特集論文

駆動回路一体型電制ターボアクチュエータ

土井弘文*
波多野健太*

Intelligent Type Electric Turbo Actuator

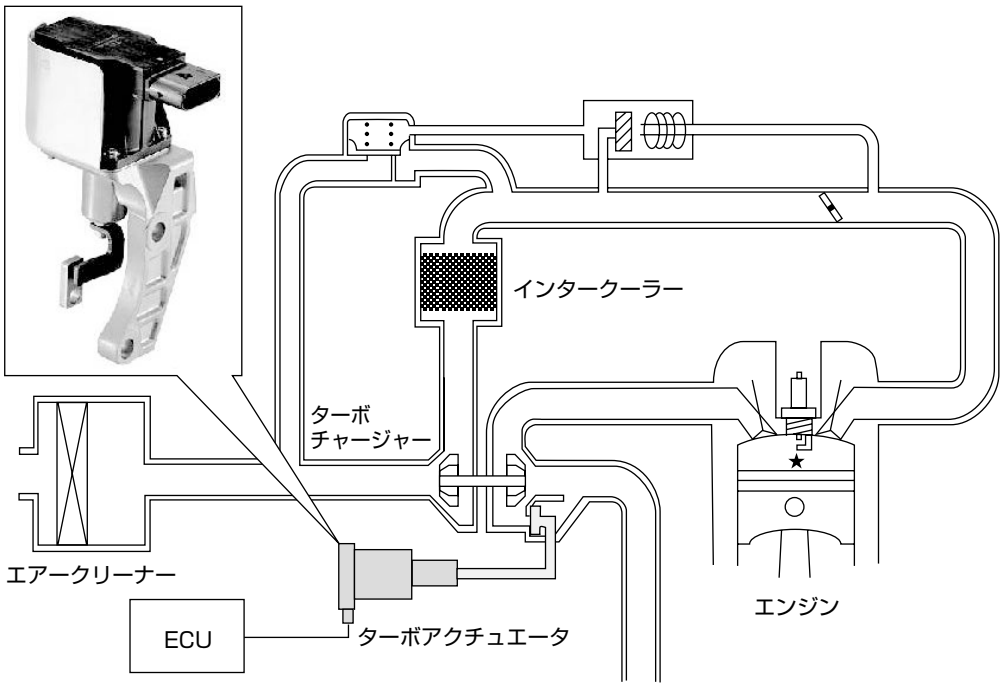
Hirofumi Doi, Kenta Hatano

要　旨

自動車(エンジン)の開発で，地球温暖化の原因となる二酸化炭素排出量削減のための燃費向上は重要なアイテムであり，一つの対応策としてターボチャージャー(Turbo Charger：T／C)の採用が増加している。ウエストゲート型や可変容量型のように，バルブやノズルなどの開閉部分を持ち，その開閉によってタービンの回転速度をより緻密(ちみつ)に制御することが可能なT／Cが主流となっているが，さらに過給圧制御の高精度化，エンジン運転状況にかかわらず制御が可能となる任意性が要求されている。

三菱電機では，ディーゼルエンジンに主に使用される可変容量型T／Cのノズルを開閉させるアクチュエータとして，その駆動回路をDC(Direct Current)モータに一体的に構成した駆動回路一体型電制ターボアクチュエータを製造している。DCモータは，長寿命が要求される商用車への採用を考慮してブラシレスモータとし，その回路には，モータを駆動する機能に加えてアクチュエータとしての位置制御機能も持たせている。

また，その駆動回路は，エンジンコントロールユニット(Engine Control Unit：ECU)内への設置にかかわる負荷低減のため，エンジン，T／Cへの搭載性を大幅に悪化させることがないよう小型化してDCモータに一体的に構成し，さらに高精度化のために分解能を向上させている。



駆動回路一体型電制ターボアクチュエータ

電制ターボアクチュエータとは，T／Cの過給圧を制御するために，T／Cの外部からリンク機構を介してウエストゲートやノズルの開閉を行うDCモータを駆動源としたアクチュエータであり，駆動するために必要な専用回路をDCモータ本体に一体的に構成することによって，大幅なサイズアップを招くことなく電気配線や電気コネクタの削減を可能としている。

