調整することはできません。

モータの速度制御において負荷トルク変化に対する回転速度の定常偏差を小さくするために、ゲイン特性を上方へ平行移動すると、安定性が損なわれて過渡的な回転速度のふらつきなどが起こる場合があります。逆に、より安定にするために下方へ平行移動すると速度偏差が大きくなります。元のループ・ゲイン特性が偏差と安定性の両面でほぼ要求条件を満たしている場合には、P要素のみのコントローラを使う場合があります。しかし、平行移動だけで十分なゲインと安定性を同時に得ることは困難です。

6

複数の伝達要素の合成で新たな特性を作る

見本



第7章

サーボ・コントローラ的设计から
過大振幅対策まで

実際にサーボ・ループを 設計する

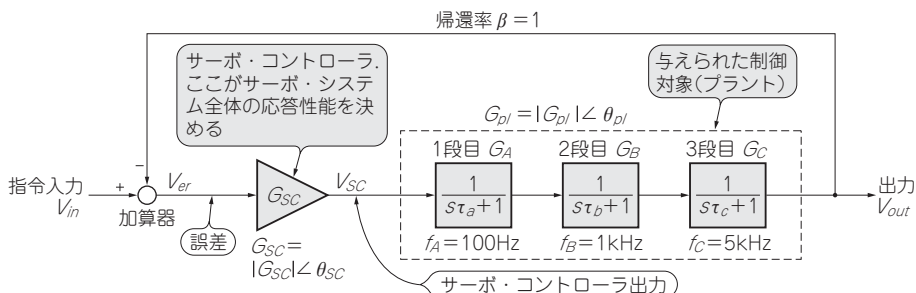


図1 設計するサーボ・システム的具体例

前章までに、ループ・ゲインを検討するためのツールとその使い方について述べ、複数の伝達要素を組み合わせることによって必要とする新たな特性をもつ伝達要素を得る方法を解説しました。

本章では、実際によく目にし使われるタイプのプラントを例題として取り上げ、これを制御するサーボ・システムを具体的に設計します。プラントの周波数特性を調べ、サーボ・コントローラ的设计においては位相余裕として定量的な目標を設定します。

サーボ・コントローラとしてはPIコントローラ、PIDコントローラを使用します。PIDコントローラについては実用上の問題を指摘されることもあります。ここではより実際の「実用微分型PIDコントローラ」を採用し、それらの問題も検討します。設計とシミュレーションによる確認を行い最適化します。

近年、サーボ・コントローラをソフトウェアで構成することが多く行われており、その際に必要になる時間的に不連続な演算を行える差分式について、実用微分型PIDコントローラを例に求めています。

*

サーボ設計とは、一言でいえば「最適なサーボ・コントローラの周波数特性を求める」ことです。設計段階では特性が既定となるプラント・ゲイン G_{pl} と帰還率 β に合わせてサーボ・コントローラ・ゲイン G_{sc} を決めます。そして、これら3者の直列結合であるループ・ゲイン $G_L (= G_{sc} G_{pl} \beta)$ 特性が必要条件を満たすことが、サーボ設計の最終目標になります。

7.1

設計するサーボ・システム

● サーボ・システムのプラント特性を求める

図1に示すのは、本章で設計するサーボ・システムです。

サーボ・システムの定格出力振幅は $\pm 1 V_P$ で、帰還率 β は1倍です。プラント・ゲイン $|G_{pl}|$ は、100 Hz以下の平坦部(通過帯域)で0 dB(1倍)です。

1段目の遮断周波数 f_A は、100 Hz [$\tau_A = 1/(2\pi f_A) = 1.59 \text{ ms}$] です。 f_A (100 Hz) 以上では -20 dB/dec の傾斜で減衰します。

2段目の遮断周波数 f_B は、1 kHz [$\tau_B = 1/(2\pi f_B) = 159 \text{ } \mu\text{s}$] です。 f_B (1 kHz) 以上では1次遅れ要素が2段重なるので -40 dB/dec の傾斜で減衰します。

3段目の遮断周波数 f_C は、5 kHz [$\tau_C = 1/(2\pi f_C) = 31.8 \text{ } \mu\text{s}$] です。 f_C (5 kHz) 以上では、1次遅れ要素が3段分で傾斜は -60 dB/dec です。

