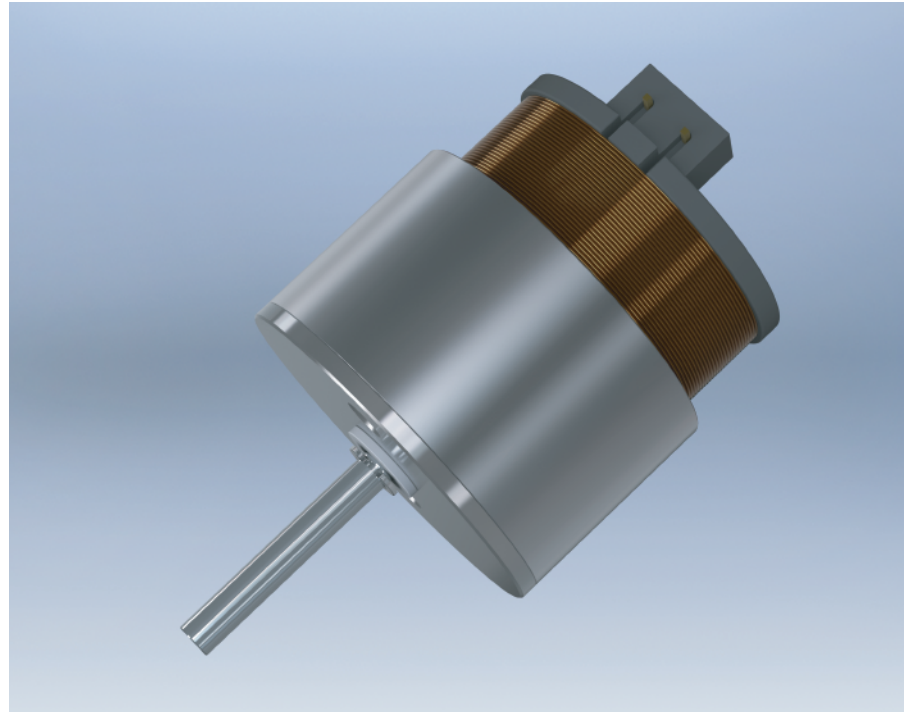


めかろ通信

<VCM(ボイスコイルモータ)>

当社は「ソレノイド」の製造を行っています。それには様々な型式をご用意してお客様の多様なご要望にお応えしております。それらに加えて「VCM」をご提供しております。どちらもものを動かすためのアクチュエータという点では同じですが、実は似て非なるもの、原理・構造、そして得意なことかなり異なるものです。今回は両者をいろいろな観点で比較してみることにします。

最近の音楽の聴取スタイルはヘッドホンやイヤホンがすっかり主流になった感がありますが、このヘッドホンやスピーカと同じ原理で駆動力を得ているのが、「VCM」で、このため VoiceCoilMotor (ボイスコイルモータ) と呼ばれています。原理からすると、「可動コイル型アクチュエータ」が判りやすいように思いますがいかがでしょうか。ソレノイドはご存知のように理科の実験で習った電磁石で、通電すると釘を吸い付ける作用の応用です。



Shindengen Mechatronics Co.,Ltd.

