



高トルク&高速応答! センサレス・モータ制御技術

シンプルで高信頼! ベクトル制御で力強く、静かに回す

岩路善尚

Yoshitaka Iwaji

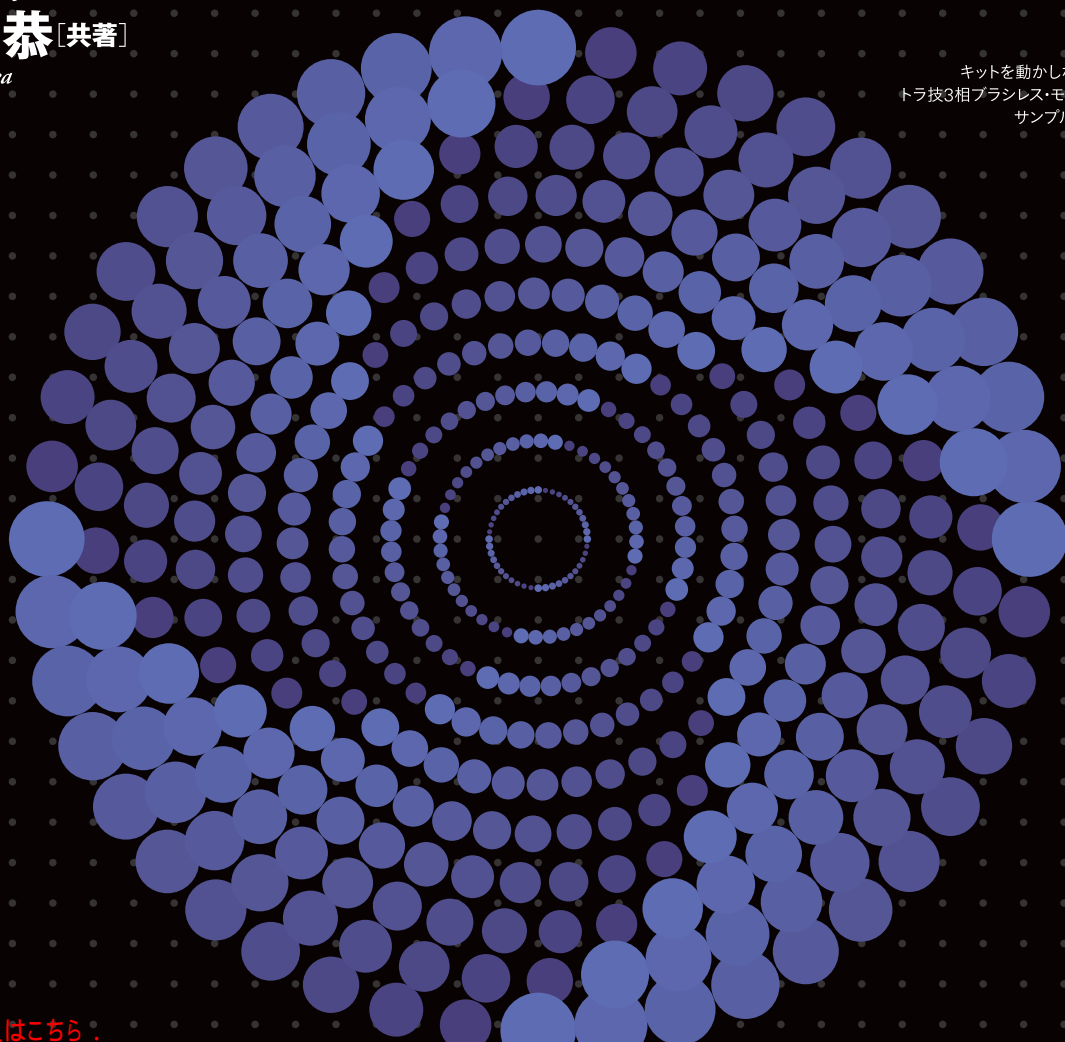
足塚 恭 [共著]

Kyo Ashizuka



CD-ROM付き

キットを動かしながら学習できる!
トラ技3相ブラシレス・モータ実験キット用
サンプル・プログラム一式



ご購入はこちら。

<http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/46/46341.htm>

CQ出版社

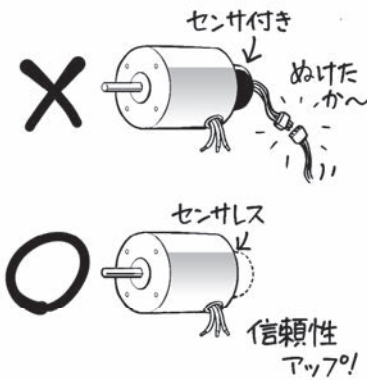
見本

1 第1章

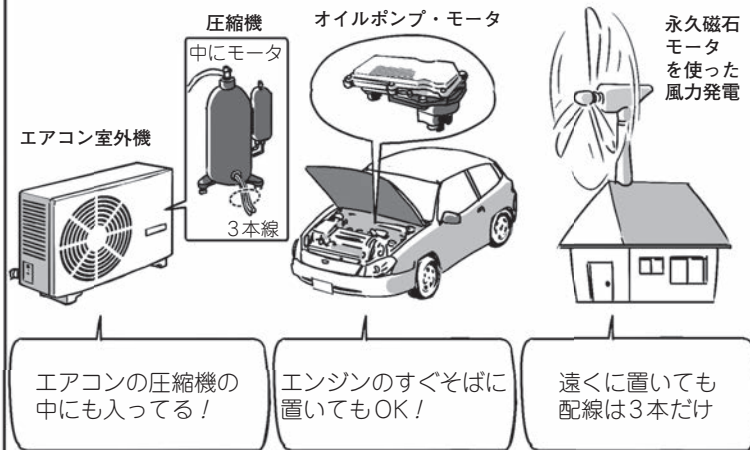
センサレス制御のメリットと用途

～小型、高信頼、省配線で取り付け容易～

① センサの故障や、断線の心配なし！



② 本当は入れたかったあの場所に！



本書では、モータを搭載する機器の小型化、高効率化、高信頼性の鍵を握る永久磁石モータ（ブラシレスDCモータ）のセンサレス制御の実現手法をトコトン実験で解説します。

実験には、RX62Tマイコン（ルネサス エレクトロニクス）を搭載した「トラ技3相インバータ実験キット・INV-1TGKIT-A（写真1-1）」を利用します。

本章では、センサレス制御技術の用途やしぐみ、メリット/デメリットなどの基礎知識を解説します。

1-1 センサレス制御の用途

● 永久磁石モータの小型・高効率と誘導モータのタフさを両立できる技術

私たちの身の回りには、モータを応用した数々の製品であふれています。白物家電のエアコン、冷蔵庫、洗濯機、掃除機を始め、パソコンの冷却ファンやハード・ディスク、電車、エレベータ、自動車の中にもたくさんのモータが搭載されています。

