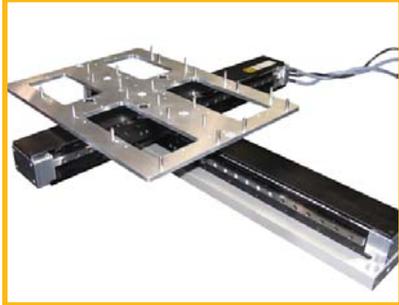
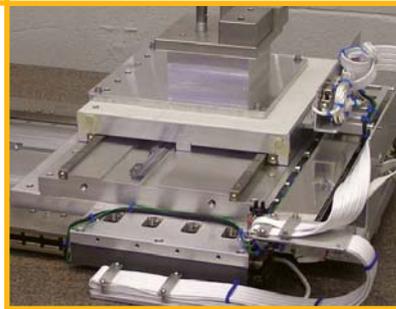


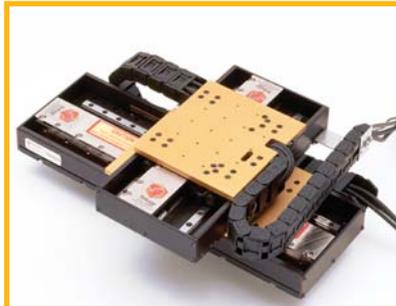
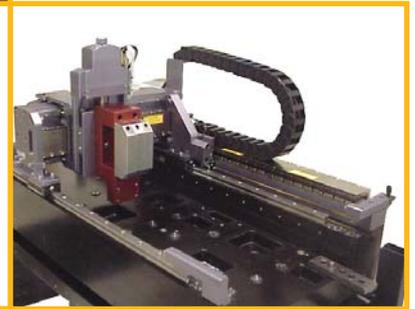
PERFORMANCE



PRECISION



ACCURACY



SPEED

リニアモータ技術ガイド

1.0 リニアモータの利点

1.1 リニアモータとは？

簡単に言えば、リニアモータは「巻いていない」回転モータです。動作も回転モータとまったく同じで、同じ電磁方程式によって、回転モータではトルクが生み出される方法を、そしてリニアモータでは直接力が生み出される方法を解説することができます。

リニアモータは多くの用途において従来の回転駆動システムよりも特徴的な長所を示しています。リニアモータを利用する際には、ギアやボールねじ、あるいはベルトドライブなどの中間の機器類モータを出力部に連結する必要はありません。出力部は直接モータに連結されています。したがって、作動部分から生じる緩みや弾性はありせん。そのため、サーボ機構の制御の動的動作が改善され、高い精度が得られるのです。

機械的な動力伝達部品がないため、駆動システムの慣性レベルは低く、騒音も少なくなります。さらに、機械の摩耗も誘導装置においてのみ発生します。その結果、リニアモータは従来の回転駆動システムと比べて、より信頼性が高く、摩擦損失が少なくなります。

1.2 構造の違い

直接駆動型のリニアモータと従来の回転駆動システムの構造の違いを、リニアモータ駆動システムとボールねじ駆動システムの例を用いて、(図1と図2)に示しました。回転運動を直線運動へと変換する、動力伝達のための機械的な要素がないため、リニアモータに組み込まれている軸は回転駆動システムの軸よりもずっと簡単な機械的構造をしており、結果として非常に動的な用途において、低い慣性しか生じていません。必ずしも必要なわけではありませんが、リニアモータテーブルにはリニアエンコーダが備えられており、これによって極めて正確な位置フィードバックが得られます。

(図2の)リニアエンコーダは高価な部品であると考えられがちですが、フィードバックシステムを選択できるということは、用途の要件にとっては最適である場合も多いのです。例えばParkerでは、高精度を要件とする用途向けに極めて高分解能の光学エンコーダを提供しています。さらにParkerでは、システム全体のコストが懸念されるような用途向けに、低分解能で低価格の磁気エンコーダも提供しています。実際、経済的なフィードバック装置を備えたリニアモータが優れた性能を発揮して、高精度に研磨されたボールねじを用いた回転システムと実際には同程度のコストで済む、あるいはより安価で済む場合もあります。

