

即戦力! 研究や実務に役立つエレクトロニクスの参考書

2017
Autumn
No.140

トランジスタ技術 SPECIAL

ブラシ付き/ブラシレスからベクトル制御まで! 静かに力強く回す

トコトン実験! モータの メカニズムと高効率駆動

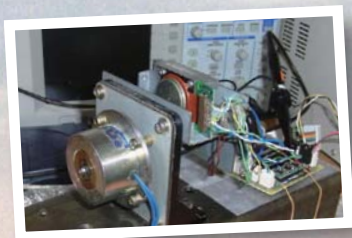
IoT/AI時代の
モバイル&ロボット作りに!



ご購入はこちら。
<http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSP201710.htm>

**実務
教科書**
「学ぶ」を応援!

CQ出版社



特別増ページ
電気屋に贈る
機構図面の
描き方本

第1章 性質を理解して上手に組み合わせよう

モータは電源や駆動回路とワンセット

森本 雅之 Masayuki Morimoto

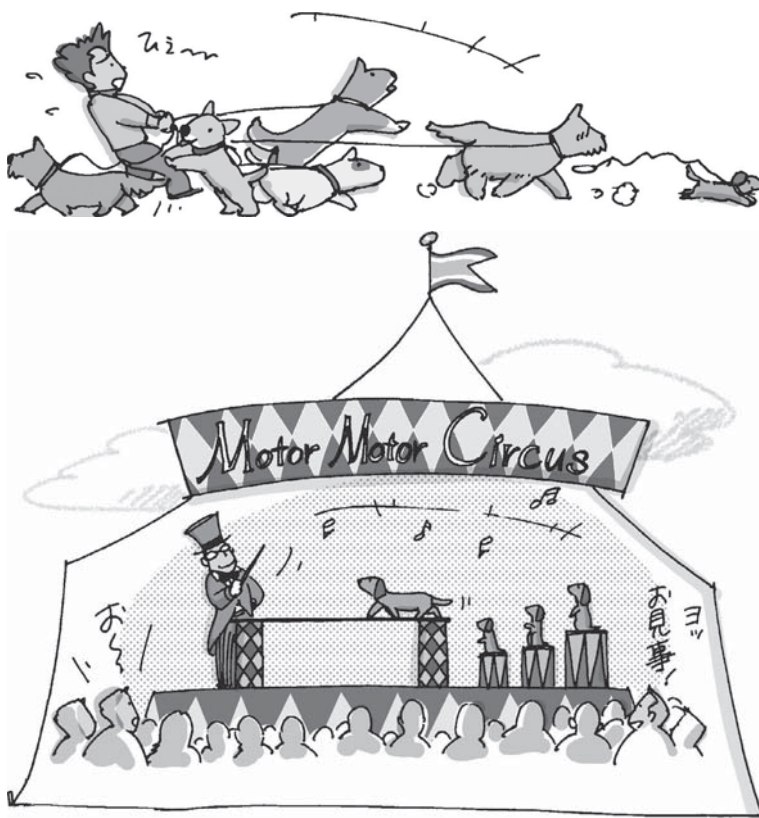


図1 モータは使いかたによって宝にもゴミにもなる

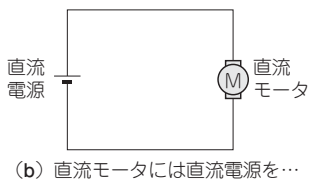
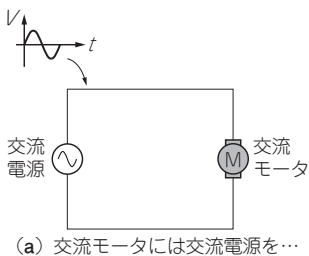


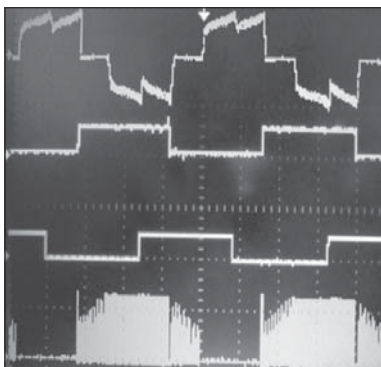
図2 モータの多くは、直流電源では回らない
モータの種類で使う電源は異なる

● 組み合わせる電源や駆動回路で宝にもゴミにも
モータの種類はたくさんありますが、直流電源でも交流電源でも回るものはほとんどありません。つまり、直流電源で回るように作られたモータの多くは交流電源では回りません。逆に、交流電源で回るように作られたモータの多くは直流電源では回りません(図2)。