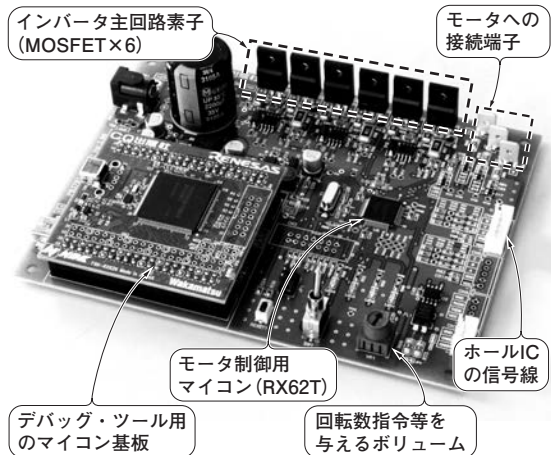


写真1-1 トラ技3相インバータ実験キット「INV-1TGKIT-A」の制御ボード
キットには、永久磁石モータが付属しているのですぐに実験をスタートできる

これらの応用の中には、回転数やトルクを制御してモータ駆動しているものもたくさんあります。その制御方式を大別すると、次に示す二つに分類できます。

見本

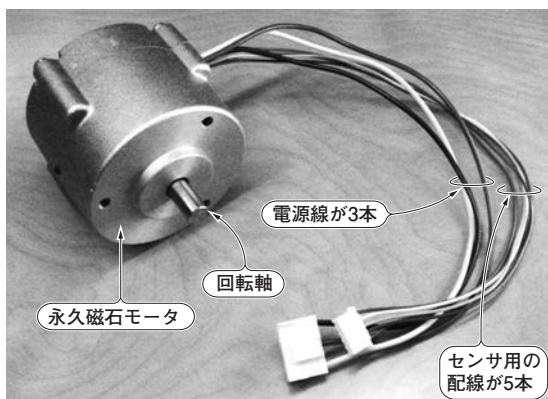


写真1-2 永久磁石モータ BML-KIT (津川製作所)
内部には位置センサが内蔵されている

- (1) モータ回転速度/位置(角度)センサが必要なもの
- (2) (1)のセンサが不要なもの

(2)のセンサを使わないでモータを制御する技術を「センサレス制御」と呼びます。

ここでいうセンサとは、モータに取り付けられた回転軸の回転速度/位置(角度)センサを指します。これらのセンサを搭載している永久磁石モータの外観を写真1-2に示します。このモータの内部には、回転子の磁石の位置を検出するホールICセンサ(1-6節参照)がプリント基板上に実装された状態で搭載されています(写真1-3)。モータの主配線の3本(3相交流)以外に、センサ用の配線5本がモータ本体から出ています。

センサレスのモータは、センサを実装したプリント基板やセンサ用の配線は必要ないので、モータを小型化できるなどのメリットがあります。

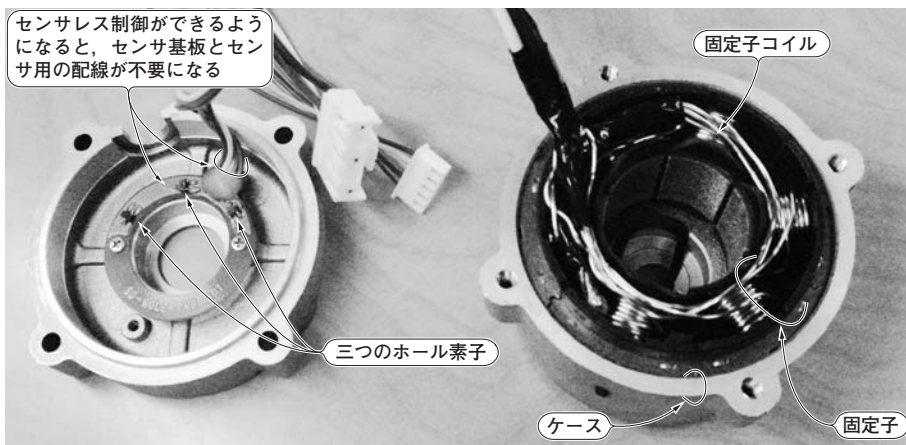


写真1-3 永久磁石モータのふた(フランジ)の裏面にはセンサ基板が取り付けられている
BML-KIT (津川製作所)

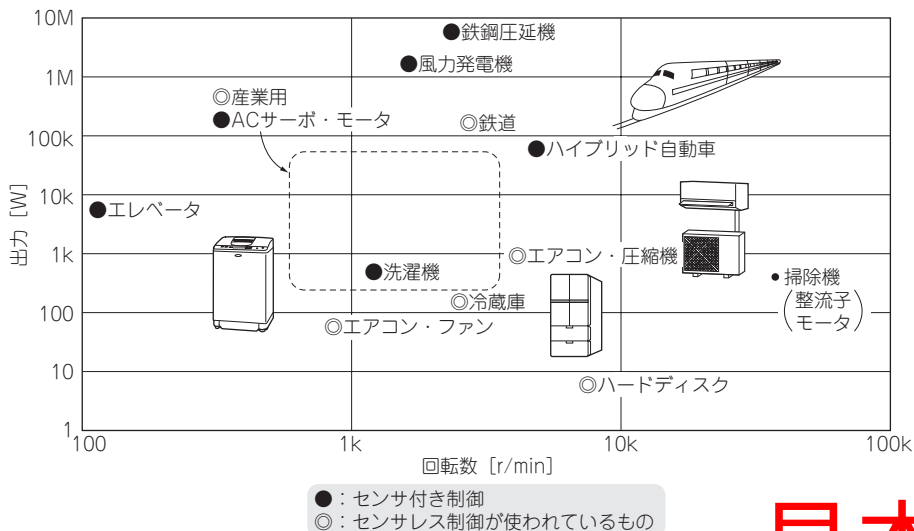


図1-1 製品で異なるモータの仕様例
モータ応用製品を回転数と出力で分類

見本

図1-1に容量[W]と回転数[r/min]の仕様で異なるモータ応用製品例を示します。多くの製品がセンサレス制御を導入しています。

1-2 センサレス制御のメリットとデメリット

● メリット…小型/高信頼/調整作業の省力化

センサレス制御採用のメリットを次にまとめます。

(1) 使用環境の拡大

エアコン圧縮機(コラム1-1参照)のように、物理的にセンサの設置が困難な用途というのは多数あります。例えば、自動車用の電動オイル・ポンプなどの場合には、モータがエンジン付近で高温にさらされるので、センサレス化が望まれています。