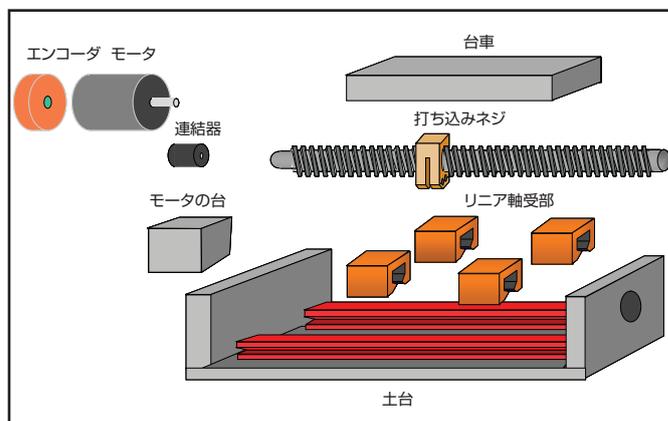


図1: ボールねじ駆動システムが精密にテーブルに装着されている例

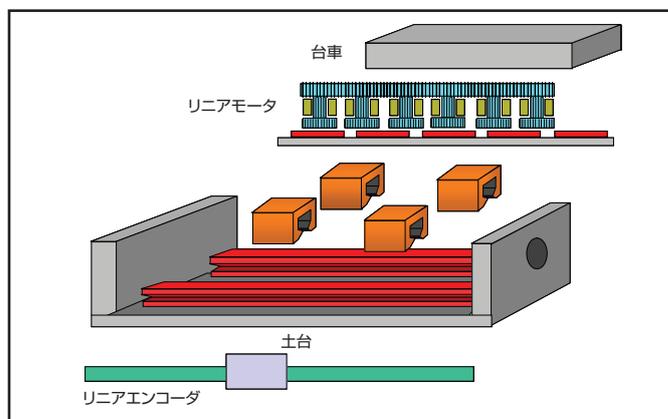


図2: リニアモータ駆動システムが精密にテーブルに装着されている例



図3: リニアモータの部品には、別個のコイルと磁気軌道が含まれる



図4: リニアモータの位置決めシステムには、土台、軸受部、台車、フィードバック部、そして一般にケーブルキャリア部が含まれる

2.0 リニアモータの種類

リニアモータには多くの種類があります。それぞれ固有の、ユーザにとっての利点や長所を備えています。Parkerでは鉄を利用しないタイプ、コアが鉄のタイプ、そして「スロットレス」デザインと呼ばれる、ちょっと変わった改良型、の3種類のスタイルのリニアモータを製造しています。

リニアモータは、個別の部品として、あるいは完全なシステムとしてのどちらかの形式で提供されます。「キット」(図3)と呼ばれることもある部品のタイプは、モータコイルと、別個になっている磁気レールとで構成されています。コイルを組み立てたものは「収納箱」や、「第一の」要素とも呼ばれます。収納箱は一般に、モータコイルと、コイルが台車に連結できるようにする取り付け板もしくは取り付け棒で構成されています。

モータのケーブルは通常、パッケージの片方から出てきます。磁気軌道は「第二の」要素とも呼ばれます。使用されているリニアモータの種類によって、このマグネットトラックは磁石を一本に並べたものであったり、二本が両側に分かれて、引力が均等に働く構成になっているものであったりします。

完成したリニアモータシステム(図4)は通常、個別のモータ部品、土台、軸受部、フィードバック部分、そしてケーブルキャリア部分で構成されています。

リニアモータの部品を自由に選べることでユーザは経済的なソリューションを得て、その部品をどのようにして機械に組み込むかに関して完全に自由裁量を得られることとなります。しかし、このためには機械を作る側の者が具体的知識を高度に有している必要があります。設計エンジニアはモータの特性と、リニアフィードバックの技術、冷却方法、そしてサーボ増幅器と制御システムの性能について理解をしていないことはありません。