● プラントの周波数特性

前項で求めたようにプラントは、1次遅れ要素が3段の直列結合で、ゲインと位相を折れ線グラフで表す。図2に示すような周波数特性をもっている。

位相 θ_{pl} は、 $0.2 f_A$ (20 Hz) 以下では 0° 一定です。

f_A (100 Hz) においては -45° です。

f_B (1 kHz) では1段目の位相が -90° 、3段目が 0° なので、これに2段目の -45° を加えて -135° です。

見本

第2部 ブラシレス・モータの最適制御条件

第8章

波形から制御に必要なロータの回転角度を読み取る

制御対象であるモータの 振る舞いを調べる

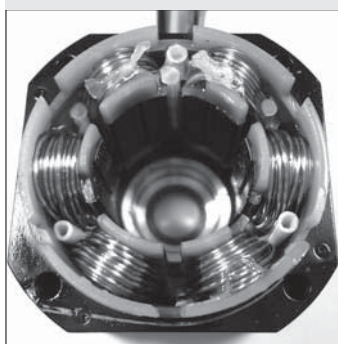
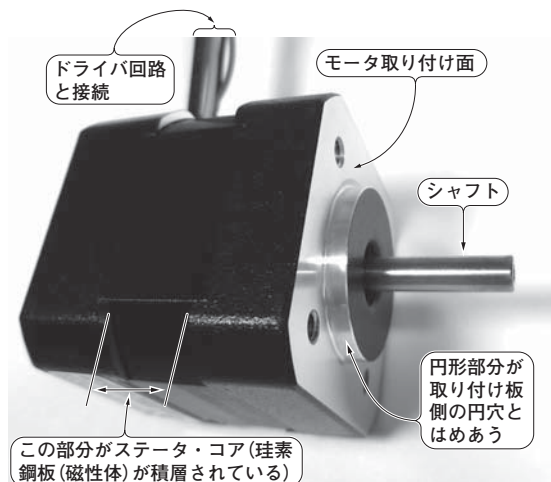


図1 サーボ制御とベクトル制御の二つで高効率を目指す



(a) ブラシレス・モータ



(b) ブラシ付きモータ

写真1 2種類のDCモータ「ブラシレス」と「ブラシ付き」

本章では、ブラシレス・モータの制御に必要な基本事項について考えます。ブラシレス・モータとしては、CQ出版社から発売された「トラ技3相インバータ実験キット(INV-1TGKIT-A)」(以下「実験キット」と呼ぶ)をサンプルとして、構造や動作波形などを調べます。比較のために、実験キットに同梱されたブラシ付きモータも分解して、電流切り替え機能などを調べます。

これらの情報をもとに、高い電力効率や回転効率が得られるモータ制御を目指します(図1)。

8.1

2種類のDCモータ

永久磁石とコイルをもち、外部電流をコイルに流すことで回転させるタイプのモータを「DC(直流)モータ」と呼びます。DCモータには、写真1(a)に示すブラシレス・モータと、写真1(b)に示すブラシ付きモータの2種類があります。

ブラシ付き、ブラシレス両モータの回転原理は同じです。つまり、電流を流すことで発生する磁界を利用してモータを回転させます。回転速度-トルク特性などもほぼ同じです。

8

制御対象であるモータの振る舞いを調べる

第9章

実際にモータを回転させて出力信号を測って調べる

駆動時に使うホールIC信号とロータ位置の関係

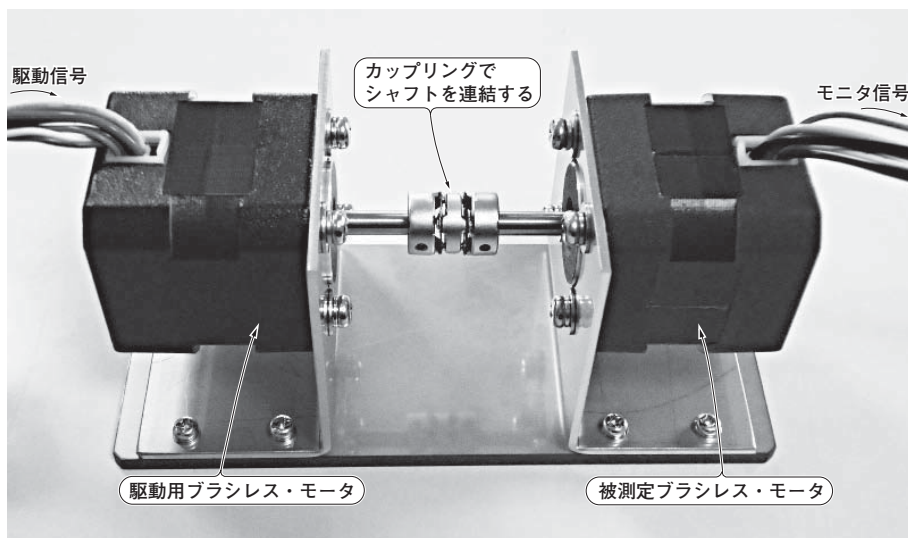


写真1 被測定ブラシレス・モータをもう1台のモータで回す

ブラシレス・モータ内のロータがどの位置にあるかはコイルに誘起する電圧を測ればわかるが、駆動信号を加えているので、実際には測定することができない。そこで、被測定ブラシレス・モータを駆動用モータで回して、被測定モータの駆動端子を開放してコイル電流をゼロとすることにより、端子間から直接誘起電圧を観測する