Magnetic Technology & Quality

柔軟で独自の発想と豊富な実績で幅広い要求にお応えします。

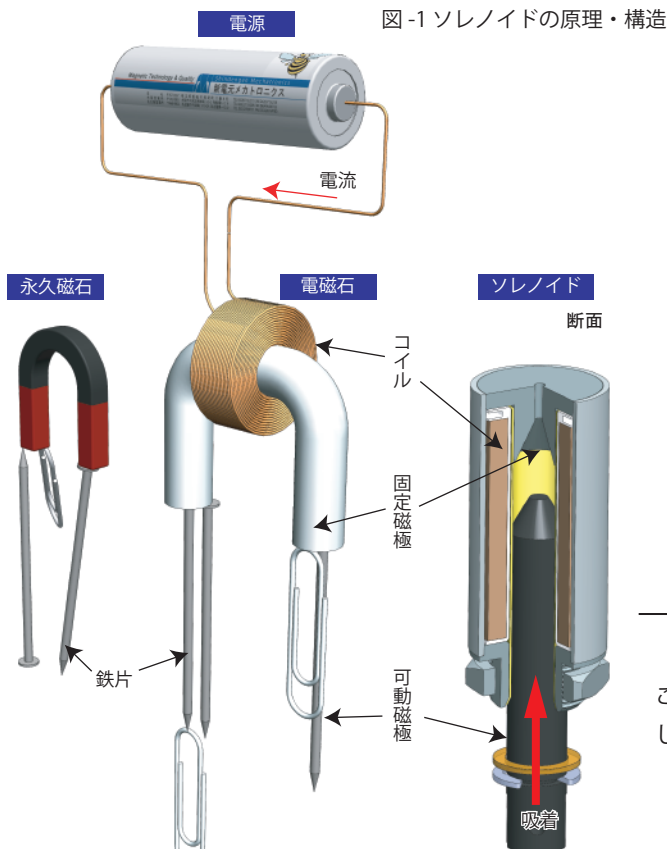


図-1 ソレノイドの原理・構造

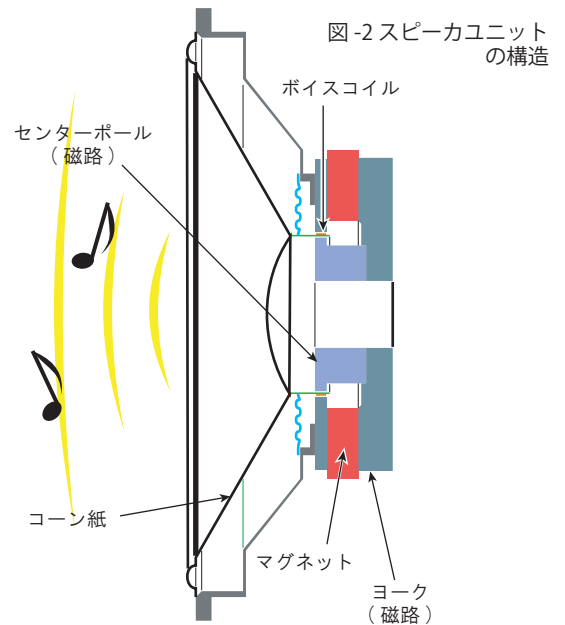
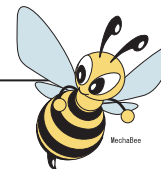


図-2 スピーカユニットの構造

■ 1. 動作原理

VCM の推力を発生する原理はどのようなもののでしょうか。この原理はソレノイドと大分異なります。原理と構造を比較してみます。ソレノイドの基本原理についても説明します。



■ 1.1. ソレノイドの原理・構造

ソレノイドは固定磁極と可動磁極を持ち、その周囲に配置したコイルから磁界を加えることで両者を磁化すると相互に吸引力を生じます。この力を可動磁極から取り出すことで推力を得ます。可動磁極の固定磁極に対する吸引力です。このときに得られる吸引力の大きさは吸着する部分の相互の間隔で大きく変化し、密着時が最大になります。この吸着面の面積は広いほど大きな力が得られます。また外部から加える磁界の大きさは得られる吸引力と比例します。磁界の大きさはコイルに流れる電流の大きさと比例しますが、電流を大きくしていくとあるところで比例関係が変化し、吸引力が飽和傾向を示します。これは磁極の磁化特性の影響が現れたものです。

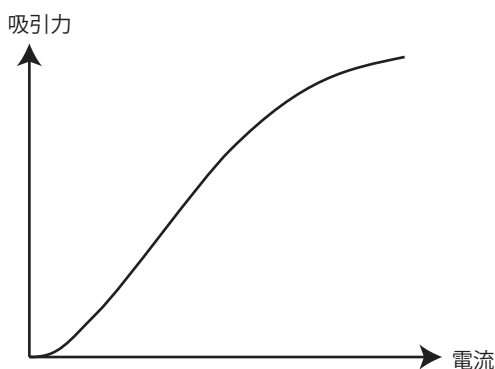


図-3 ソレノイドの吸引力特性
電流-吸引力

ソレノイドのカタログを見ると、大きさが同じでも作動距離の大きなものと、吸着時の力の大きいものがあることに気が付かれるでしょう。磁極がフラット型と呼ばれる対向面の平坦なもの、と、コニカル型という円錐型をしたものがあります。平坦なものは作動距離と磁極の間隔が等しく、作動終了点の密着時に大きな力が得られます。

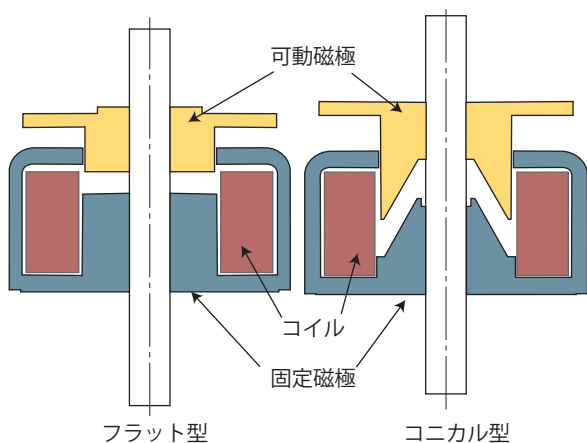


図-4 ソレノイドの磁極形状

コニカル型は吸着面の磁極形状が円錐型をしています。こうすることで、作動距離と磁極の対向面の距離の変化が一致せず、変化が緩やかになります。このため、作動距離の大きなところでも比較的大きな力を得ることが出来ます。ただし、作動終了点での吸着力はフラット型には及びません。このように磁極の形状を工夫することで得られる特性を大幅に変えることが出来ます。これはソレノイドのメリットです。位置制御を可能にした比例ソレノイドは複数の形状のものを組み合わせています。