既に組み立てられているリニアモータの位置決めシステムを選べば、設計エンジニアは既に設計済みの、頑丈な設計の、完全に試験済みのパッケージを手に入れることとなります。こうすれば、軸受部やエンコーダ、放熱板、ケーブル、コネクタ、動作の停止箇所、そしてリミット/ホームセンサの設計や、正しい位置などで悩む必要もなくなります。Parkerのリニアモータテーブルはこうした利点すべてを提供するのはもちろん、搭載も簡単で、すぐに稼働できるパッケージになっています。

2.1 コアが鉄のタイプのモータ

コアが鉄のタイプのモータは、一本の磁気レールの上に設置された収納箱で構成されます（図5）。この収納箱は、鉄の層状組織に銅の巻き線を巻きつけて作られています。裏側の鉄は、磁束がモータと磁気レールとの間で循環するための効率的な経路となります。さらに、熱をモータから逃がすための効率的な経路も備えられています。このコアが鉄のタイプの設計では、非常に強力な力が生まれ、効率的に冷却が行われます。実際、コアが鉄のタイプの設計では単体が生み出す容量としては最大の力が生み出されます。そして何よりも、コアが鉄のタイプの設計は磁気材料が一行分しか必要でないため、経済面から見ても魅力的となっています。

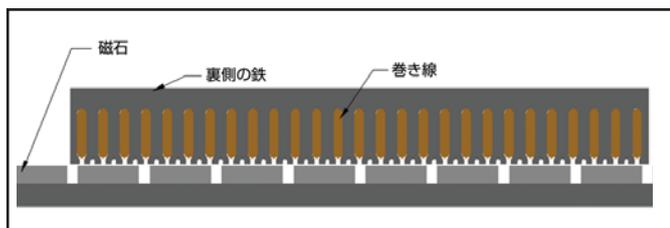


図5: コアが鉄のタイプのリニアモータ

コアが鉄のタイプの設計の不利な点の一つに、収納箱と磁気軌道との間に強い引力が働くことが挙げられます。この引力は、モータの定格の力の5~13倍にまで達する場合があります。軸受システムがこの力を支えなくてはなりません。さらに、このように引力が強いことで、他のリニアモータの設計と比較して、取り付けが非常に難しいことも挙げられます。

コアが鉄のタイプの設計のもう一つ不利な点に、コギング力があることが挙げられます。コギング力は、鉄の積層部品が磁石上の安定した位置に移動するためにモータに対して水平力の方向に発生します。等速を保つために、モータが生み出した力が位置へと変化するため、コギング力の存在はモーションシステムの滑らかさを減退させます。

Parker Trilogyは、現在特許出願中のAnti-Cog（抗コギング）技術を開発しました。これは、事実上コギング力を除去して、これまでは鉄を利用しないモータしか使用を検討されることのなかった用途に、コアが鉄のタイプのモータを利用できるようにするものです。これにより、非常に強力な力と滑らかな操作という強力な組み合わせを、経済的なパッケージで機械メーカーに提供できるようになりました。

コアが鉄のタイプのモータの利点：

- **サイズに比して大きな力** — 層状組織を利用して磁束フィールドを集約。
- **低コスト** — 蓋のないデザインにより、磁石は一行のみを使用。
- **熱放散が効率的** — 層状組織と表面積が大きいことにより、熱が簡単に放射される。

コアが鉄のタイプのモータの欠点：

- **引力は通常通り** — 生成される力の5~13倍。
- **コギング力** — 動きの滑らかさが制限されて、速度リップルが生まれる。この点は、現在特許出願中の、Parker TrilogyのAnti-Cog技術により是正されます。