*三田製作所

1. まえがき

地球温暖化防止のため，自動車の排気ガス中の二酸化炭素排出量削減が急務であり，エンジンのダウンサイジング，及びその出力補完のためのT／Cの採用による燃料消費量低減策が図られている。ウエストゲート型や，**図1**に示すタービンの外周に複数のノズルを設置してその開閉によって排気ガスの流速を調整する可変容量型のような，タービンの回転速度をより緻密に制御することが可能なT／Cが主流であり，近年では，さらに高精度制御，及びエンジンの運転状態にかかわらず制御が可能となる任意性の要求が高まっている。当社では，可変容量型T／Cのノズルを高精度に開閉させるDCモータ駆動の駆動回路一体型電制ターボアクチュエータ（以下“電制アクチュエータ”という。）を製造している。

2. 駆動回路一体型電制アクチュエータ

2.1 電制アクチュエータの製品概要

アクチュエータは，可変容量型T／Cのタービンハウジングの外側に設置されたレバー先端を押し引きしてリンク機構を揺動させることで内部の複数のノズルを一斉に開閉しており，要求される機能は以下が挙げられる。

①高出力→T／Cからの反力に打ち勝って駆動
②高速応答性→過給圧の高速制御（ターボラグの改善）
③位置保持性→一定位置保持時のふらつき低減
④任意性（エンジン運転状態に関係なく駆動可能）
⑤高寿命

これらの要求を満たすためには，反力や内蔵スプリング荷重とのバランスで動作する既存の圧力駆動のダイアフラム式では困難であるため，当社では，DCモータのトルクを駆動源として，モータの内部のねじ機構によって回転運動を直動運動に変換するコンパクトな電制アクチュエータを開発，製造している（**図2**）。

ねじ機構は，回転するロータの内部に雌ネジを構成し，その雌ネジと嵌合（かんごう）する雄ネジを出力軸に構成することで両者は噛み合っている。出力軸は，軸受によって直動運動が支持されるとともに，回転止め形状によってロータ内部のねじ嵌合による回転運動が規制され，直動運動に変換されている。

2.2 ブラシレスモータ

当社のブラシレスモータは一般的なブラシレスモータ同様，ロータマグネット回転型であるが，3相のコイル巻線部は当社固有技術である“ポキポキモータ”構造（**図3**）を採用しており，高効率で生産性に優れたモータを実現している[(1)(2)(3)]。

また，ロータマグネットの軸方向長さをほぼ1／2にしたスモールタイプも設定し，省スペースのエンジンルームへの搭載性を確保している。

2.3 駆動回路

ブラシレスモータを駆動し，その性能を十分に発揮するためには，回転するマグネットの位置を検知してコイルへの通電切り替えを適切なタイミングで行うことが重要である。

そのため，回転するロータマグネットの位置検出方法として，センサ用マグネットを設置し，磁極の切り替わりを磁気的に検出して電気信号を出力するホールICを使用している。ホールIC設置基板には，ホールIC検出信号入力I／F回路，ECUとの通信回路，モータをPWM（Pulse Width Modulation）制御するための駆動デューティを演算する制御回路，モータ駆動回路を一つの基板上に搭載して小型化を図り，大幅なサイズアップを招くことなくブラシレスモータ本体に一体的に構成した。

また，アクチュエータとして要求される目標位置への駆動や位置保持を高精度に行うためには，アクチュエータが

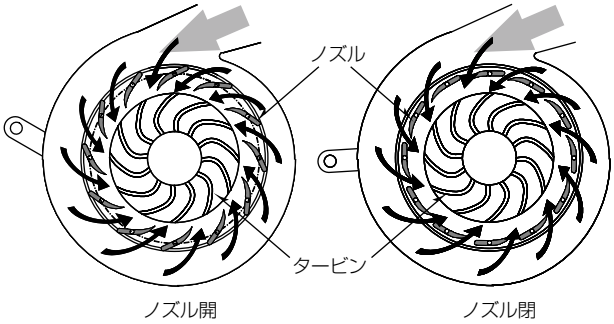


図1．可変容量型T／C

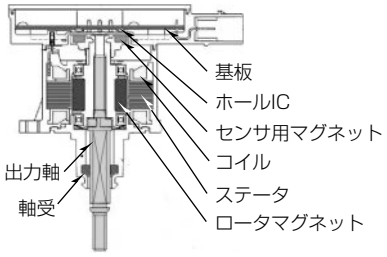


図2．電制アクチュエータの構成

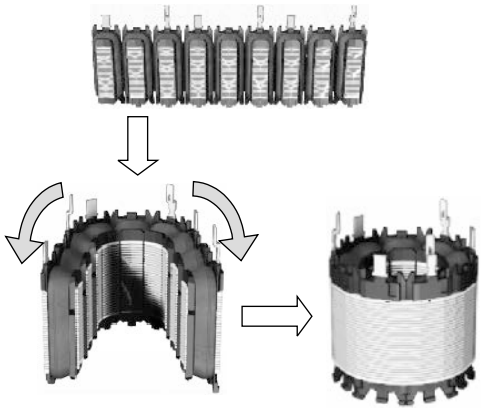


図3．ポキポキコア構造

現時点どの位置にいるかを検出する位置センサが不可欠であるが，ロータマグネットを回転させるための3相コイルへの通電切り替えタイミングを検出するホールIC信号をアクチュエータの位置検出センサとして兼用し，ホールICの信号切り替わり数をカウントすることでアクチュエータがどれだけ動いたかを検出しており，別のセンサを追加することなく位置検出を行っている。