第8章では、実験キットのブラシレス・モータの内部構造を調べ、モータのコイルに発生する誘起電圧とホールIC出力信号の位相角を求めました。さらに、コイルと鎖交するマグネット磁束と誘起電圧の関係も調べました。

本章では、モータ駆動中には測定が難しい誘起電圧を観測するため、実験セットを使用して実際にモータを回転させ、誘起電圧とホールIC出力信号を観測し、測定結果と第8章で求めた理論値を比較します。

9.1

実験セットで実測する

● 誘起電圧とホールIC信号を観測する実験セット

写真1に今回の実験セットを示します。実験キットの構成部品であるブラシレス・モータを2台用意します。2台のブラシレス・モータを対向させて台に固定し、両者のシャフトどうしを「カップリング」と呼ばれる

部品で連結します。駆動用モータはドライバと接続し回転させますが、被測定用モータはドライバと接続せず、誘起電圧とホールICの出力波形を観測します。

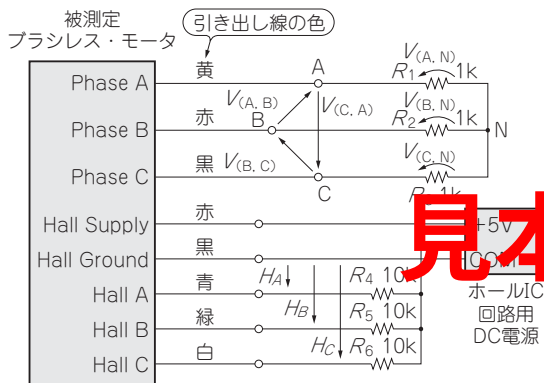
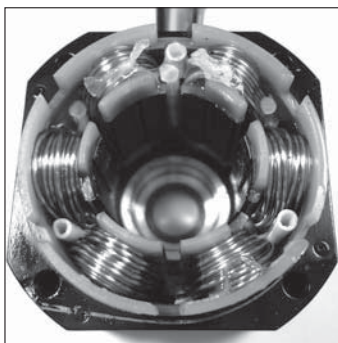


図1 被測定ブラシレス・モータの端子と信号名



第10章

モータの誘起電圧とモータ・コイル電流の位相関係

電力効率とトルク効率の最適制御条件

ブラシレス・モータを回転させるためにドライバから流し込むコイル電流の位相と、ブラシレス・モータが回転することにより発生する誘起電圧の位相はモータ効率に影響します。表面磁石型ロータのモータにおいては、両者の位相を同相にすると、ブラシレス・モータの電力効率とトルク効率を上げることができます。電力効率はブラシレス・モータの省エネ性に、発生トルクは振動や騒音などの回転品質にとっても重要な性能です。

本章では、トルクや電力を表す数式からグラフを描き、電力効率および発生トルクの二つの観点から、誘起電圧に対するコイル電流の位相 θ をいくらに設定すべきかを考えます。 θ は、ドライバが電流をブラシレス・モータに供給するにあたって重要な制御パラメータです。

10.1

電力効率を上げる

■ モータ駆動時に発生する電力の無駄

● モータの電力効率とは

例えばモータの回転出力 P_M が80 Wで、モータの入力電力 P_E が100 Wである場合、モータの電力効率 η_F は次式のように80 %です。

$$\eta_F = \frac{P_M}{P_E} = \frac{80}{100} = 0.8 (80 \%)$$

モータの損失は20 W ($= 100 - 80 = P_E - P_M$)となり、モータ内部で20 Wが消費されています。

● 小さくない三つの損失

モータの電力損失には、次の要因があります。

① モータの機械・電気・磁気的な損失

モータは、ドライバから受け取った3相電力を機械的な回転に変換するときに損失が発生する。例えば、コイル抵抗の発熱、軸受けの転がり摩擦損失、ロータが空气中を回転することによる風損、ロー

タ・コア、ステータ・コア、マグネットなどのモータ部品の発熱など。

モータだけでなくモータ・ドライバ回路でも電力損失が発生します。

② ドライバ回路の電力損失

ドライバはDC電源から供給された電力を3相電力に変換しモータに供給するときに損失が発生する。例えば、スイッチング素子などの回路部品の発熱損失など。

③ ドライバからモータへの電力供給損失

ドライバからモータにAC電力を受け渡すときに発生する損失。

これらの損失を減らせれば、電力効率がアップします。

● ③の損失を減らすことを考える

コイルの抵抗を減らしたり、コアやマグネットの材質や形状を変えたり、軸受けを変更したりすれば、電力損失を減らすことができますが、モータ自体の設計変更が必要です。ここではモータ自体には加えず、③のドライバからモータへ電力供給するときに発生する損失を減らす方法を考えます。

③の損失を減らし電力効率を上げてコイル電流を減らすことができれば、結果的にコイル抵抗による損失などが減らせます。さらに、ドライバの電流も減るので、ドライバ損失も小さくできます。