図3に示すように、直流電源を交流電源に変換する電子回路(インバータ)を追加すれば、直流電源で交流モータを回すことができます。

さらに、この電子回路をマイコンなどを使ってインテリジェント化すれば、モータに流れる電

見本



第2章

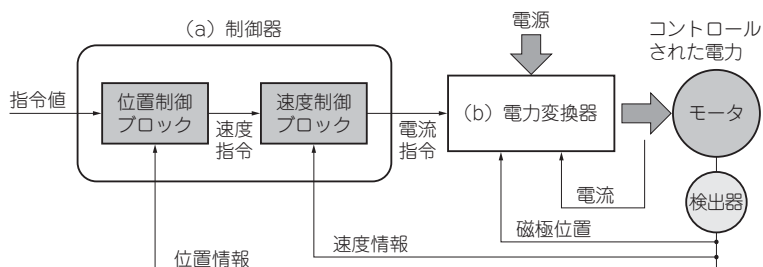
ブラシ付き / ブラシレス / ステッピングを
操るための第一歩

駆動方法と回転性能を改善する フィードバック制御の基礎

百目鬼 英雄 Hideo Dohmeki

図1 モータに加える電圧や電流の量を自動
調節「制御」する電子回路

負荷が重くなっても回転数を一定に保てたり、一
定時間に狙った回転数まで上げたり、意のままに
操ることができる



本章では、ブラシ付き、ブラシレス、ステッピングの代表的な三つのモータの回転数を上げたり下げたりする駆動の方法と、速度などの回転性能を改善できるフィードバック制御の基礎を解説します。

ラジコン用のモータは電池をつなぐだけでグルグルと回り出しますが、回転軸を指でつかむと回転速度が落ちてしまいます。そこで電池を1個増やして加える電圧を上げてやると、回る力が強まり回転数が上がります。ここでは、加える電圧や電流の量を電子回路(図1)を使って自動調節する「制御」をかけます。負荷が重くなっても回転数を一定に保てたり、一定時間の間に狙った回転数まで上げたり、意のままに操ることができます。

本章では、たくさんの機器に組み込まれているブラシ付き、ブラシレス、ステッピングの3種類のモータを駆動する方法に加え、回転数やトルクを飛躍的に改善できるフィードバック制御の基礎を紹介します。

〈編集部〉

実験1 ブラシ付きモータの駆動と制御

■ 基礎知識

● 直流電圧を加えるだけで回る

ブラシ付きモータには、N極とS極の永久磁石と回

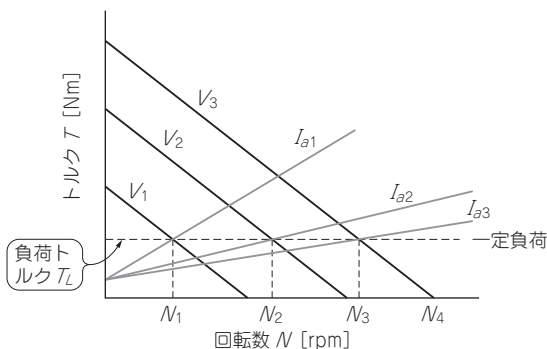


図2 ブラシ付きモータの速度-トルク特性

トルク-速度特性は加える直流電圧の大きさによって調節できる

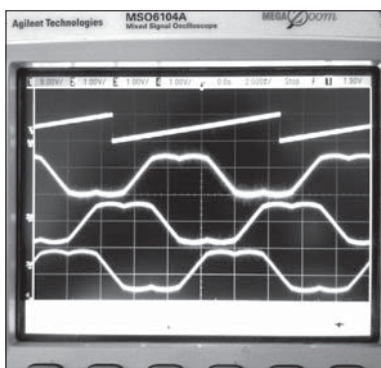
転子(ロータ)が置かれています。ロータは銅線が巻かれた電磁石であり、永久磁石が作る磁界の中に置かれています。

ロータの巻き線に電流を流すと、有名なフレミングの左手則に基づく力(トルク)が発生して回り出します。電流の向きを逆にとすると、この電磁石(ロータ)が帯びる極性が入れ替わります。

ブラシと整流子と呼ばれる部品を使って、ロータと永久磁石の位置関係によってタイミング良く電流の向きを入れ換えることで回転を持続させます。

このような構造をしているので、ブラシ付きモータは直流電圧を加えるだけで回ります。

見本



第3章

発熱や振動が減って電池も長持ち! 磁力が
ロータにパッチリ伝わりスムーズに

エネルギーが無駄なく回転 に変わる「ベクトル制御」

江崎 雅康 Masayasu Esaki

モータは古くて新しい技術です。プラモデルに使われてきたDCブラシ付きモータ、洗濯機、冷蔵庫など家電製品に長く使われてきた交流誘導モータ、工場やビルの動力源として使われている3相誘導モータなど、多くのモータが使われてきました。

このモータが大きく変わりつつあります。その中心はDCブラシレス・モータです。2005年の少し古いデータですが、日本の総電力使用量のうち、57%はモータが消費しています。現在もっとも多く使われているのは誘導モータですが、これをすべてDCブラシレス・モータに置き換えると、10%~50%の効率改善が期待できると考えられています。

DCブラシレス・モータが登場してからセンサレス制御方式や矩形波駆動から正弦波駆動への進化など、その駆動方式にはさまざまな改良が加えられてきました。この改良の上に開発されたのが本稿で紹介するベクトル制御技術です。

ベクトル制御を導入するメリット

● 省エネかつきめ細かなトルク制御が可能

▶ 正弦波駆動より6%高効率

図1は、ベクトル制御の省エネ効果を測定したデータです。ベクトル制御の一手手前の正弦波駆動との比較です。

正弦波駆動とは、正弦波状に連続的に電流を変化させてモータを駆動させる方式です。波形をみると正弦波そのものとなります。

一方、ベクトル制御は界磁コイルに流れる電流値とロータ位置から、きめ細かにベクトル演算を行い、回転する力を最大限に生み出すモータ駆動電流を計算で導き出す方式です。結果として正弦波に近い形となりますが、正弦波とは異なります。