取り付けスペースの問題として、センサが邪魔になる場合もあります。決められたスペース内に、コンパクトにドライブ・システムをまとめる目的で、センサレス制御が採用される場合もあります。

(2) 調整作業の省力化

回転位置センサを取り付けるときは、ロータの磁石位置を正確に合わせる必要があります。この作業はモータ個別の調整作業となるので手間がかかります。センサレス化により、この作業を排除できます。

(3) 信頼性の向上

センサ付きの場合には、センサが壊れたときの保護や、センサ線の断線時の保護など、あらかじめ対応が必要です。部品数削減、特にセンサ数の削減は、一般には信頼性向上に貢献するとされています。また、信頼性向上という考え方では、センサ付きシステムにおける異常時のバックアップ用としても、センサレス制御を搭載したいという要望もあります。

(4) 普及率が高い誘導モータに置き換えやすい

産業分野では、誘導モータ(写真1-4)の普及率が高

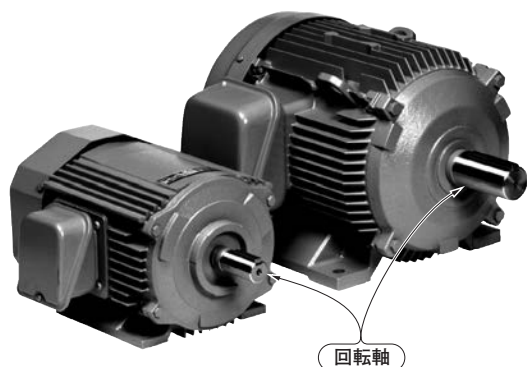


写真1-4 交流モータの代表である誘導モータ

センサレス制御を導入することで、誘導モータをより高効率な永久磁石モータに簡単に置き換えられる(ザ・モートルNeo100 Premium, 日立産機システム)

く、世界中の工場やプラントで用いられています。これに対して永久磁石モータは、小型・高効率であるという大きなメリットがあるので、徐々に普及し始めています。

オープン・ループ制御で簡単に可変速駆動ができる誘導モータに対して、永久磁石モータは位置センサが原理上必要になります。これは、既設の誘導モータをそのまま永久磁石モータへ置き換える場合に大きな障害になります。

誘導モータでは不要であったセンサや、センサへの配線を新たに設置しなければなりません。単純に誘導モータを永久磁石モータに置き換えるには、センサレス制御が重要な技術になります。

写真1-5に示す汎用インバータには、永久磁石モータのセンサレス駆動の機能が内蔵されています。近ごろは、永久磁石モータの生産台数が伸びているので、このような機能が汎用インバータにも要求されています。

● デメリット…低速駆動が苦手/制御応答の低下

よい話ばかりを書きましたが、センサレス制御にも欠点があります。

(1) 最高速度10%以下の低速駆動は苦手

センサレス制御は、最高速度に対して約10%以下の低速駆動は苦手です。家電や産業用で用いられているのは、中高速域でのセンサレス制御が圧倒的に多く、低速域はオープン・ループ制御が使われています。これは、現状のセンサレス制御が、モータの速度起電圧



写真1-5 誘導モータを可変速駆動できる汎用インバータ。誘導モータの可変速駆動に加え、永久磁石モータのセンサレス制御の機能も搭載されている(WJ200シリーズ, 日立産機システム)

見本

コラム1-1 センサレス制御技術の初導入は1983年製のルーム・エアコン

ルーム・エアコンに、センサレス制御が採用されるようになった理由を説明します(図1-A)。

ルーム・エアコンの心臓部は、冷媒の圧縮機駆動部分です。圧縮機では、約1kWのモータが使われますが、開発当初はAC100Vで直接駆動する単相誘導モータを用いていました。回転速度制御は行わず、単純なON/OFF制御だけで、圧縮機を駆動していました。このON/OFF制御の繰り返しは、エネルギー消費量をむだに増加するので、可変速駆動が望まれていました。

1982年に、インバータ・エアコンが世界に先駆けて発売されました⁽¹⁾。このとき、誘導電動機のVVVFインバータによる可変速駆動が実現されました。日本独自の白物家電のハイテク化が、ここから始まったとも言えます。テレビCMの中でインバータというパワー・エレクトロニクスの専門用語が使われ、お茶の間に流れたのもこの製品が最初でした。

翌1983年には、DCインバータ方式と命名されたエアコンが発売されました。これはブラシレスDCモータを採用したインバータという意味です。このときに世界最初のセンサレス制御が採用されました⁽²⁾。

なぜ、センサレス化が必要だったのでしょうか？

エアコン圧縮機駆動のモータは、圧縮機本体と一体化されて密閉容器の中に封入されています。モータも高温・高圧の冷媒にさらされます。

この密閉容器内にホールICのような位置センサを取り付けることは不可能です。つまりブラシレスDCモータを採用すること＝センサレス制御を採用することだったと言えます。

エアコンへのブラシレスDCモータ(≒永久磁石モータ)の採用は、センサレス制御の幕開けだったと言えます。

1996年のPAM制御(Pulse Amplitude Modulation ≒パルス振幅変調)の採用から、白物家電の省エネルギー競争が激化しました。2000年以降には、より効率の高い正弦波駆動が採用され始めます。制御方式も、正弦波駆動に対応したものが新たに採用されました。このとき、モータの相電流を直接検出しない相電流センサレスも同時に実用化されています(図1-9の1シャント方式に相当。位置センサレスと相電流センサレスを合わせてレス&レス制御と呼ぶ)。このころから、32ビットの高機能マイコンの値段が大幅に下がり、複雑な制御の搭載が可能になりました。それに合わせて、エアコンを初めとして、さまざまな製品にセンサレス制御が展開されていきました⁽⁴⁾。