■ 電力を効率良く供給するための条件

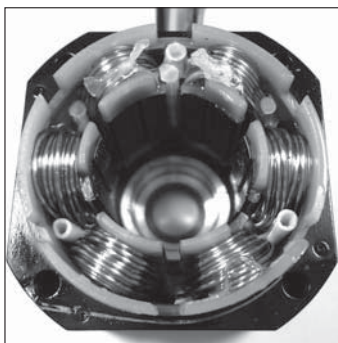
● 最小電流で必要な電力を得るには力率を1にする

直流では「電圧×電流」が電力そのもので、それ以外の電力はありません。しかし、交流では「電圧×電流」は表面的な電力である「皮相電力」であり、発熱やエネルギーに変換される真に有効な電力「有効電力」ではありません。この二つの電力を結ぶ重要なカギが「力率」です。

10

電力効率とトルク効率の最適制御条件

見本



第11章

最適制御条件で回転させたときの
効果を計算する

高効率を実現する ベクトル制御の導入効果

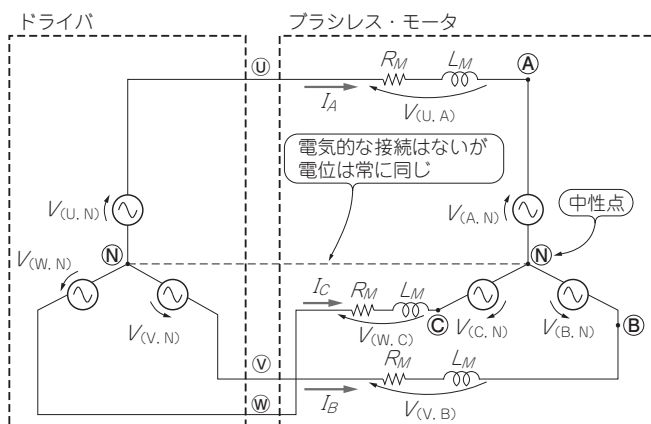


図1 ブラシレス・モータとドライバの電気的な動作を表す等価回路
ドライバの中点とブラシレス・モータの中性点は同電位と考えられる

● ベクトル制御のねらいを再確認…誘起電圧とコイル電流の位相差を 0° (力率1)にして電力効率とトルク効率を最大にすること

前章では、ブラシレス・モータを正弦波で駆動する場合、コイル電流の位相が誘起電圧と同相になるように制御すると、電力効率とトルク効率が最大になることを示しました(マグネット・トルクのみを使用する場合)。

ベクトル制御は、モータの回転速度や出力トルクなどの動作条件に応じて、コイル電流の位相を誘起電圧と同相になるように自動的に調節します。ここでは、モータの各パラメータを等価回路(図1)から数式で表し、誘起電圧に対してコイル電流の位相を変化させて、モータの各パラメータがどのように変化するかを定量的に求めます。そして、各パラメータの因果関係から、ベクトル制御が行われたときの動作メカニズムを理解します。

● 誘起電圧の位相や振幅を測るすべがない

ベクトル制御の基準は誘起電圧です。しかし、誘起電圧そのものを直接測定することはできません。

モータ・コイルに限らず、一般に電線でコイルを巻くとインダクタンス成分 L_M と抵抗成分 R_M が生じま

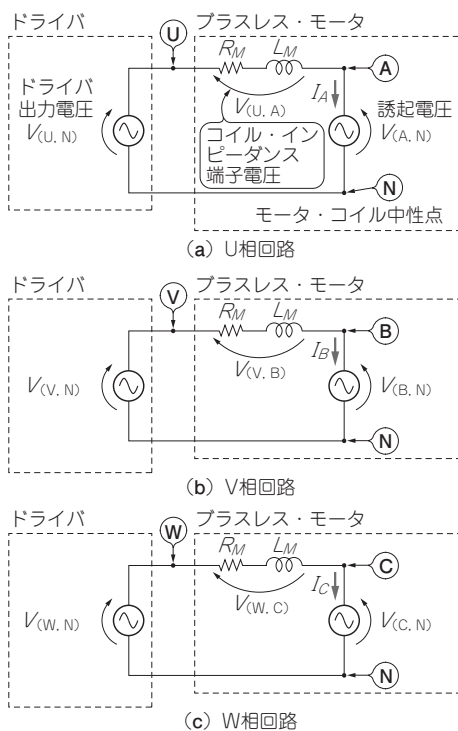
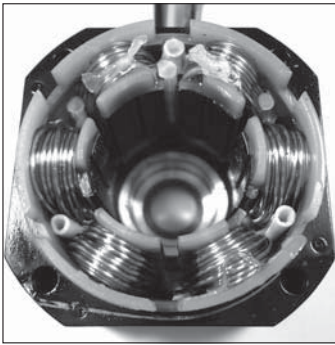


図2 3相回路を各相ごとに分割する

す。これらは、電線の1か所に集中して存在するのではなく、電線の端から端までの全域にわたって分布し、巻いたコイルから L_M と R_M だけを分離することはできません。