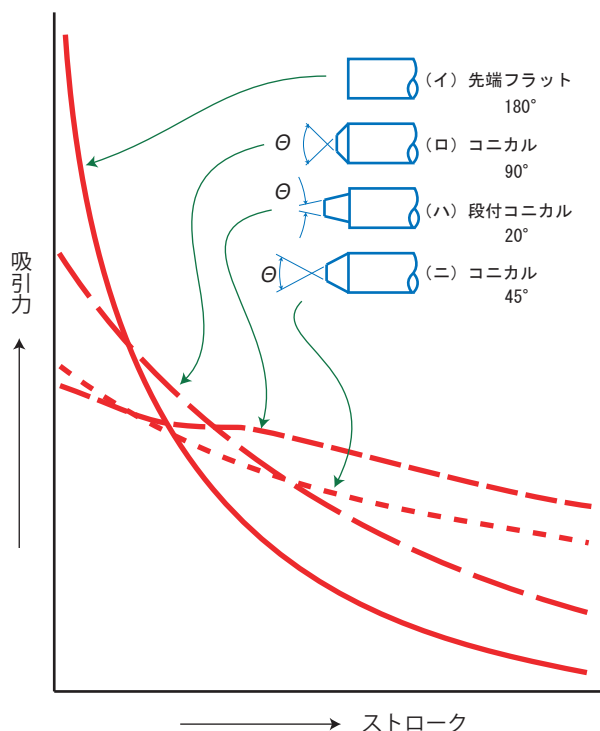


図-5 磁極形状と吸引力特性

コイルに電流を流した時には、コイルの持つ直流抵抗によりジュール熱を生じ、温度が上昇します。発生した熱は外部に伝達して放熱します。この放熱経路は固定磁極や格納ケースなどになり、密着部が主体です。外部からコイルが見える簡易型よりも、金属ケースに格納されたものの方が放熱特性は良くなります。コイルを構成する巻線と巻枠やテープなど絶縁材料はこの熱に曝されます。これらの耐熱性能が使用可能上限温度を決定し、通電電流の上限となり、最大通電電力が決まります。



■ 1.2.VCM の原理・構造

磁界中に電線を配置し、この電線に電流を流した時、電線に力が生じるという現象は「ローレンツ力」によるもので、その方向は「フレミングの左手の法則」として良く知られています。これが VCM の原理です。

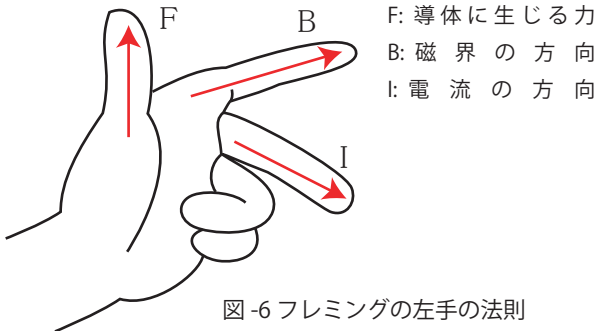


図-6 フレミングの左手の法則

「VCM」は軸受等で支持した可動コイルを磁気ギャップ中に配置し、このギャップを含む磁路中に永久磁石を置き、永久磁石からの磁束をギャップに満たしてあります。この状態でコイルに電流を流すと「フレミングの左手の法則」の方向に「ローレンツ力」を生じます。これをコイルに取り付けたシャフト等で外部に取り出せばアクチュエータとして利用できます。電流の方向を変えることで推力の方向は反転します。ギャップ中の磁束は永久磁石で一定に保たれていますので、発生する推力は電流と比例します。ソレノイドの場合には磁極を構成する鉄の磁化特性の影響を受け飽和傾向を示しますが、VCM にはその影響はありません。また、コイルが磁気ギャップ内の一定の磁束中にある範囲では電流と発生推力は同じ関係を保ちます。