3. 電制アクチュエータの特性

電制アクチュエータには**表1**に示す特性が要求される。

推力はモータの発生トルクと回転運動を直動運動に変換するねじ機構部のリードによって決まり，その関係はねじの軸力とトルクの関係式である以下の式(1)で求められ，モータ自体の回転速度とトルクを基に，ねじ機構部のリードを式(1)によって最適化している。

$$T = 0.5Fd\tan\{\tan^{-1}(\mu s/\cos\alpha) + \tan^{-1}(L/\pi d)\} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで，Tはモータトルク，Fは軸力，dはねじ有効半径，μsはねじ山摩擦係数，αはねじ山の半角，Lはリードである。

また，応答性もモータの回転速度とねじ機構部のリードから式(2)によって算出される。

$$t = s/(NL/60) \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

ここで，tは応答性(時間)，sは応答性の規定距離，Nはモータ回転数(rpm)，Lはリードである。

このように，推力，応答性ともにねじ機構部のリードの設定によって決定され，ねじ機構部のリードを短くすれば，推力は増加するが応答性は遅くなり，長くすれば推力は低下するが応答性は速く設定できる。つまり，ねじ機構部のリードは電制アクチュエータの重要な設計要素の一つであると言え，ねじのリードを調整することによって推力と応答性のバランスを最適化し，要求にマッチした性能を確保している。

4. 電制アクチュエータの分解能向上

4.1 機構的分解能向上

電制アクチュエータが動かすT／Cのレバーは，T／Cの性能上，又は内部構造上，回転角度が規制されている。そのため，高精度に制御するためには，このレバーの回転角度を細かい分解能で制御することが重要である。

電制アクチュエータの推力はレバー先端に印加されてトルクとして伝達されるため，レバーの長さと回転角度の関係から電制アクチュエータへの要求特性が決まり，レバーが長ければ低推力で長いストロークが必要であり，レバーが短ければ高推力だが短いストロークが要求される。つまり，電制アクチュエータのねじ機構部のリード設定は，モータの回転速度とトルクのみならず，T／Cのレバー長さと回転角度を考慮しなければならない。ただ，ブラシレスモータを回転させるための回転位置検出用ホールICをアクチュエータとしての位置検出センサとして使用しているため，ねじのリードが決定すれば分解能も決まってしまう。そのため，分解能は，より高精度な制御をするために可能な限り細かいことが要求される重要な特性であり，ねじ機構部のリードを短くすることで分解能向上が図れるため，推力と応答性の両立する範囲内で極力短く設定している。

表1．電制アクチュエータの要求特性

特性	内容
推力	T／Cの反力に打ち勝って駆動する
応答性	指示位置への素早く到達する
ストローク	T／Cのレバーを回転させる
分解能	ストローク内の位置を細かく検出する

4.2 位置検出センサの分解能向上

4.2.1 ロータマグネット回転の分解能

図4に示すように，3相コイルへの通電パターンは6パターンであり，必然的に通電切り替えタイミングを検出するホールIC信号切り替えも少なくとも6回は行われなければならない。一般的なブラシレスモータを駆動する場合，センサ用マグネットの磁極数はロータマグネットの磁極数と同数であり，ホールICの信号が切り替わるたびにコイルの通電が切り替えられ，**図5**に示すようなパターンとな