図2(a)のように、コイル電流 I_A [A] の通電時に観測できるのは、誘起電圧 $V_{(A, N)}$ [V] とコイル・インピーダンス端子電圧 $V_{(U, A)}$ を足し合わせた値です。コイルに電流が流れていると、全域にわたって L_M と R_M に電圧降下が発生するため、コイル端子間にオシロスコープを接続しても、誘起電圧を見ることはできません。見えるのは誘起電圧と L_M と R_M の電圧降下を加算した電圧です。コイル端子間をオープンしてコイル電流を0 Aにすれば、 L_M 、 R_M の電圧降下も0 Vになるので誘起電圧が観測できます。しかし、誘起電圧を

見本



第12章

代表的な「120°矩形波駆動」と「正弦波駆動」を比較

モータの駆動方法の検討

前章までに、ブラシレス・モータを正弦波駆動する場合の、電力効率とトルク効率を最大にする制御条件について検討してきました。対象を表面磁石型ロータ・タイプでマグネット・トルクのみを利用するモータとした場合に、最適制御条件はモータ・コイルの誘起電圧と駆動コイル電流を同相にすることであるということがわかりました。

前章まではモータの各パラメータに対する計算式から制御条件を求め、グラフ化などによってパラメータ間の相互関係を明らかにしましたが、本章ではそれらの条件を適用したシミュレーションを行って動作波形を観測し、より具体的・直感的な理解を目指します。シミュレーションでは駆動回路である3相インバータのPWMスイッチング動作を含め、スイッチング動作の波形への影響も見ます。関連技術として、モータ・コイル電流の検出法や電圧利用率の改善についても述べます。

また、正弦波駆動とは別に使用機会の多い120°矩形波駆動についても動作を調べます。効率の検討以外に、駆動方式と駆動波形の違いも確認します。

12.1

ベクトル制御には 正弦波駆動が最適

● 回転速度やトルクが変わってもトルク & 電力効率を最大にキープしたい

例えばエアコンで使用されるモータは、設定温度や気温の変化によりモータの回転速度が変化します。

モータの回転速度や負荷トルクが変化すれば必要なコイル電流が変化するため、誘起電圧やドライバ出力電圧なども変化します。それらの運転条件の変化に合わせて、誘起電圧に対してコイル電流の位相を同相になるように追従制御し続けなければ、電力効率は悪くなります。

これらの変動に対して自動的に追従し最適な駆動をする手法として、ベクトル制御技術が有効です。

● ベクトル制御は最適動作に自動追従

第11章で求めた計算式を用いて高速に処理でき

ば、ベクトル制御を使わなくても、モータの回転速度や負荷トルクに合わせてコイル電流の振幅や位相を制御することはできるかもしれません。しかし、計算の元になる各パラメータは温度などで変動するので、これによる誤差は避けられません。

ベクトル制御技術を利用すれば、これらの変動を含めて制御できます。といっても、高精度で高速な座標変換演算などは必要です。エアコンなどの家電製品にもベクトル制御が導入され、ベクトル制御に特化した安価な専用マイコンが出てきたことも普及の一因です。

● 正弦波駆動の利点1…電力効率が良い

ベクトル制御は、電力のむだを削りたいときに利用する技術です。

ブラシレス・モータでは120°矩形波駆動と呼ばれる駆動方法が広く普及しています。120°矩形波駆動のほうが正弦波駆動に比べて回路も制御もシンプルで安価に製作できるため、多く使用されています。

本章では、正弦波駆動が120°矩形波駆動よりも電力効率が高いことを示します。

● 正弦波駆動の利点2…滑らかに静かに回せる

正弦波駆動のもう一つの特長は回転品質の優位性です。回転品質とは振動、騒音や回転むらなどに関係します。正弦波駆動は、誘起電圧も正弦波であれば発生トルクがロータの回転角度によらず一定値を示すので、滑らかに静かに回転させることができます。120°矩形波駆動の場合は、ロータの回転角度によって発生トルクが変化するトルク・リップルがあり、振動や騒音、回転むらなどの原因になりえます。

12.2

正弦波駆動の 電力効率とトルク効率

実験キットのブラシレス・モータを例にシミュレーションを行い、①誘起電圧、②コイル電流、③ドライバ出力電圧、④各相の瞬時電力(瞬時トルク)、⑤3相の合計電力(合計トルク)の波形を観測します。