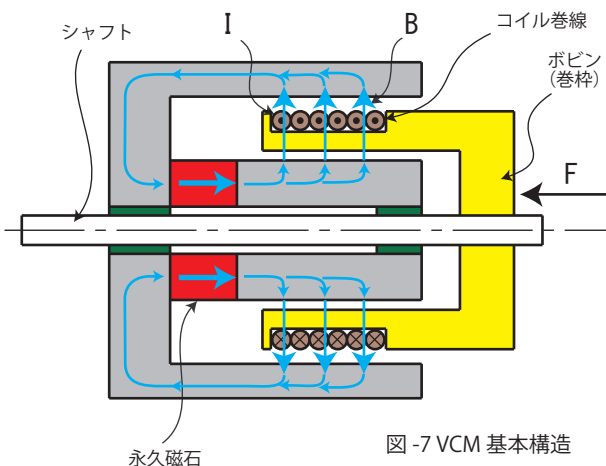


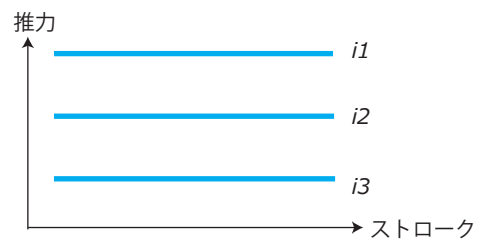
図-7 VCM 基本構造

この可動部には鉄心のような重量物を持ちません。また、磁気ギャップは狭い方が内部の磁束密度を高くできますので、可能な限り狭く設計されます。このため、ここに配置するコイルは必然的に薄く作られることとなります。これは可動部質量の低減にも効果があります。これが VCM の大きなメリットにつながっています。また電流を流す際にはコイルのインダクタンスが問題になることがあります。巻き数の比較的少ない VCM はインダクタンスが低めで、高速

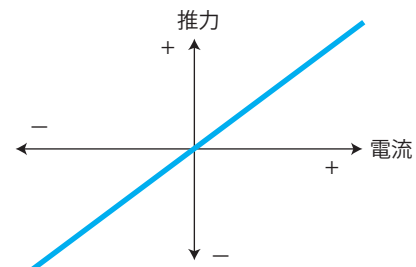
な駆動も楽に行えます。

コイルは銅線を巻いて作られますので、直流抵抗を持ち、電流を流すとジュール熱を生じます。この熱は大気中に放熱されますが、この経路はコイルが巻き付けられたボビン(巻棒)が主経路となります。VCM のボビンは推力を取り出すために軸受で支持され、大気中に中吊り状態です。このため、ソレノイドのようにケースなど他の構造物に直接接することなく、直接大気と接しています。このため、放熱性能はソレノイドに比べると大分劣ります。これが印加電力の制約になります。

コイルが可動する構造を持つ VCM ですが、このために必要な機構があります。可動するコイルに通電する必要があります。



ストローク-推力 特性



電流-推力 特性

図-8 VCM の推力特性

るのです。モータの中には回転するコイルを持つものがあり、このコイルへの給電には整流子とブラシが用いられます。モータはエンドレスで回転するのでこのような機構を採用していますが、作動範囲が限定された直進運動の VCM は、可動可能な給電線による方法がとられます。可とう性の良いものを選び、動作を妨げる事が無く、寿命の長いものを選択する必要があります。

位置制御を行う場合には、対抗ばねとのバランスで位置決めを行います。このばねのばね定数と可動部の質量で共振点が見えます。この共振点が期待する応答性の帯域内に来ないように注意することが必要です。帰還を掛けないオープンループでは特に注意が必要です。

軽量の可動部のために高速駆動に適している VCM ですが、負荷の慣性や共振系の影響で、コイルが外力で動かされたときにはコイルに起電力を生じます。その方向は「フレミングの右手の法則」に従い、推力を低下させる方向となり、ドライバにはそのための配慮が必要なことがあります。



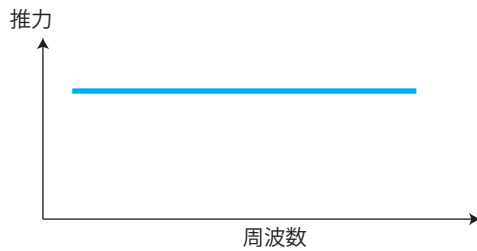
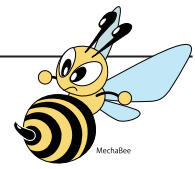