〈岩路 善尚〉

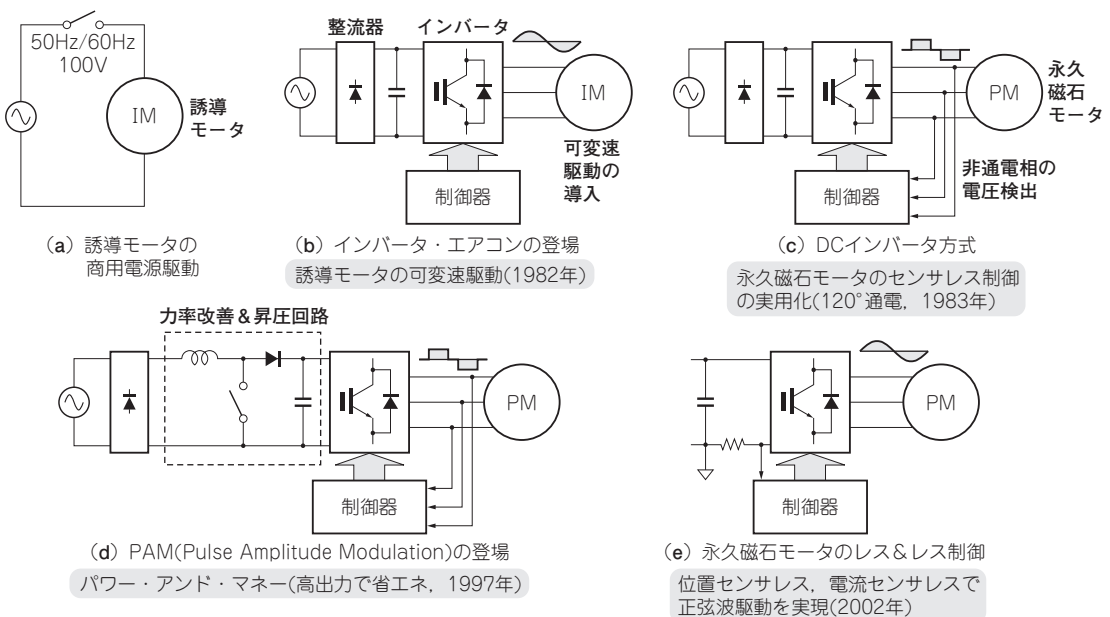


図1-A ルーム・エアコンにおけるセンサレス制御の変遷
センサレス制御を逸早く導入し、改良を続けているエアコン圧縮機の駆動技術

見本

を利用しているためであり、原理的な問題でもありません。

例えば、ACサーボモータのように、極低速域から高応答な制御を必要とする用途には向きません。サーボ動作できるセンサレス方式のモータが数社から製品化されていますが、モータそのものの専用設計も含めて、非常に高度な技術が必要とされています⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

市販の永久磁石モータを使って、センサレスでサーボモータのような動きをさせるのは、今のところ困難です。

(2) 応答性はセンサ付きより悪い

センサ付きの制御に比べると、原理的に速度推定(あるいは位置推定)という制御ループが一段階必要になります。全体の応答性能は、センサ付きよりも低下する傾向になります。センサレス制御が適用可能かどうかは、その適用システムの要求仕様から、可否判断する必要があります。決して万能な技術ではないということは認識しておく必要があります。

(3) モータの特性ばらつきがそのまま制御誤差になる

センサレス制御では、位置・速度センサの代わりとして、モータの電流、電圧と、モータのパラメータ(R や L など)を用いて、位置・速度を推定演算するので、これらのモータのパラメータの設定誤差の影響は少なからず受けてしまいます。それは、そのまま推定誤差になる場合があります。

巻き線抵抗 R は、温度によっても変化するので、温度の変動範囲などもあらかじめ考慮して制御系を設計する必要があります。

1-3 永久磁石モータの用途を広げるセンサレス制御

● 直流モータと交流モータの違い

モータには数多くの種類があります(図1-2)。これらのモータは、すべてフレミング左手の法則に従って回転力(トルク)を発生させています。

式(1-1)を実現しているのがモータであると言えます。

$$\text{トルク } T_m = \text{磁束 } \phi \times \text{電流 } I \dots\dots\dots (1-1)$$

モータの種類の違いは、式(1-1)における磁束と電流の発生手段の差であると言えます。

図1-2に示すように、モータは大別して交流モータと直流モータに分類され、交流モータは交流電流を、直流モータは直流電流によってトルクを発生させます。

直流モータも交流モータも、磁束と電流の間に働く電磁力によって回転するモータです。直流モータは磁束を発生する磁石が物理的に固定されており、電流を流すコイルの方が回転します。

交流モータはその逆で、コイルが固定されていて、

磁束の方が回転します。直流モータで回転を維持するには、磁束との位置関係に応じてコイルに流れる電流の向きを切り換える必要があります。それを機械的なスイッチ(ブラシ)で実現しています。交流モータでは、電流そのものが正負に変化することを利用して回転力を得るので、ブラシは不要です。

1 直流モータ

直流モータでは、磁束(界磁)を永久磁石で作るもの(永久磁石界磁)と、独立した巻き線で作るもの(巻き線界磁)とに分けられます。このモータは、磁束が機械的に固定されており、通電する巻き線(電機子巻き線)の方が回転します。巻き線は複数個あり、ブラシによって通電する巻き線を切り換えています。

2 交流モータ

交流モータは、誘導モータと同期モータに分類されます。両者の違いは、モータに印加した交流周波数に対して、回転子が同期して回転するもの(同期モータ)と、同期しないもの(誘導モータ)の違いです。誘導モータは、同期する周波数よりも少し低い周波数で回転します。同期モータは、交流の周波数にぴったり同期して回転します。同期から外れた状態を脱調と言い、その状態ではトルクを喪失します。

● 交流モータ① 誘導モータ

回転子に2次巻き線が巻かれているだけの実にシンプルな構造です。構造的に堅牢であり、また、商用電源(200/400 V, 50/60 Hzなど)で直接駆動できます。