第3部 ベクトル制御サーボ・システムの設計

第13章

機械部もまとめて等価回路に！
モータ負荷条件が変化したときも解析する

ブラシレス・モータの 伝達特性を求める

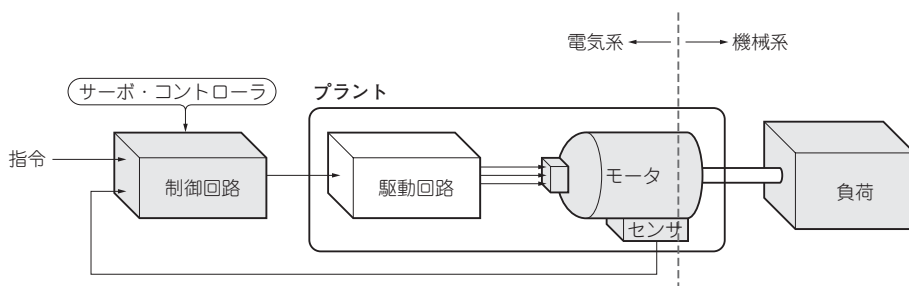
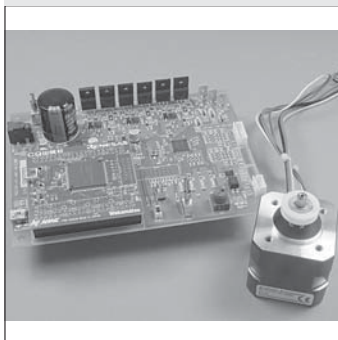


図1 モータ・サーボ・システムは電気系と機械系の組み合わせで動いている
本章では、機械系の部分も含めたモータの電氣的回路モデルを作成する

サーボ設計とは、最適なサーボ・コントローラの周波数特性を求めることです。モータ制御サーボにおいては、制御対象(プラント)であるモータの周波数特性が必要です。本章では、モータの周波数特性を求める方法を解説します。

● モータの機械系も電気回路に置き換えて解析する

モータは、入力が電圧や電流なのに、出力は回転速度やトルクです。つまり、電気信号ではありません(図1)。

前章までに、制御対象(プラント)の周波数特性を把握し、それに応じた制御回路を作ればよいと述べてきました。しかし、制御対象となるモータや負荷は電気回路ではありません。そこで、本章ではモータの機械的な回転速度やトルクなどをすべて電氣的な等価回路で表します。

モータを等価回路で表せば、制御を含めた全体を電気回路で表現できるため、機械系による位相遅れなどを含めた解析やシミュレーションをすることができます。

本章で作成したモータの電氣的モデルは、モータや負荷のパラメータを任意の値に設定できます。

【本章の流れ】

- (1) モータ各部のパラメータの関係を示す微分方程式とモータの電気回路モデルを求める
- (2) 微分方程式をラプラス変換して、モータの伝達特性式とブロック線図を求める

- (3) モータの電気回路モデルをLTSpiceでシミュレーションして、モータを電圧駆動したときの周波数特性と過渡応答特性を求める。モータ定数や動作条件は、トラ技3相インバータ実験キット INV-1TGKIT-A(以下、実験キット)のブラシレス・モータの値を使う
- (4) (3)の周波数特性の折れ点周波数を決めているモータ・パラメータを求める
- (5) シミュレーションした結果と計算で求めた値を比較して、(1)の電気回路モデルがブラシレス・モータの等価回路として使用できることを確認する
- (6) (2)の伝達特性式からモータの静特性を求める
- (7) モータ負荷条件変化時の特性変化を求める
- (8) 上記(3)の各特性を電流駆動において求める

13.1

ブラシレス・モータの 等価回路

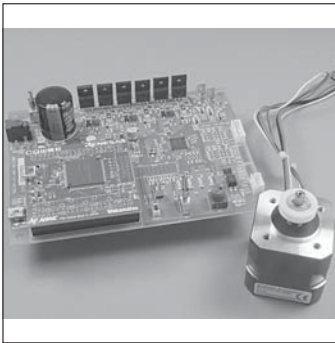
● モータの特性を表す「運動方程式」と「回路方程式」を関連付ける

モータは電気系と機械系が合わさったものです。モータの電気系を等価回路に置き換えると、図2(a)になります。モータの機械系を等価回路に置き換えると、図2(b)になります。これまでは、図2(a)に示した電気系の部分だけで検討をし、機械的な遅れは考慮していませんでした。本章では機械系も含めて考えます。