図-9 推力の周波数応答

VCM の発生する推力の周波数応答は極めて優れています。ただし、負荷の性質によっては共振を生じることがありますので応用に当たっては十分な注意が必要です。

■ 2. ソレノイドとの比較

ソレノイドとは力の発生原理が全く異なり、構造もかなり違う形になっています。このため、応用にあたって得手、不得手が生じます。したがって、よく理解した上での応用が必

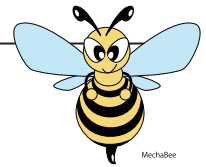
要となります。これをソレノイドと対比しながら比較してみます。

■ 2.1. 応用とメリット、デメリット

分類	ソレノイドの場合 (代表的な型式)	VCMの場合	説明
大推力	◎(プッシュ・プル)	×	※1 コイルの放熱に難がある マグネットの磁力に依存する
大ストローク	△(チューブラ)	△	本体サイズに比較して長めのストロークを得やすい。ただし、給電線の処理が面倒になる
保持	◎(プッシュ・プル、自己保持)	×	※2 ソレノイドは作動後のギャップ最小点で最大の吸着力を生じ、これを利用して大きな保持力が得られるが、VCMはこのような特性を持たないので駆動力以上の保持力は得られない
高速駆動	△(高速バルブ)	◎	軽量な可動部のために高速での駆動が可能 可動部に重い鉄心が不要 インダクタンスが低めなので電流の応答を早めやすい 可動する給電線の処理が面倒 ソレノイドの場合推力を増やすと、インダクタンスも増えるので、特別仕様のコイルを用意する必要がある
位置制御	○(比例)	◎	※3 位置による推力の変動が少ない 電流に対するリニアな応答 小さな分解能(原理的に無限小) ヒステリシスを生じにくい ただし、センサとの組み合わせによる制御が必要 ソレノイドもセンサと組合せた制御で、分解能を高められる ただし、ヒステリシスの処理が必須
圧力制御	△(比例)	◎	※4 電流に対して推力の変化がリニア 周波数特性が良好 ソレノイドは鉄心の磁気特性の影響で、大きな領域で曲がる傾向あり
打撃	○(ハンマ)	△	※5 オーバドライブに限られる(消費電力の制約) ソレノイドは大きなオーバドライブで初期加速を得やすい
設置環境	◎(油浸構造他)	×	※6 作動油に浸かる環境や粉塵(磁性粉)のある環境での使用は困難 ソレノイドは可動部のみをを封止した油浸構造が可能

判定記号は参考です





- ※1 ソレノイドよりもコイルに通電できる電力の制約が厳しく、大きな出力を得にくいという問題があります。このため、重負荷の駆動には基本的に不向きです。
- ※2 ストロークが変化しても推力の変化が少なく、これがVCMの利点です。ソレノイドは吸着最終点で大きな吸着力が得られます。この位置を保持する場合、駆動電力を大幅に削減することができますが、VCMはこのような動作は出来ません。
- ※3 推力のストロークへの依存性の少なさ、電流に対する良好な直線性はソレノイドでは得にくいものです。ヒステリシスの少なさも扱いやすさにつながります。ソレノイドと異なり、可動部の質量が小さいので、高速での移動、往復動作に優れています。VCMの高速性と良好な推力特性は制御において、外乱時の良好な対処としても現れます。
- ※4 電流に対する推力の良好な直線性は押圧力制御の精度向上をもたらします。対象物への圧力、荷重を高精度に制御できます。
- ※5 打撃用のハンマの駆動では大きな初期加速を加えて駆動するのが効果的です。初期加速を得るためには時間は限られますが大電力を印加する必要があるのと、これに見合う強力な永久磁石による磁場が必要となります。
- ※6 比例油圧弁の駆動には比例ソレノイドが使用されています。この用途においても高速化の要求があり、一部にVCMを使用した高速弁が実用化されています。ただ、油圧弁の場合には高圧の作動油をどのようにシールするかが問題で、ソレノイドの場合には吸引力を生じる可動磁極を圧力容器中に封入し、この容器の外部から磁気を加えることで動作させる構造とすることで、作動部の圧力シールを不要としています。VCMではこのような構造とすることはできず、作動部のシールを低圧部にすることが可能な場合に限るなど応用は限定的になります。ただし、放熱を目的として磁性流体をコイル部分に満たすなど、意図的に油中での動作を行うこともあります。

■ 3. モータとの比較

VCMと同じようにモータも制御用のアクチュエータとして用いられます。回転と直動という差はありますが、基本的な特性の違いは？

モータには様々な形式があり、単純に回転するものから位置決めに適しているものなどがあります。携帯のバイブレータに用いられるような小型のものから、電車の駆動用など非常に大きなものまでいろいろです。ここでは、そのなかから駆動が簡単で位置決めに適したパルスモータと比較してみます。

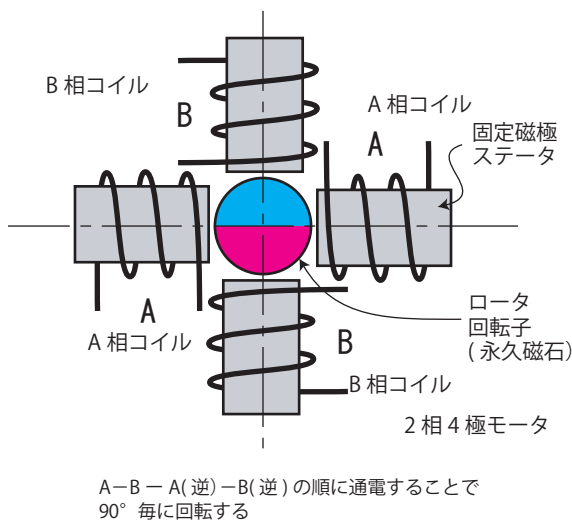
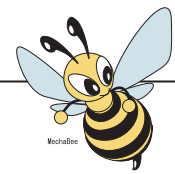