図1を見ると、すでにエネルギー効率がかなり高い正弦波駆動と比べて、ベクトル制御では回転数300 rpm (回転数/分)で6%の効率改善になっています。省エ

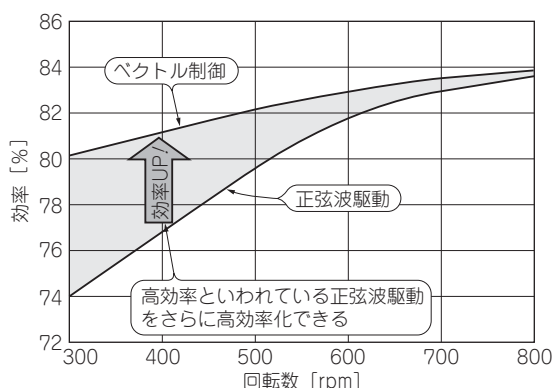


図1 ベクトル制御のメリットは省エネ効果!
正弦波駆動と比べてさらにエネルギー効率6%改善

ネ技術はこのような細かい技術の積み重ねです。

モータのエネルギー効率は、モータ本体の特性、スイッチング素子の特性などが影響します。モータやスイッチング素子、駆動回路を可能な限り同じ条件にして測定したデータです。

▶ デリケートな用途もOK! きめ細かなトルク制御

ベクトル制御のもう一つの効果、それはきめ細かなトルク制御が可能であるという点です。そよ風機能を備えた扇風機、歯科治療ドリル用のモータなど、多くの分野で開発がすすめられています。

*

デメリットは、誘導モータと比べて永久磁石が必要、駆動回路が複雑、ソフトウェア開発が必要、その結果コストが高くなることです。また高効率で小型のモータを作るためにはネオジウムなど希土類が必要になります。しかしモータの省エネ技術は時代の趨勢ですから、この流れは変わらないでしょう。

● 省エネ駆動が可能になる理由…磁力が常に回転方向に働くようになる

ベクトル制御の教科書を見ると、座標軸変換の式が必ず出てきます。数式を使うと機械的に結論が導き出されますが、すっきりしないような後押しが

第4章

モータ & PIC 用
デバッグ付きで 89.99 ドル！

実験！センサレス・モータ制御スタータ・キット DM330015 試用レポート

百目鬼 英雄 / 鈴木 憲吏 / 櫻井 清 Hideo Dohmeki / Kenji Suzuki / Kiyoshi Sakurai

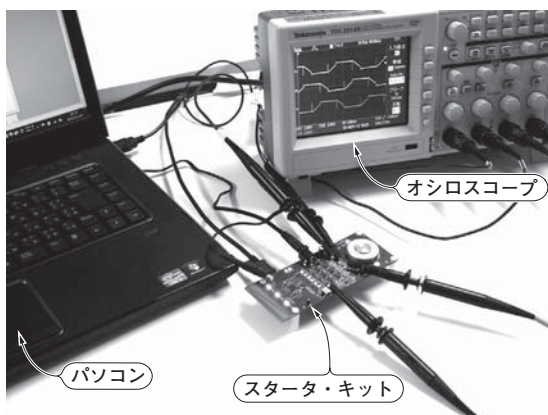
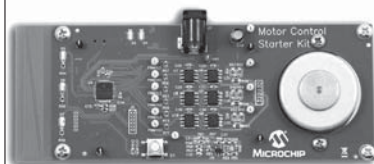


写真1 実験装置の全景

● モータ & デバッグ搭載で 89.99*ドルのキット

ワンチップ・マイコンを動かすためのスタータ・キットがいろいろ誕生していますが、すぐに学習を始められるものはなかなか見つかりません。

そんななか、制御用マイコン、駆動回路、デバッグに加えて、モータが搭載されていて 89.99*ドルという手軽な価格で購入できるスタータ・キット DM330015(マイクロチップ・テクノロジー)が販売されています。ブラシレス・モータを初めて使う方に最適です。

通常、ブラシレス・モータにはロータの位置を検出するホール・センサが付いていますが、このキットに搭載されているモータは、ホール・センサのないセンサレス型です。U、V、Wの各相に電流検出用のチップ抵抗があれば、ベクトル制御まで学習できたのですが、残念ながら対応していないようです。

DM330015は、モータの制御をほとんどプログラムで行うので、制御プログラムをできるだけ詳しく解説します。他のモータと駆動回路が準備できれば、この制御プログラムを異なるモータで試すこともできます。

(櫻井 清)

* 2017年9月時点の価格です。

● 実験の内容

ブラシレス・モータ(BLDCモータ)の構造は、回転子側に永久磁石、固定子側に三相巻き線が施されています。一般的な駆動方法は、磁極を検出するホールICを固定子側に設け、各センサ信号を利用して磁極位置に応じた各相の転流をインバータ回路で実現させています。それに対して、センサレス駆動は、ホールICを使わずに各相の逆起電力を利用してブラシレス・モータをドライブする方法です。

● 実験の方法

本実験では、スタータ・キット DM330015を利用して、各相の電圧やPWM信号を観測しながら高速かつ安定したセンサレス・ブラシレス・モータの駆動方法を検討します。