● 交流モータ② 同期モータ

界磁巻き線に直流を通電して磁束を作成する「巻き線界磁型モータ」、回転子が単純な鉄芯だけの「シンクロナス・リラクタンス・モータ」、回転子に永久磁石を取り付けた「永久磁石モータ」などがあります。

交流モータは、いずれも回転子側に式(1-1)の磁束があり、それが回転子とともにグルグルと回転します。巻き線は固定子に巻かれており、回転子の回転に伴って磁束が巻き線に鎖交します。その鎖交磁束に対して、タイミングよく交流電流を流すことで、式(1-1)のトルクを発生させます。

式(1-1)の磁束が動かないのが直流モータで、磁束が回転するのが交流モータと言えます。

▶ 永久磁石モータの採用が増えている理由

これらのさまざまなモータの中で、世の中で最も多く使われているモータは、写真1-6に示す直流モータと写真1-4に示す誘導モータです。近ごろは、写真1-2に示す永久磁石モータが徐々に台数を増やしています。

見本

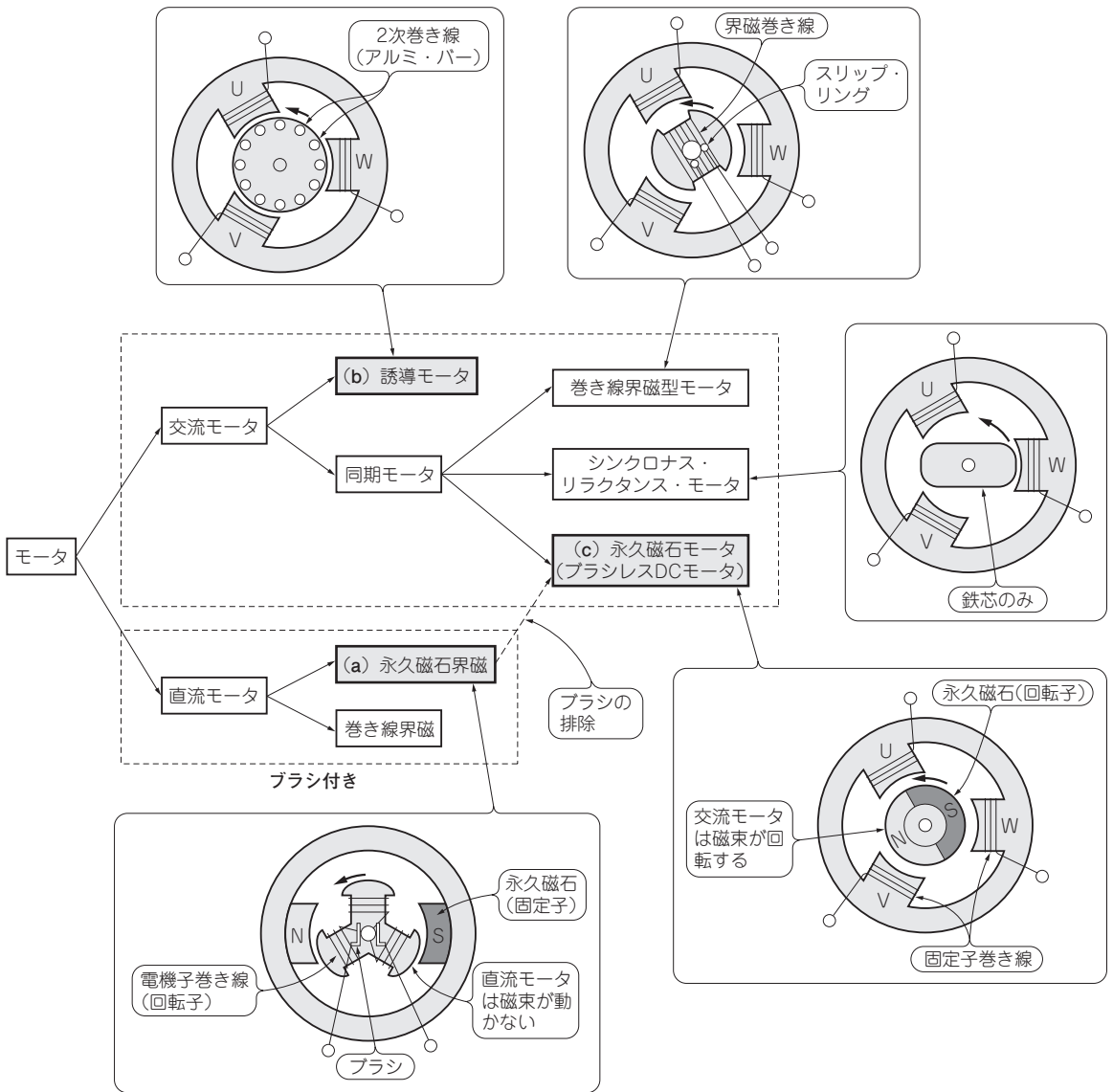


図1-2 モーターの種類

電磁力を利用したモーターは、大別して直流モーターと交流モーターに分類できる



写真1-6 位置/速度センサがなくても駆動できるブラシ付き直流モーター RE-140RA(マブチモーター)

他のモーターに比べて、小型、高効率であることが一番の理由です。

それ以外にも、例えば設計の自由度が高いという特徴があります。細長いモーターや、扁平モーターなど、さまざまな形状のモーターを作ること可能です。また、直流モーターのように機械的に摩耗する部品(ブラシ)がないので、省メンテナンスであることも大きな特徴です。