図-10 パルスモータ原理図

パルスモータは複数の磁極を持ち、それぞれにコイルを用意しています。このコイルの通電組み合わせをデジタル的に行うことで回転と位置決めを行います。その組み合わせで静止位置が決まるために、位置検出を行わなくても高精度の位置決めを行うことが出来ます。ただし、絶対位置ではなく相対位置であり、どこかで位置の校正、確認を行う必要があります。通常は電源投入後に初期化プロセスを実行し、位置確認を行うことで制御原点を設定します。回転時には現位置の隣の磁極を指定する通電パターンに切り替えることで隣の磁極位置に移動、回転します。これを繰り返すことで回転します。デジタル的な駆動になるので、デジタル化されたコントローラとのインターフェースは極めて容易です。正逆いずれの方向にも駆動が可能で、位置の保持力もあります。ICチップ化された専用のドライバも提供されています。

一方、VCMでの位置決めを行う場合はどのようにするのでしょうか。構造的にはコイルが一つでそこに流れる電流の大きさによって発生推力が決まります。推力の大きさが決まり、位置が決まるわけではありません。自身で位置決めする能力が無いので、位置検出用のセンサを用意して現在位置を把握する必要があります。この情報を基に目標位置との誤差を演算し、通電方向と大きさを決めて通電・制御します。静止位置は、位置を検出するセンサの精度に依存しますが分解能は原理的に無限小です。電流の通電方向を変えることで推力の発生方向を変えることが出来ますので、正逆方向への移動が可能です。





整理すると、

	パルスモータ	V C M
動作	回転	直動
移動	段階	直接
位置保持	可能	不可能
制御	オープン	クローズ (センサとの組み合わせ)
通電制御	デジタル	アナログ
分解能	磁極数(ピッチ) で決まる	無限小 (センサの能力)

ここで、移動の項目について補足すると、パルスモータにおいて、A点からD点に移動する場合、A⇒B、B⇒C、C⇒Dのように中間点を經由して順次移動する必要があります。A点からX点に移動するとき、X点が100ステップ先ならば、移動を100回繰り返すこととなります。この移動単位はパルスモータの設定分解能です。加えてこの移動ステップには最低必要な時間を要します。VCMでの駆動では、A⇒Dと直接の移動が可能です。これは高速制御が必要な用途では大きな利点となります。

また、A、B、C、D・・・という静止点を持つパルスモータにおいてAとB、又はBとCといった各点の中間点には静止することが出来ません。VCMの場合にはセンサがその位置を検出可能であるならば、問題なく静止することが可能です。これが分解能の違いです。VCMの分解能が無限小という特徴は応用範囲を大きく広げることになるでしょう。HDDのヘッド駆動においては記録トラックピッチのnm単位で位置決めが行われています。

制御において、パルスモータのオープンループ制御が可能であることは大きなメリットです。センサが不要で、システムを安価に構成することが可能です。ただし、位置保持力を越える想定以上の負荷が加えられ、移動してしまったような場合には、制御がまったく不可能となります。この状態を検出する何らかの手段を用意しないと、制御側では知ることも出来ません。過負荷が消滅しても復帰することはありません。初期化のプロセスを再実行する必要があります。一方VCMは想定以上の負荷が取り除かれれば、目的位置に復帰し、そのまま制御を再開することが出来ます。システムとしての信頼性を判断する上でも大きなメリットとなるでしょう。まとめれば、

- パルスモータの場合には、単純で安価に構成可能。
- VCMの場合には、高速で高分解能だが、構成は複雑。
- デジタル的なパルスモータに対してアナログ的なVCM。ということになるでしょう。