本実験は、DM330015と電源用ACアダプタ、通信用USBケーブル、パソコン、オシロスコープで構成します。実験のようすを写真1に示します。

DM330015には、9V電源用ジャックとUSB Mini-Bコネクタが搭載されています。ボード上のUSBコネクタは、オンボードUSBデバッグ用に利用します。

今回は、マイクロチップ社のホームページからダウンロードできるセンサレス・ブラシレス・モータ制御用サンプル・プログラム“MCSK_Demo_062911.exe”を利用し、統合開発環境“MPLAB IDE v8.86”とコンパイラ“MPLAB C30 v3.31”で、ビルドとdsPICへの書き込みを行いました。

実験1 ロータの位置を示す信号 ゼロ・クロスを観測

● 実験の方法

センサレス・ドライブの原理を確認します。PWM制御がかかっていない全電圧での速度指令で駆動します。こうすることで、スイッチングの波形が見られず考察しやすくなります。この状態での1相の電圧と、インバータの駆動波形を測定することで、ホールICを使用せずにモータを効率良く回す方法を検討します。

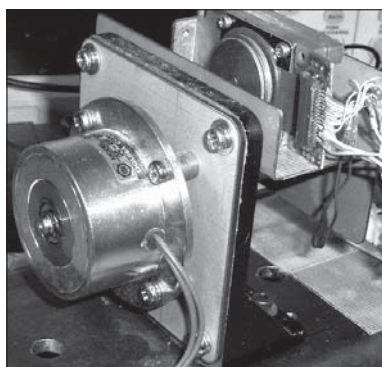
見本

第5章

長寿命&低ノイズでスムーズに回る！
1個から買える！

5 W 小型扁平ブラシレス・モータ DM1 と制御回路

井桁 健一郎 Kenichirou Igeta



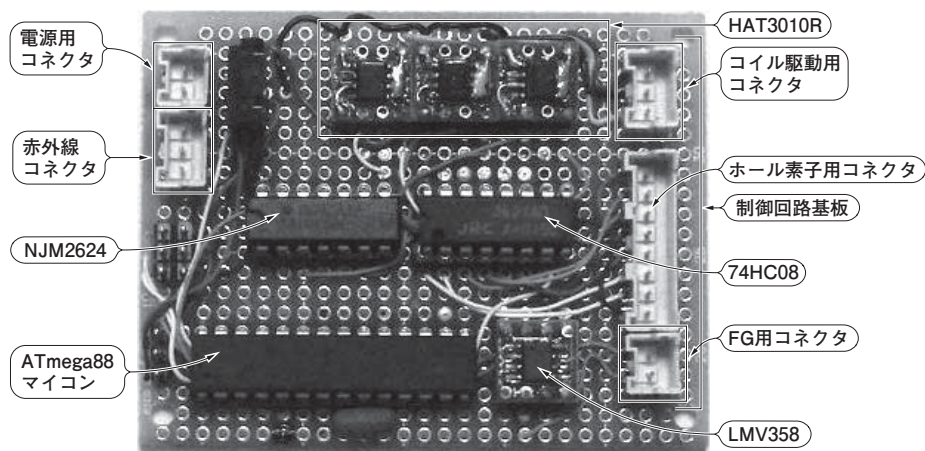
モータの出力を動く機構，例えばタイヤなどに動力を伝達するのは，ギヤを介することが多いでしょう．ギヤを省いてモータからダイレクトに動力を伝達すると構造は簡単です．

市販のモータの中には，モータに合わせたギヤ・ユニットもあります．ブラシ付きモータの場合は，このような専用のギヤ・ユニットもありますが，ブラシレス・モータのものは，あまりありません．そもそもブラシレス・モータ自体が入手しやすくありません．

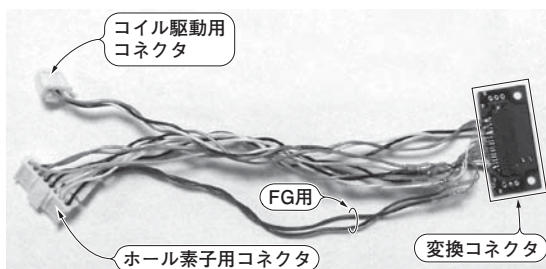
そこで今回は，1個から入手できるブラシレス・モータ DM1 (写真1) を使用しました．



写真1 5 W 出力の小型扁平ブラシレス・モータ DM1
個人でも1個から買える [テクノバッグ, <http://www.technobag.jp/>]