▶ 欠点は構造を複雑化し信頼性を低下させる回転子の位置検出センサが必要なこと

永久磁石モーターは、優れた特徴を持っていますが、その反面でモーター回転子の位置(角)を検出する位置

見本

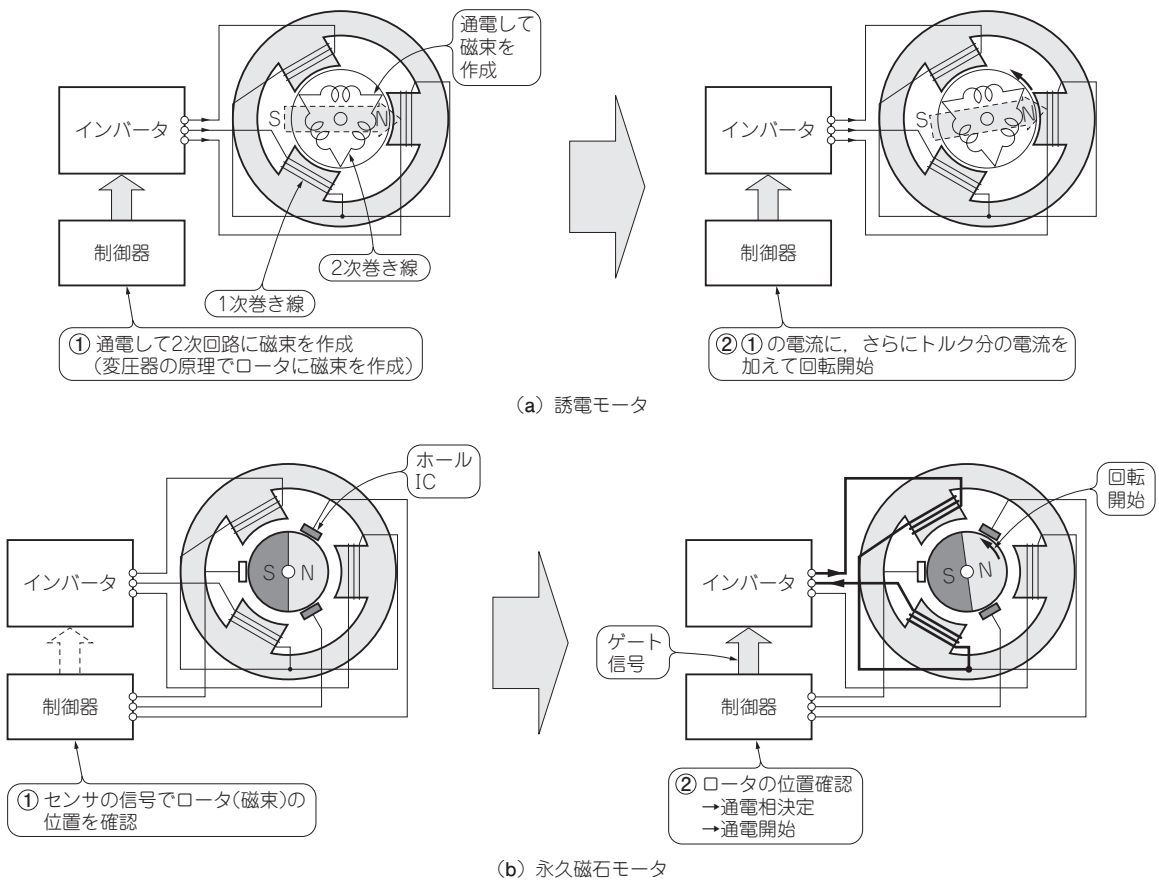


図1-3 誘導モータと永久磁石モータの制御方法の違い
磁束の考え方や扱い方が大きく異なる

ンサが原理的に必要であるという欠点を備えています。永久磁石界磁や巻き線界磁方式の直流モータも、誘導モータも、位置センサや速度センサがなくても駆動できます。しかし、永久磁石モータだけは、原理上センサが必要なモータのために、普及拡大の妨げになっていました。

そこで登場したのがセンサレス制御です。センサを使う制御では、信号用の配線ケーブルが必要なのでモータの設置場所に制限がかかるという欠点がありました。永久磁石モータの唯一とも言える欠点をセンサレス制御の技術が克服しました。この制御の実現で、永久磁石モータは理想のモータに一歩近づきました。

▶なぜ永久磁石モータでは位置センサが欠かせないのか？

モータの回転力は、前述の式(1-1)で発生します。誘導モータには磁石がなく、代わりに回転子には2次巻き線があります[図1-3(a)]。この2次巻き線に、固定子側の1次巻き線コイルから電流を誘起し(変圧器として動作させる)、2次巻き線に磁束を発生させます。この磁束と1次巻き線の電流でトルクを発生さ

せます。

式(1-1)に示すモータの磁束も、制御する側が作ります。雑な言い方をすれば、磁束を作りたい位置に、制御する側から好きなように作ることができます。制御する側が、「ここに磁束を作る」と決めているので、センシングする必要はありません(誘導モータのトルク発生メカニズムは、永久磁石モータよりも複雑)。

永久磁石モータの場合には、磁束は永久磁石によって初めから存在しています。その磁束(回転子)がどこを向いているのか、制御側にはセンシングする以外に知る手段がありません[図1-3(b)]。トルクを得るには、その磁石の位置に合わせて、コイルに電流を流さねばなりません。回転子に取り付けられた磁石のN/Sがどこにあるのか、それを検出するのが位置センサです。位置センサの情報を頼りに、インバータでは通電する巻き線の相を決定しているのです。

センサがなければ、どの相に電流を通電すればトルクが発生するかが判断できず、思うように駆動できません。起動できないばかりか、逆転してしまう場合があります。永久磁石モータは、原理的に位置情報が

見本

種類 駆動方法	直流モータ	誘導モータ	永久磁石モータ
(a) ON/OFF制御			
(b) オープン・ループ制御による可変速駆動			
(c) フィードバックによる可変速駆動			

図1-4 モータの制御方法

ON/OFF制御から、本格的なフィードバック制御までさまざまな制御手法が用いられている

要です。

1-4 永久磁石モータはフィードバック制御で駆動するのが大前提

永久磁石モータ(DCブラシレス・モータ)は、直流モータや誘導モータと比べると駆動方法に限られます。適切な制御を行いながらの駆動でないと高効率という最大のメリットを活かせません。他のモータとの制御方法の比較を図1-4に示します。

● ON/OFF制御では回せない

本来モータは、電源をつなげば回るように作られていました[図1-4(a)]。直流モータは、電池をつなげば回りますし、交流モータの一つである誘導モータも、交流電源につなげば回転します。ところが、永久磁石モータは、50 Hz/200 Vの3相商用電源などの交流電源を直接つないでも、まともに回転しません。このモータは初めからインバータや回転軸の位置センサなど

を用いることを前提に作られたモータです。そういう意味では手間がかかりますが、その手間を払拭してしまうだけのメリットがあります。

モータをON/OFFで制御するのであれば、直流モータや誘導モータを用いれば十分ですが、例えば、回転数を変えたいとか、トルクを自在に制御したいという場合には、これらのモータに加える電圧を細かく制御する必要があります。