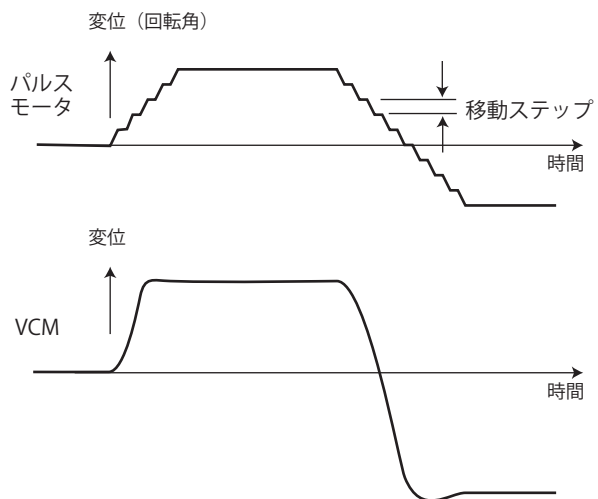


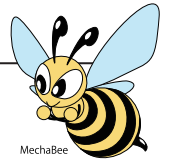
図-11 パルスモータとVCMの動作イメージ

■ 4. 制御回路の例

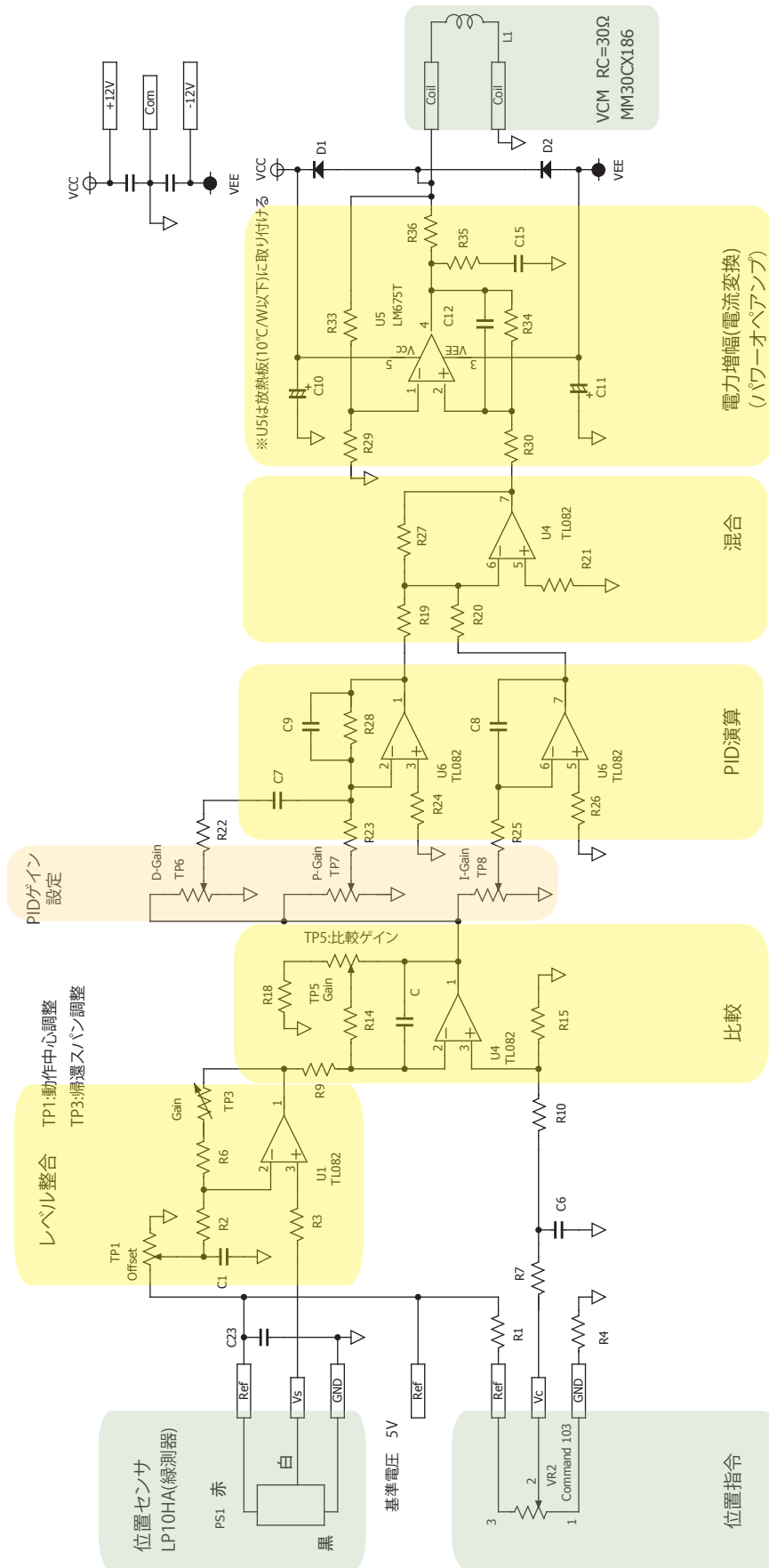
具体的な駆動回路の例をご紹介します。実用的なアプリケーションではありませんが参考にしてください。これは当社で拡販活動に使用しておりますデモボックスに組み込んだ