(a) 制御基板



(b) 変換コネクタ&ケーブル



(c) おまけ…赤外線リモコン受光器

写真2 手作りしたDM1の制御基板

見本

第6章

①モータ/バッテリー ②センサ
③コンピュータによる自動制御

「ドローン」が実現できた 三つの理由

三輪 昌史 Masafumi Miwa

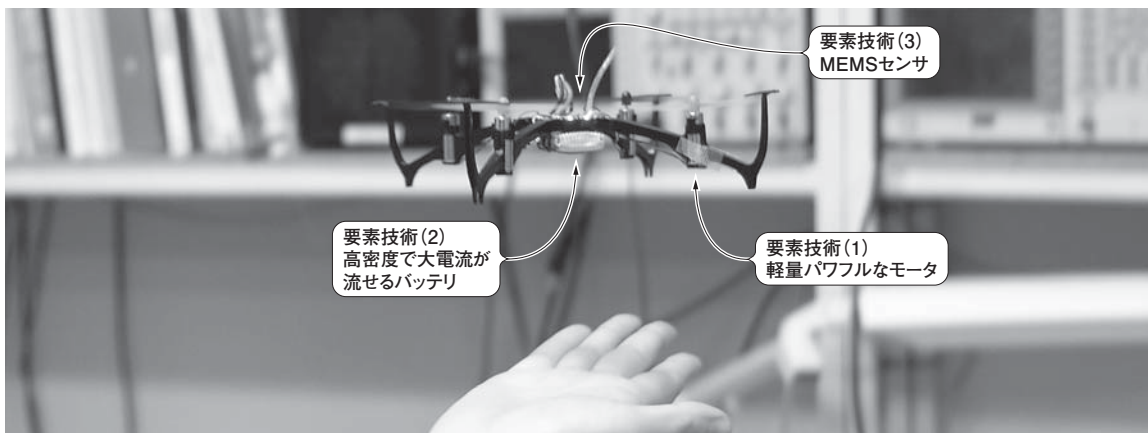


写真1 2010年ごろから登場して注目されているドローンを実現するには最新エレクトロニクス技術が必要不可欠！
要素技術はモータ/バッテリー、センサ、コンピュータによる自動制御の三つ

テレビや新聞などで最近よく話題に挙がっているドローン(写真1)は、モータや電池、センサ、コンピュータなど、多くのエレクトロニクス技術が集結した飛行体です。

ドローンが実現できた理由は、次の三つであると考えられます。

- ① モータとバッテリーの出力向上、小型化、軽量化
- ② センサ(3軸ジャイロ、3軸加速度、3軸地磁気)の性能向上、小型軽量化、低価格化と制御プログラム
- ③ コンピュータ(マイコン)による自動制御

本稿では、この三つの理由について解説します。

〈編集部〉

ドローンの定義

最近テレビや新聞などの報道でドローンがよく話題に挙がっています。「初めての空撮」や、「ドローンを使った配送」といった、新しい応用例を紹介したポジティブな報道や、墜落や事故といったネガティブな報道もあります。

報道で出てくるドローンといえば、ほとんどの場合、複数のプロペラによって飛行する機体のことを指すと思います。この形式の機体は、マルチコプタ(マルチロータ・ヘリコプタ)と呼ばれる、多発型のラジコン・ヘリコプタの一種です(図1)。

● 広義のドローン…「遠隔もしくは自動操縦で移動できる無人機械」のすべてを指す

ドローンという単語自体は、広くは「遠隔操縦または自動操縦で移動できる無人の機械」という意味をもっています。さらに搭載したセンサやカメラからのデータや映像を送ってくる機能があるものがドローンにあたる考えられます。逆にこれらの機能がない機械は単なるラジコンです。人工衛星や無人化施工機械、水中ロボット(ROV)もドローンの一種です。また、福島第一原子力発電所の事故の様子を撮影した無人航空機も飛行機型のドローンです。

● 狭義のドローン…カメラを搭載したマルチコプタ型ドローンを指す

報道でよく出てくるドローンは、ラジコン・ヘリコプタであるマルチコプタに、映像転送が可能なカメラ

見本



第7章 ピンとキリ！ 8,000 円ビギナ向けと 運動性能バグゲンの10万円マニア向け 注目の2大ドローン・キット 「H8C」と「ARRIS X-SPEED FPV250 ミニレーサー」

江崎 雅康 Masayasu Esaki



写真1 エントリー用ドローン
画像撮影ができる！ 格安8,000 円ドローンH8C (JJRC)

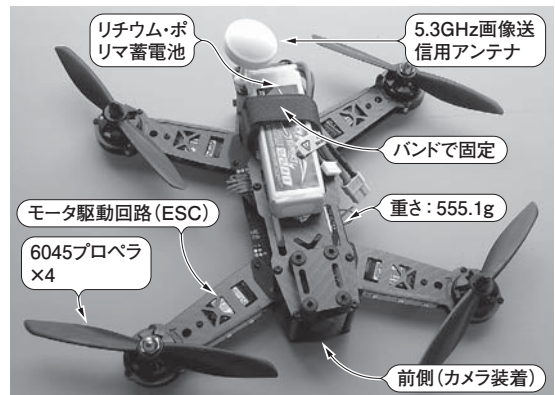
第6章で紹介したマルチコプタ型ドローンの飛行実験を行います。飛行中の電気的な特性の測定や、分解して内部構造の観察を行い、ドローンに使われているエレクトロニクス技術について考察します。
〈編集部〉

● ドローンを支える三つの技術

長い間、電池によるモーター駆動の飛行機が空を飛ぶのは無理とされてきました。「ラジコン飛行機はエンジン」というのが定説でした。

この定説を覆して、電池駆動の無人飛行機「ドローン」が可能になった理由には次のようなものがあります。

- (1) 軽量でパワフルなDCブラシレス・モーター
- (2) 軽量、大容量で大電流放電可能なリチウム・ポリマ蓄電池
- (3) 軽量で丈夫な新素材 (FRP, カーボン樹脂)