● オープン・ループ制御は不安定で効率が悪い

直流モータは、加える電圧と回転数がほぼ比例関係にあります。図1-4(b)のように、可変電圧電源を用意すれば、電圧に応じて回転数が変化します。ただし、回転数を一定に制御するのは難しく、負荷を増やすと、回転数は下がってしまいます。

誘導モータの場合は交流電源が必要ですが、回転数を変えるには、交流電源の周波数と振幅の両方を調整しなければなりません。これは、ほとんどの直流モ

見本

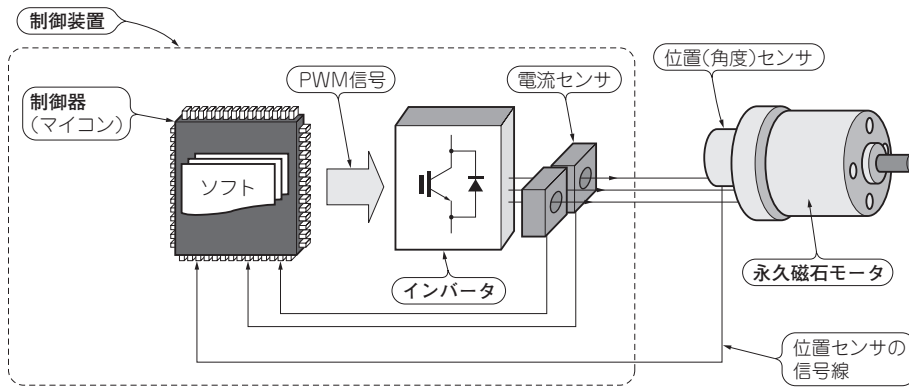


図1-5 永久磁石モータ・ドライブ・システムの基本構成
永久磁石モータの回転数やトルクを自在に制御する

タがもつ共通の特徴です。この交流電源として、インバータが用いられます。インバータは、周波数と電圧を自在に調整できる交流電圧源とみなすことができます。

誘導モータには統一された規格があります。それを可変速駆動するためのインバータとして、各社から汎用インバータ(写真1-5)が発売されています。これを導入すれば、誘導モータを可変速駆動できます。この汎用インバータは、交流電圧の周波数と振幅を同時に可変できるVVVF機能(Variable Voltage Variable Frequency)を備えた交流電源装置として動作します。

このように、直流モータであれば可変電圧源を、誘導モータであれば汎用インバータを導入すれば、大ざっぱな可変速駆動は実現できます。回転数の検出をすることなく、加える電圧だけで可変速駆動するような制御を、オープン・ループ制御と言います。

ところが、永久磁石モータでは、VVVF機能のインバータを用いても、オープン・ループによる簡易的な駆動は難しいです。全く不可能というわけではないのですが、負荷変動に対して非常に不安定になります。安定に駆動するには、無効電流をたくさん流す必要があります。非常に効率の悪い駆動方法になってしまいます(同期駆動)。この方式では、永久磁石モータのメリットである高効率を活かせない駆動方法となるので、一般的には使用されていません。

● 永久磁石モータはフィードバック制御で回す

前述のオープン・ループ制御に対して、回転速度や位置をセンサで検出し、制御に帰還をかける方式をフィードバック制御(クローズド・ループ制御)と言います[図1-4(c)]。フィードバック制御によって、回転数は目標通りの速度に常に保たれることになり、ドライブ・システムの安定性や回転速度への追従性が大きく向上します。

永久磁石モータの場合には、このフィードバック制

御が基本の制御構成になります(図1-5)。永久磁石モータの場合には、電源としてインバータが必要ですが、さらに、モータのロータ位置(回転角度)を検出する位置センサ、モータの電流センサ、さらには、マイコンなどの制御デバイスが必要です。

誘導モータを駆動する汎用インバータは、図1-5の制御装置の部分とほぼ同じものが一つの装置にまとまっているものです。位置センサの接続部分はありませんが、製品によっては、フィードバック制御も可能なものもあります。

1-5 センサを使わずにフィードバック制御をかけるのがセンサレス制御

● オープン・ループ制御とフィードバック制御の違い
オープン・ループ制御[図1-4(b)]は、センサを使いませんが、これをセンサレス制御と呼ぶことはありません。次に、オープン・ループ制御とフィードバック制御の違いを解説します。

次の制御方法の解説を読み進める上で必要なキーワードである①目標値、②操作量、③出力、の関係をまとめます(図1-6)。

- ① 目標値(指令値)：制御したい量に対する目標の値(図1-6では、 y^* や ω_r^*)
- ② 操作量：制御対象に与える量(u , v)
- ③ 出力：制御したい量そのもの(y , ω_r)

(a) オープン・ループ制御

オープン・ループ制御の考え方は、先述③の出力を検出することなく、「この目標値に出力を一致させるには、この操作量でいいはずだ」という考えで操作量を決めます。この場合は、出力が目標値に必ずしも一致するとは限りません。