Parker Trilogyでは、コアが鉄のタイプのモータを、部品と、設計済みタイプの完全に組み込まれた位置決めシステムの両方で提供しています。コアが鉄のタイプのモータの**RIPPEDシリーズ**と、コアが鉄のタイプのリニアモータの位置決めシステム**TRシリーズ**（図6と図7）に関しては、カタログをご参照ください。



図6: コアが鉄のタイプのRippedシリーズのリニアモータ

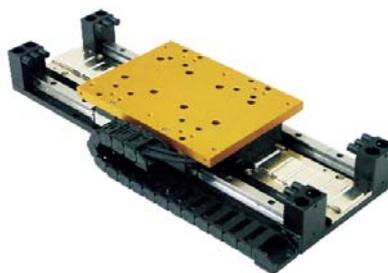


図7: コアが鉄のタイプのリニアモータ位置決めシステムのParker TrilogyのTRシリーズ

2.2 鉄を利用しないモータ

鉄を利用しないモータは、二本ある磁気ルールと、その間に乗せられた収納箱により構成されています（図8）。こうした鉄を利用しないモータは「エアコア」、もしくは「U-チャンネル」モータとも呼ばれています。収納箱の部分は、コイル内に鉄の層状組織を有してはいません—そのため、鉄を利用しない、と言われるのです。その代わり銅の巻き線が中に入れて、2列の磁気ルールとの間に置かれています。モータに鉄がないため、収納箱と磁気軌道との間で引力やコギング力は発生しません。

さらに、コアに鉄を利用するタイプに比して、このタイプの収納箱はサイズも小さいのです。その結果、極めて加速度の高い、動的性能が全体として大きいモータの設計が可能になります。鉄を利用しないタイプの設計にコギング力は一切働かず、引力もないために軸受部の寿命が長く、用途によっては、より小さなサイズの軸受部を利用することも可能になります。

Parker Trilogyが特許取得済みのビーム型の形状と、重ねて巻きつける設計により、小さなパッケージで非常に大きな力を提供できるようになりました。さらにこの設計では、従来の鉄を利用しないタイプのモータよりも熱放射の効率が改善されています。

並べて巻きつけるのではなく重ねて巻きつけを行うことにより（図9）、Parker Trilogyは出力密度の高いモータを作り上げることに成功しています。その結果、同様の出力性能を持つ競合モータよりもかなり小さいパッケージのモータを作り上げることができました。

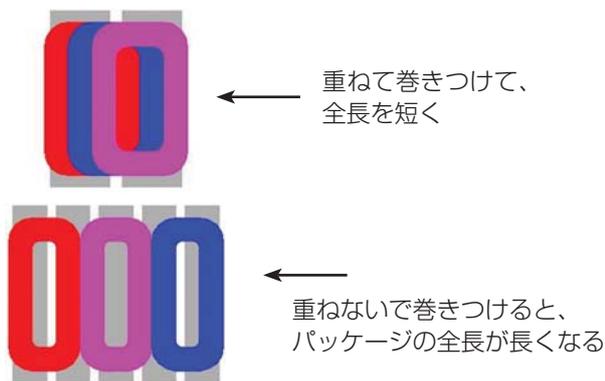


図9: 重ねて巻きつけた場合

動的性能が大きく、コギング力がないことにより鉄を利用しないモータで素晴らしい設計が可能になる一方で、コアに鉄を利用するタイプと比較すると、熱放射の面での効率が劣ります。接触する表面積が小さく、巻きの土台部分から冷却板までの熱の通る道が長いこと、このタイプのモータが完全に力を発揮した場合でも、その力は結果としてあまり小さくなるのです。さらに、磁石が2列に並んでいることにより、生成される力の大きさとストローク長の割には、全体コストが高くつく、という点も挙げられます。