(a) 機体構成



(b) 飛行実験のようす

写真2 マニア用ドローン
本格部品全部入り！ドローン用キットARRIS X-SPEED FPV250 ミニレーサー (Tianyu Hi-Tech, 本体25,000 円)

実際にドローンの飛行実験を行い、この三つの技術がどのように使われているかを検証します。具体的には、次に示す二つのマルチコプタ型ドローンを素材に使用し、飛行中のモーター特性やリチウム・ポリマ蓄電池の充放電特性を測定してみます。

見本

第8章

高速応答！高安定！ヨー／ピッチ／ロールとスロットルのリモコン・レバーにビタッと追従

上昇下降！方向転換！加減速！ ドローンのサーボ回路と姿勢制御能力

滝田 好宏 Yoshihiro Takita



写真1 本稿の実験用ドローンReversi(Q4用モータ付き)にX4用のHDカメラによる空撮装置を装着

最近のマルチコプタは、MEMSセンサやマイコンの高性能化によって、姿勢角推定がより高精度になり、安定したホバリングができるようになってきました。リモコン(送信機)からの操縦に対する追従やホバリングの安定化はマイコン内部のソフトウェアで制御演算されますが、モータ、プロペラ、機体の物理的な特性が、制御特性に直接影響を与えます。

ドローンの追従性能は高いほどリモコンで操縦しやすく、思いどおりに運転することができます。そのような快適な操縦性の実現には、ドローン本体側に高い応答性能と安定性能をもつサーボ回路が必要です。

本稿では、小型ドローンのモータをより高出力なものに交換して、追従安定性能が改善するか実験で確認します。

〈編集部〉

実験用の素材ドローン

本稿では、6,000円程度で購入できて、小型軽量で壊れにくく、コアレス・タイプのDCブラシ付きモータを搭載した小型ドローンが持つサーボ回路の追従性能を、飛行実験を交えて解析します。

実験用のドローンにはReversi(写真1)を選びました。比較的機体の大きさに余裕があり、外部機器の取り付けが容易だったためです。

本機体に搭載されたマイクロモータの直径は7mmでQ4(ハイテックマルチブックスジャパン)の交換部品として販売されているモータに交換するとパワーアップを試せます。推力に余裕ができたところにWi-Fiカメラなどを搭載すれば、空撮も試せます。

Reversiは、ほかの機体にはない背面飛行という特徴的な機能を持ちます。背面飛行を実現するには、プロペラを逆転して浮上力を得る必要があります。本機の場合は、モータ駆動回路にHブリッジを採用しています。

制御用ハードウェア

● 制御基板…マイコン/センサ/モータ駆動回路など飛行に必要な機能が凝縮

カバーを外すと、写真2に示す制御基板が見えます。

部品面には、制御マイコンのARM Cortex-M0マイコンSTM32F031K4(STマイクロエレクトロニクス)、3軸ジャイロ/加速度センサICのMPU-6050(InvenSense)、2.4GHz無線モジュールとしてnRF24L01互換のXN297(Panchip)、およびPチャネルMOSFETが並んでいます。

反対側のはんだ面には、NチャネルMOSFETが並んでいます。

図1に、Reversi全体の回路構成を示します。ここでは現物に忠実な回路を描いています。一般的には、MOSFETのゲート端子とマイコン端子の間にダンピング抵抗を挿入しますが、本基板には見当たらないので、直結しているものと考えます。