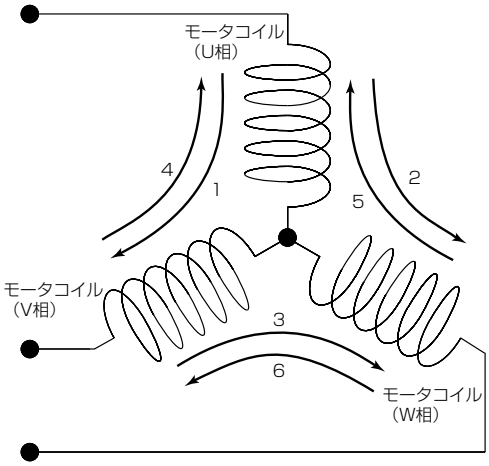


図4．ブラシレスモータの3相コイルへの通電

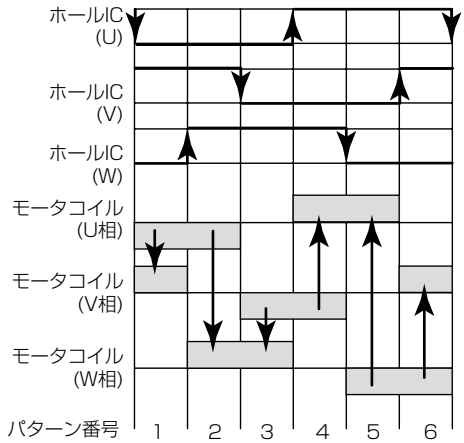


図5．ブラシレスモータ通電パターン

る。ステータのティース数，及びロータマグネットの磁極数の関係によって，ロータマグネット１回転あたりの通電切り替え回数は異なるが，当社のブラシレスモータではロータマグネット１回転あたり36回通電切り替えが必要であり，360°の１/36である10°が回転位置検出可能な最小分解能である。

4.2.2　位置検出センサの分解能向上

前述のとおり，センサ用マグネットの磁極数がロータマグネットの磁極数と同数で，ホールICの信号が切り替わるたびにコイルの通電を切り替える場合は，ねじのリードの1/36がアクチュエータとしての分解能となる。さらには高精度にT／Cを制御するために，位置信号として検出しているホールICの信号切り替わり数を増加させて高分解能化を図った。具体的には，通電切り替え位置の中間で位置検出が可能となるよう，センサ用マグネットの磁極数をロータマグネットの磁極数の２倍とし，その位置ではコイルへの通電は切り替えずに駆動デューティを調整して位置保持が行えるように制御を行っている。　この結果，**図６**に示すように，ホールICの信号切り替わりの２回に１回のタイミングで３相コイルへの通電切り替えが行われ，６パターンの３相コイルへの通電パターンを変更することなく，12回のホールIC信号の切り替えが行われ，分解能を２倍に向上させることが可能となった。つまり，ロータマグネット１回転あたりの位置検出分解能は，10°から５°に向上し，ねじのリードの1/72の分解能を得ている。

5.　その他の高精度化

ホールICを使用した位置検出方式は，あくまで相対的にアクチュエータの位置を検出しており，実使用では，まず基準となる位置を初期化制御によって定義し，その位置からの移動距離を求めて絶対位置センサとして使用することが必要であるため，初期化は，アクチュエータの内部，又はT／Cのレバー部の機械的ストッパなど，その位置が摩耗などによって経時変化し難い部位にアクチュエータのシャフトを押し当てて，その位置を基準位置として定義している。

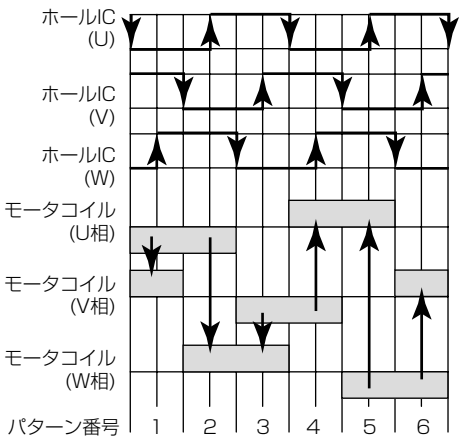


図６．ブラシレスモータの高分解能通電パターン

6.　む　す　び

今後も，燃費改善のためのT／Cの採用は増加し，より高精度な制御をするためにも電制アクチュエータのニーズは，乗用車や商用車も含めて増加するものと想定される。自動車メーカーやT／Cメーカーからのコストパフォーマンスに優れたアクチュエータの要求にこたえるために，より高性能な電制アクチュエータの開発を進め，T／C用アクチュエータの事業の維持拡大を図る。

参　考　文　献

(1)　三好帥男，ほか：DCモータ駆動式EGRバルブとその制御，三菱電機技報，**78**，No.９，589～593（2004）
(2)　三宅俊彦：ブラシレスモータのEGRバルブへの応用，電気学会 自動車研究会資料 JN:L4570A，**VT-04**，No.13-14，16-21，9-13（2004）
(3)　三宅俊彦，ほか：EGRバルブ用DCモータの電磁駆動技術，三菱電機技報，**79**，No.11，723～726（2005）