一致しても、していなくても気にしないのが、オープン・ループ制御です。例えば、直流モータのオープン・ループ制御の場合には、負荷トルクが増える

見本

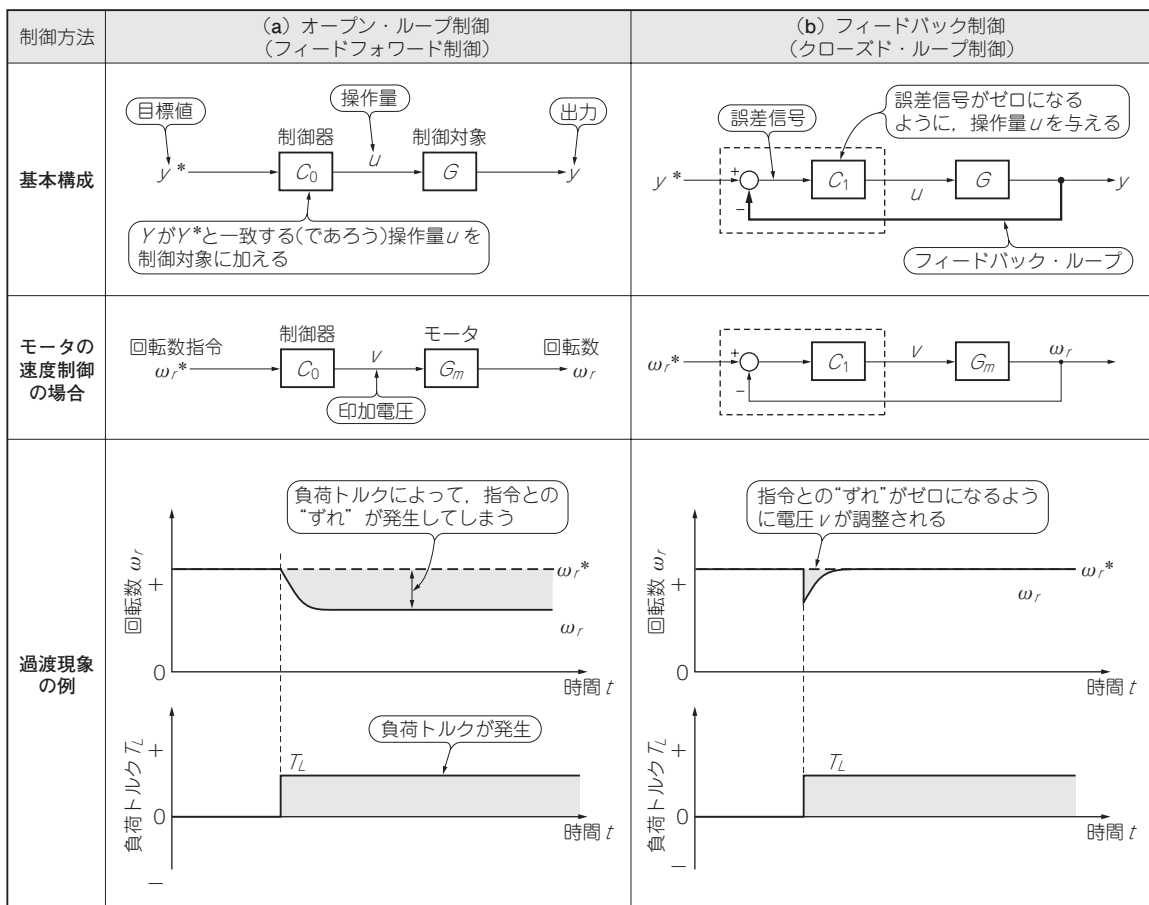


図1-6 制御構成と過渡現象の違い
オープン・ループ制御とフィードバック制御は制御性が大きく異なる

回転数が低下してしまいます [図1-6(a)]. これは負荷の増加に伴い電流が増え、モータの巻き線抵抗による電圧降下が無視できなくなるためです。

(b) フィードバック制御(クローズド・ループ制御)

フィードバック制御では、出力をセンサで検出して、目標値との差を見て、操作量(電圧)を決定します。これにより目標値への追従性が圧倒的に改善されます。

例えば、図1-6(b)のように、負荷の変動に対しても目標値に追従します。このような動作を、制御の世界では、「ロバスト性(制御の頑強さ)がある」と言います。この言葉は、負荷変動や温度変化などのさまざまな要因に対して、目標通りの駆動を続けられる制御系を指すときにも使います。

● ホントのセンサレス制御

センサが付いていないにもかかわらず、センサが備わったような動作(フィードバック制御と同じ動作)をする制御系をセンサレス制御と呼び、オープン・ループ制御と区別します。

センサレス制御では、フィードバック・ループがあるかのように速度制御が実現できる

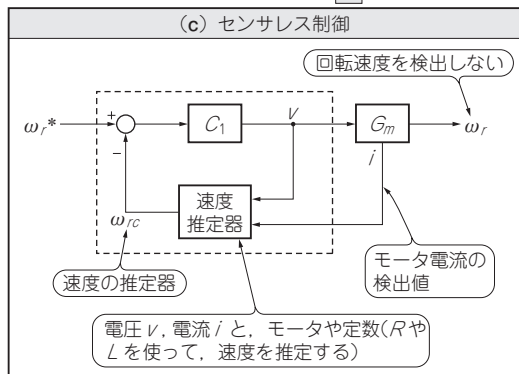


図1-6(b)のようなロバストな動きを、回転数検出センサを使わずに実現しようというのがセンサレス制御です。

装置の構成としては、センサがないのでオープン・ループ制御と同じですが、その過渡現象はフィードバック制御と同じ性能が実現できます。

見本

ISBN978-4-7898-4634-9

C3055 ¥3600E

CQ出版社

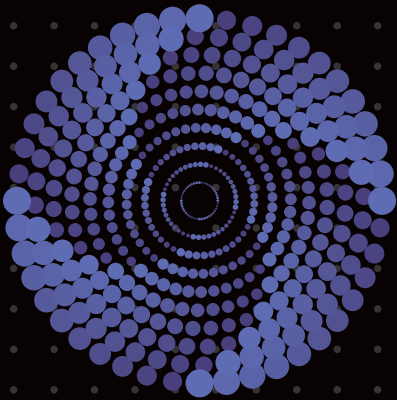
定価：本体3,600円（税別）



9784789846349



1923055036000



永久磁石モータを自在に制御するには、モータの回転軸に取り付ける「回転位置センサ」を使います。それをソフトウェアに置き換えて、あたかもセンサが付いているような動きを実現する技術が「センサレス制御」です。センサレス化には多くのメリットがありますが、反面、制御が複雑であり、実現するにはさまざまなノウハウが必要です。本書では、その原理からソフトウェアの構築手法まで、実験を交えて解説します。

本書の内容を試せるキット 好評発売中!



センサレス制御もできる! 3相インバータ実験キット 「INV-1TGKIT-A」

本キットを使うとモータのセンサレス制御や太陽光パネルの電力制御を試せます。浮動小数点演算回路を内蔵したマイコンRX62T(ルネサス エレクトロニクス)搭載の3相インバータ実験ボード、ブラシレスDCモータ、ブラシ付きDCモータ、ACアダプタ、開発用ソフトウェア、マニュアルが付属して、**見本**オシロスコープも付属しています。時間波形を確認できるソフトウェアも付いています。

直接販売商品
▶ 詳細はこちら
<http://shop.cqpub.co.jp/detail/1406>