● CPU…姿勢制御のためにセンサからの情報を集めてモータに指示を出す

Reversi全体の制御は、CPUコアにARM Cortex-M0を内蔵したSTM32F031K4マイコンで行われます。

見本



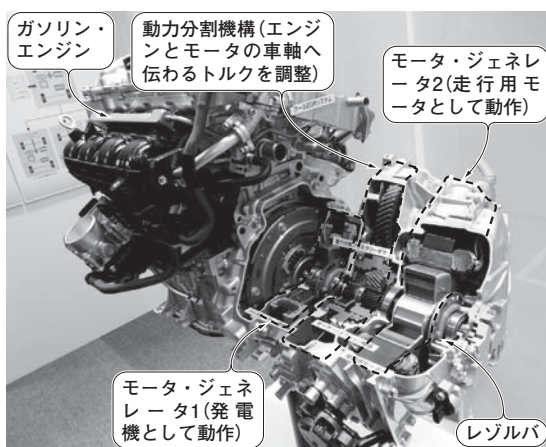
第9章 実車の測定データからその性能を確かめる

トルク・アップ60%!回転速度2倍! プリウス用 IPM モータの研究

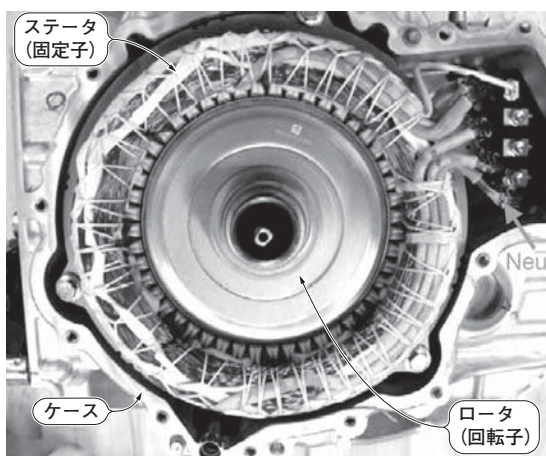
宮村 智也 Tomoya Miyamura

本稿ではIPMモータのメカニズムを解説します。
また、実際のプリウス(トヨタ)用モータ(写真1)に

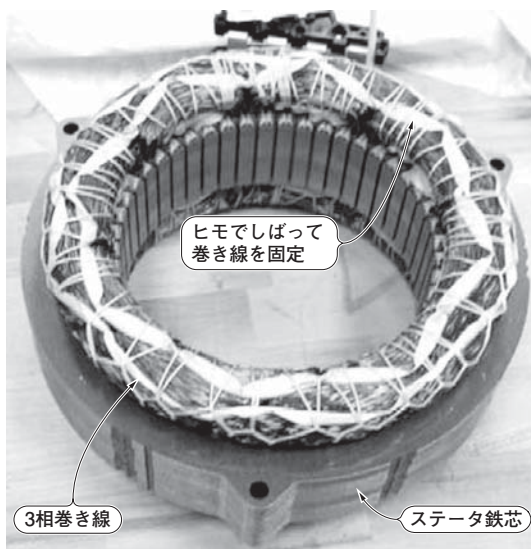
おける実験データ⁽¹⁾から、その性能を確かめてみ
ましょう。
〈編集部〉



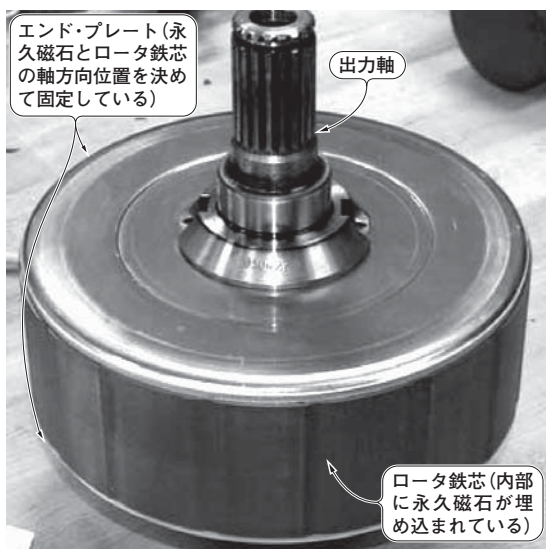
(a) 2010年型プリウスの電動パワー・トレイン



(b) モータ全体構造⁽¹⁾



(c) ステータを取り出したところ⁽¹⁾



(d) ロータを取り出したところ⁽¹⁾

写真1 プリウスの低燃費性能を支えるIPMモータを解剖

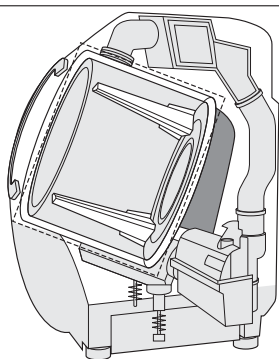
見本

第 10 章

10 万 rpm のサイクロン掃除機用や
デュアル・ロータの洗濯機用を考察

三大家電用「SR モータ」、「PM モータ」、 「可変磁力モータ」の最新技術

小坂 卓 Takashi Kosaka



環境問題や省エネ、脱レア・アースといった逆風を追い風にして、家電や自動車で用いられるモータの技術は、日々進化を遂げています。本章では、掃除機、エアコン、洗濯機など家電用モータを例に、今どきモータのテクノロジーを紹介します。

① 回転速度重視！掃除機用モータ

● 小型モータを高速回転させて大出力化！

20 世紀まで、掃除機といえば車輪が付いた本体と吸引ノズルをホースでつないだタイプのキャニスタ型（写真 1）が主流でした。30000～45000 rpm で回転するユニバーサル・モータ（整流子モータ）が一般に使われていました。21 世紀に入り、サイクロン式掃除機が普及し、コードレス式ハンディ・タイプなど小型かつ軽量で使いやすさを追求した掃除機が登場します。

これらの掃除機の中には、50000～100000 rpm と超高速回転で小型軽量の SRM (Switched Reluctance Motor, スイッチト・リラクタンس・モータ) や、永久磁石を用いて高効率を実現する PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor, 永久磁石型同期モータ) が新たに用いられています。

従来のユニバーサル・モータに対し、SRM や PMSM は機械式の電気接点であるブラシと整流子を持たないブラシレス・タイプです。寿命や信頼性に影響を与える整流火花がないので、超高速回転が可能です。

モータの出力（パワー）は、回転速度とトルクの積で決まります。また、モータのサイズはトルクの大きさで決まります。このため、同じ出力を超高速回転で実現すれば、トルクは小さくて済み、モータを小型軽量化できます。

● 10 万 rpm で回せる SR モータを採用

テレビ CM で一世を風靡した吸引力の変わらない掃除機、キャニスタ型掃除機 DC12 (ダイソン) は 10 万 rpm の SRM を採用していました。写真 2 は、DC12 を



写真1 10 万 rpm の SR モータを搭載した掃除機 DC12 (ダイソン)