見本

13

ブラシレス・モータの伝達特性を求める



第14章 多重ループ・サーボで トルク/速度/位置を制御する

モータ・サーボ・システムを 設計する

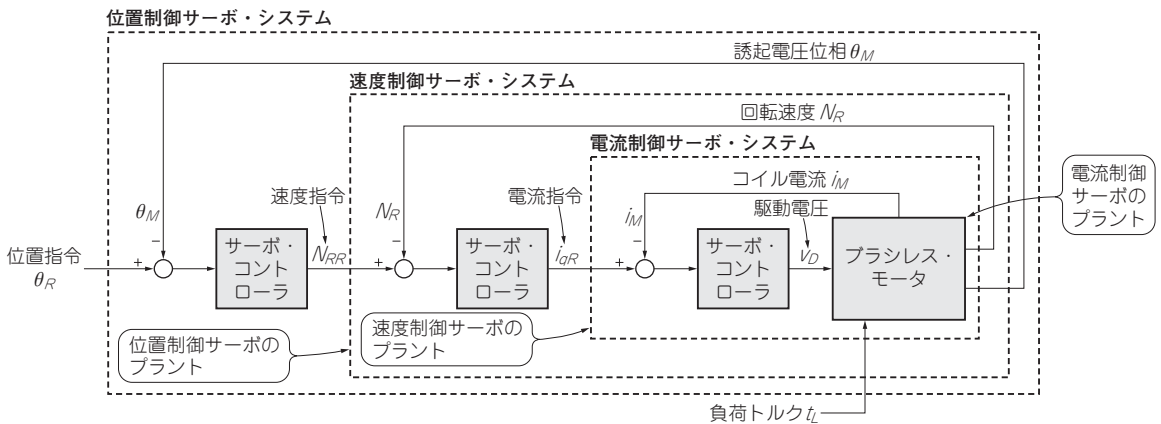


図1 多重ループ・サーボ・システム

制御対象(プラント)はブラシレス・モータ、電流サーボ、速度サーボ、位置サーボにより、トルクと速度と位置が制御できる

本章ではベクトル制御のもととなる多重ループ・サーボ・システムを設計します。プラントとしては前章で特性を求めた「実験キットのブラシレス・モータ」を使用し、多重ループを内側から順に設計して、各特性を確認します。

14.1

多重ループ・サーボ・システムの設計

● 全体の構成

図1は、ブラシレス・モータを駆動する多重ループ・サーボ・システムです。次に示す三つのサーボがかかっていて、トルク、速度、位置の制御ができます。

- 電流制御サーボ(トルク制御サーボ)
- 速度制御サーボ
- 位置制御サーボ

● 設計の手順

基本となる電流制御サーボ・システムから設計します。電流制御サーボ・システムの制御対象(プラント)は、ブラシレス・モータです。ブラシレス・モータの周波数特性はモータのメカ部分も電子回路で表した第

13章の図3と図5(a)の「特性解析用等価回路」からわかります。その周波数特性に合わせて、サーボ・コントローラを設計して、電流制御サーボ・ループがサーボ効果と安定性を得られるようにします。

次に設計するのは、モータの回転速度を制御する速度制御サーボ・システムです。このサーボ・システムのプラントは、上記の電流制御サーボ・システムです。電流制御サーボ・ループの周波数特性に合わせて、サーボ・コントローラを設計して、速度制御サーボ・ループがサーボ効果と安定性を得られるようにします。

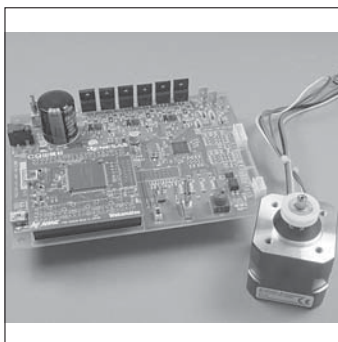
最後に設計するのは、回転角度(位置)を制御するための位置制御サーボ・システムです。このサーボ・システムのプラントは、上記の速度制御サーボ・システムです。速度制御サーボ・ループの周波数特性に合わせて、サーボ・コントローラを設計して、位置制御サーボ・ループがサーボ効果と安定性を得られるようにします。

一般に、フィードバック・ループの周波数帯域(ループの切れる周波数)は、内側のループをより広くしておく必要があります。外側のループが必要とする帯域が決まっている場合は、それに応じて内側ループ帯域を設定します。