ものです。位置制御を行う標準的な構成になっています。次ページに回路図を示します。





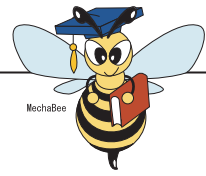
■ 4.1. 制御回路 回路図



MC Solenoid Driver
2019/07/01 n.okada

図-12 制御回路 回路図





■ 4.2. 制御回路 動作説明

基本構成をブロック図に示します。位置センサでシャフト位置を検出し、指令値と比較、PID 演算を行い、補正値を算出、これを電流変換してコイルに通電します。電流変換部分は出力電流の大きいパワーオペアンプを使用することで直接コイルを駆動しています。位置を指示するツマミ位置をポテンショメータで電圧に変換して目標値とします。シャフトの現在位置は位置センサによって電圧値として検出します。

基本的な動作は以下ようになります。目標値と、シャフトの位置を比較することで現時点での誤差が得られます。この誤差を演算・増幅して誤差を補正するための補正量を求めます。この補正量をコイルを駆動するための電流に変換し、通電することでコイルは誤差を補正する方向に駆動されます。このコイルの通電電流が操作量となります。このようにして誤差がなくなるまで操作量を調整しながらフィードバック制御されます。誤差からコイルの操作量を求める方法についてはいろいろ考案されていますが、最も広く使われている PID 演算方式を採用しています。この方法は古典制御ともいわれるように古くから用いられ長い歴史を持っています。様々な理論が提唱される中であっても、

主役の座を保持している優れた方法です。その呼称は、P：比例 (Proportional)、I：積分 (Integral)、D：微分 (Differential)、の各演算器を用いることからきています。これらの演算器の増幅度を適切に設定することで、小さな整定誤差 (目標値との誤差) と高速な応答速度を得ています。この方式の詳細と各定数の定め方についてはここでは触れませんが、専門書が多数出版されておりますのでそちらをご参照ください。

この回路は当社の営業活動で使用しているデモボックスに組み込んだものの主要部です。目標設定ツマミで指示した位置に VCM のシャフト位置が追従するように制御しています。直感的に理解しやすいようにアナログ回路で構成していますが、比較や演算部などをマイコンなどでデジタル処理することも可能です。PID 演算のプログラムも多くの発表があります。

これは位置制御を行う例ですが、対象が他の量である場合でも同様な手法で制御が可能です。たとえば押圧力を圧力センサで検出、対象に与える圧力を適正値に保つ制御などがあります。

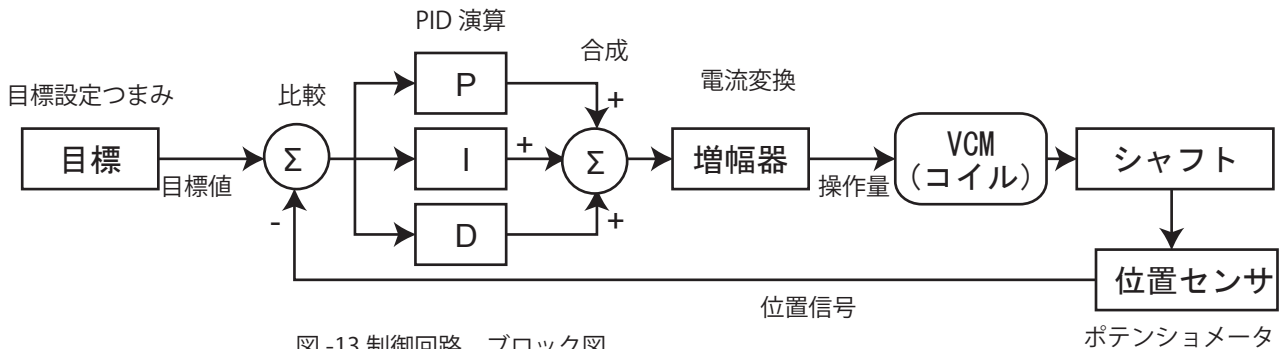


図-13 制御回路 ブロック図

■ 5. 終わりに

「VCM」は第 18 号で取り上げましたので、2 回目となります。今回は原理・構造に加え他形式のアクチュエータであるソレノイド、モータなどとの比較と、使い方の

ヒントを説明してみました。今回は具体的なアプリケーションのご紹介は出来ませんでした。次回以降に計画しております。ご期待下さい。

■この資料の内容は改良の為、お断り無く変更することがありますのでご了承ください

「めかとり通信」に関するお問い合わせは

新電元メカトロニクス株式会社

<http://smt.shindengen.co.jp>

※ 弊社 URL が変更になりました。

本社 : ☎357-0037 埼玉県飯能市稲荷町 11 番 8 号 TEL 042(971)6212 FAX 042(971)6218
 西日本支店 : ☎460-0003 名古屋市中区錦 1-19-24 名古屋第一ビル TEL 052(219)9711 FAX 052(201)4780
 茜台工場 : ☎357-0069 埼玉県飯能市茜台 2 丁目 1 番 5 号

新電元メカトロニクスのソレノイドのご用命は

2019 年 9 月現在