分解して、SRM を取り出したものです。

▶ 高回転モータの宿命…鉄損が大きい

高速に回転するモータでは鉄芯での損失（鉄損と呼ばれる）が大きく、熱設計、効率などが問題となります。鉄損とは、鉄芯（コア）が交番磁場に曝されることで発生するヒステリシス損失と渦電流損失です。これらの損失は鉄芯の発熱損失となります。特に後者の渦電流損失は、交番磁場の交番周波数に 2 乗に比例するため、交番周波数の高くなるモータでは問題となります。

▶ 対策…0.2 mm や 0.15 mm と薄い電磁鋼板を使用し て低損失化&小型軽量化

この対策として、ステータの鉄芯には 0.2 mm 厚（計測値）、ロータの鉄芯には 0.15 mm 厚（計測値）と

見本

特設 1

頭の中の構想が形になるまで

図面作成の 3 STEP

太田 祐介 Yusuke Ohta

図面を描く基本手順

しっかりした部品を作るためには、それぞれに1枚の図面が必要です。その1枚の部品図を作るためにはいくつかの行程があります。大きな流れは次のとおりです。

「立案」→「構想」→「設計」→「製図」→「製作」

「立案」では、どのような「もの」を作り上げるのか、を決定します。

次に「構想」で、ものの形を大ざっぱに決めます。「設計」で、部品の種類や構造、加工部品の大きさを決定し、「製図」でそれを製作できる「図面」へと仕上げます。

最後に、図面を見ながら「製作」することで、頭の中に思い描いた一つのモノが、現実の世界に存在できる形へと姿を変えていきます。

本章では、「モータ取り付け金具」の設計を通じて、「構想」、「設計」そして「製図」の一連の流れを説明します。

本稿では「図面」を描けるようになるのが最終目的ですが、それ以外の大事な部分として、「構想」（アイデア・スケッチ）や「設計」なども簡単に紹介します。

それ以外の「製図」の部分は、図枠を描き、表題欄・部品欄を描き入れ、図形を正しく描き、寸法を記入し、寸法公差、表面性状を順番に描き入れる、という基本的な手順にしたがって、1枚の図面として完成させます。それでは、順を追って説明します。

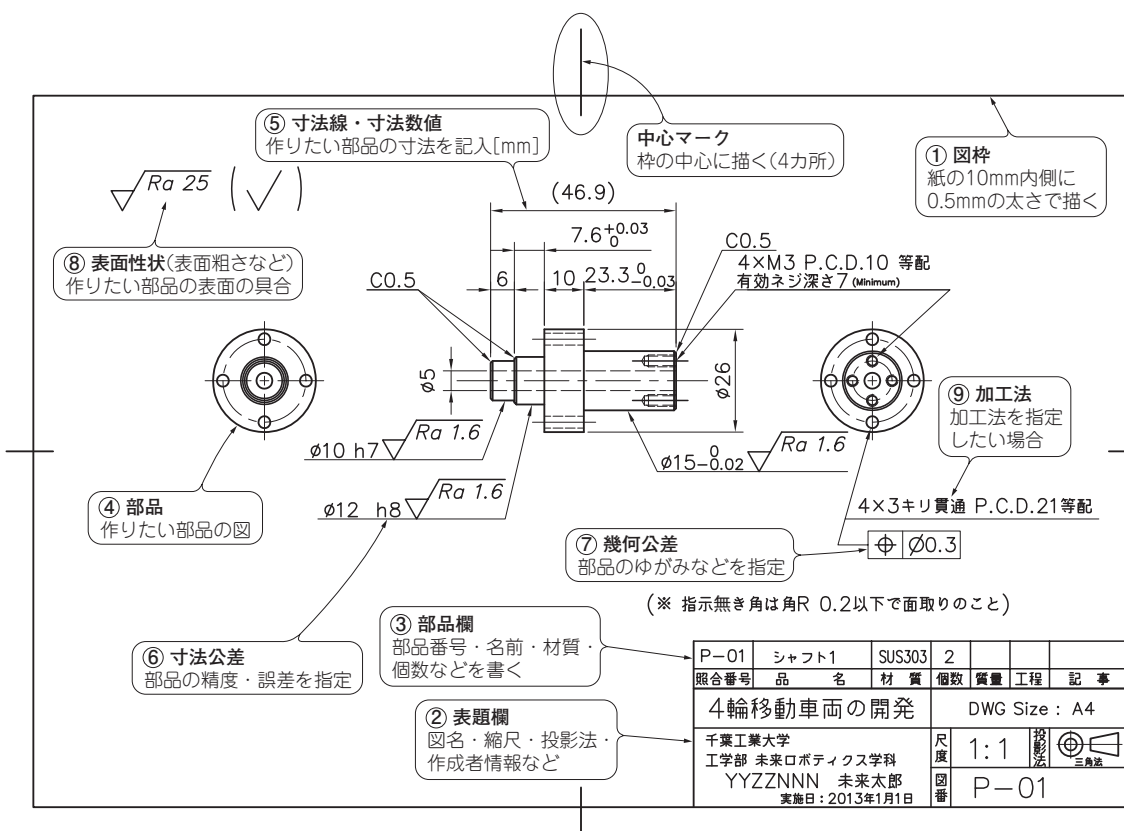


図1 図面の要素

見本