14

モータ・サーボ・システムを設計する

見本



第15章 高効率制御を電圧・電流波形で確認する

サーボ・システムにベクトル制御を加える

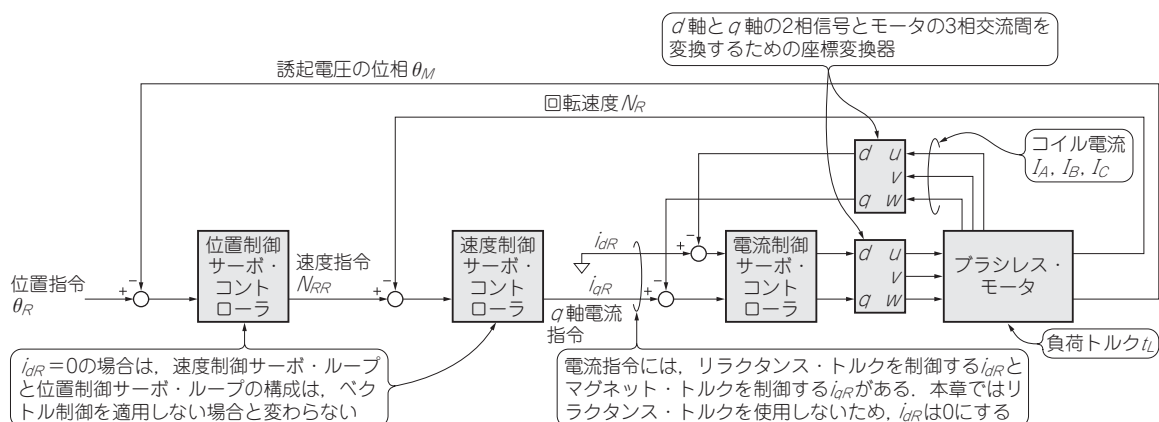


図1 ベクトル制御サーボ・システム

電流，速度，位置を制御できる多重サーボ・システムにベクトル制御を適用する

前章までに、ブラシレス・モータの等価回路を求め、これを制御対象とする電流制御，速度制御，位置制御の多重ループ・サーボ・システムを構築しました。そして、それぞれのサーボ・ループを設計し、ループ特性や過渡応答波形が良好であることを確認しました。

本章では、前章で設計・評価したサーボ・システムにベクトル制御機能を加えます。そして、モータ各部の電圧，電流波形を観測して、それらの波形や位相関係などからベクトル制御が有効に機能していることを確かめます。

最後に、スイッチング特性がループ特性に与える影響を調べるため、時間応答や周波数応答をシミュレーションで測定しました。

その外側の速度制御サーボ・ループと位置制御サーボ・ループの構成は、マグネット・トルクのみを利用する場合であれば、前章の多重ループ・サーボ・システムと同じ構成です。

● ベクトル制御の機能

ブラシレス・モータはそのロータ構造によって、マグネット・トルク(q軸)のみを利用する表面磁石型と、マグネット・トルクとリラクタンス・トルク(d軸)をともに利用できる埋め込み磁石型とに分けられます。

ベクトル制御は、d軸とq軸のコイル電流(トルク)を個別に制御することのできる技術です。マグネット・トルクのみを制御する場合は、コイル電流の位相を誘起電圧と同相にすることにより、電力効率とトルク効率を最大にできます。変化する動作条件に追従してコイル電流の振幅と位相を自動的に最適値に調整するのが、ベクトル制御の機能です。

コイルに発生する誘起電圧は、ロータの位置情報をもっています。誘起電圧の振幅と周波数は回転速度に比例し、誘起電圧の位相は回転角度(位相)と一致しています。これらの回転位置情報を何らかの方法で検出し、誘起電圧に同期したコイル電流を供給します。

15.1

ベクトル制御サーボ・システムの構成

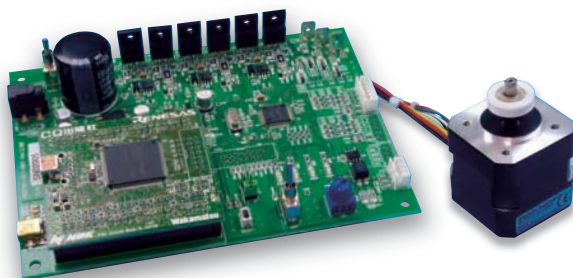
● 全体の構成

図1に示すのは、ブラシレス・モータのベクトル制御サーボ・システムです。リラクタンス・トルクとマグネット・トルクを個別に制御するためのd軸とq軸の2相回転座標信号と、モータの3相静止座標信号間の相互変換などを行うための座標変換器が電流制御サーボ・システムに組み込まれています。

15

サーボ・システムにベクトル制御を加える

見本



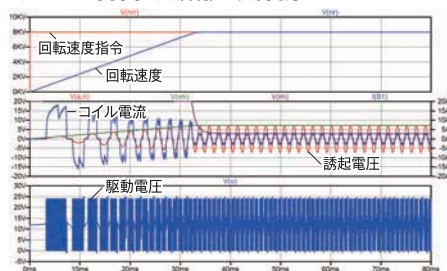
温度/位置/速度/力…外乱に強いフィードバック・システム作りと評価技術

高効率・高速応答！ サーボ&ベクトル制御 実用設計

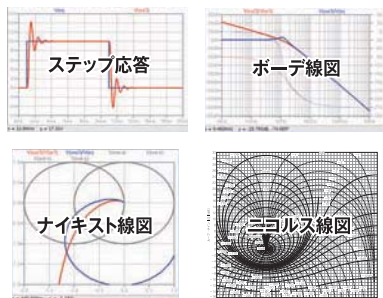
●モータを分解！最適駆動条件を調べる



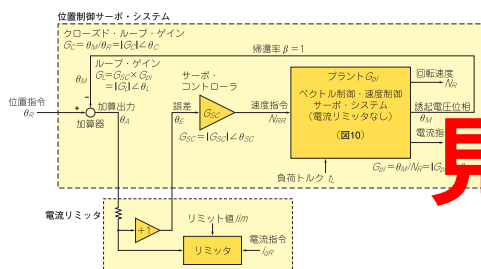
●回路シミュレータ「LTspice」で サーボ制御を波形で解析



●打たれ強さ「安定度」が丸わりの評価術



●トルク・速度・位置を制御する ベクトル・サーボ・システムの設計



見本