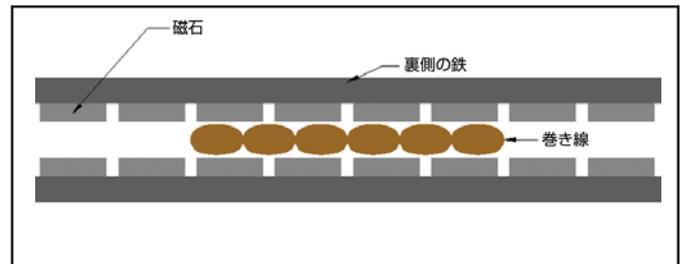


図8: 鉄を利用しないタイプのリニアモータ

Parker Trilogyは、モータの端の角を90度に広げて、ビーム型を作っています。リニアモータコイルの端の角は、モータの水平力向上には貢献していません。端の部分は力を生み出すのではなく、単純に熱を生み出しているのです。Parkerのビーム型のデザインにより、モータコイルと放熱板が接触している表面積が広がって、両者の間の熱の移動がより効率的に行われるようになるのです（図10）。重ねて巻きつけることと、ビーム型の形状が組み合わさって、従来の鉄を利用しないタイプのモータのほとんどのものよりも熱効率の良いモータが作り上げられます。その結果、モータからの熱により、ペイロードの熱膨張が少なくなるのです。高い精度が求められる用途においては、熱膨張がシステム全体の精度に悪影響を及ぼす場合もあります。Parker Trilogyのモータは、競合他社の製品と比較して低い動作温度で稼動することで、システムの精度を保ちやすくしています。さらにビーム型の形状には、モータの外形の高さを低く抑えて、頑丈な機械構造を作り上げる、という利点もあります。

結果として、出力性能が大きく、並外れた熱放射効率を持つ、コンパクトなモータの設計が可能に

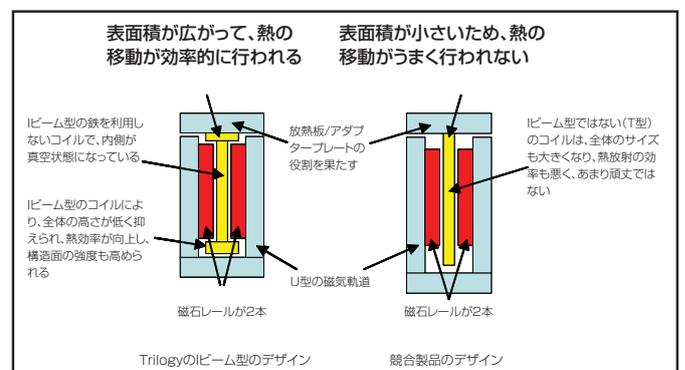


図10: Parker Trilogy特許取得済みのビーム型のデザイン

鉄を利用しないタイプのモータの利点：

- ・ **引力が発生しない** — 二本の磁気軌道の間で均等に力を配分。安全で取り扱いが簡単。組み立てる間に対処が必要な力が発生しない。
- ・ **コギング力が発生しない** — 鉄を利用しない収納箱によりコギング力がゼロになり、最高に滑らかな動きに。
- ・ **軽量な収納箱** — 鉄を使用しないため、加速度と減速度が大きくなり、機械の処理能力が高まる。
- ・ **広い隙間** — 組込みや調整が簡単。

鉄を利用しないタイプのモータの欠点：

- ・ **熱放散** — 熱抵抗が高い。Parker TrilogyのI-beam型のデザインにより、この問題が緩和されます。
- ・ **パッケージあたりの出力性能** — コアが鉄のタイプのデザインと比較した場合、RMS力が低い。
- ・ **高コスト** — 2倍の量の磁石を使用。

Parker Trilogyでは、鉄を利用しないタイプのモータを、部品キットと、設計済みタイプの完全に組み込まれた位置決めシステムの両方で提供しています。鉄を利用しないタイプのリニアモータの「I-Force」と「ML50」、そしてリニアモータの位置決めシステム「Tシリーズ」（図11と図12）に関しては、カタログをご参照ください。



図11: 鉄を利用しないリニアモータML50

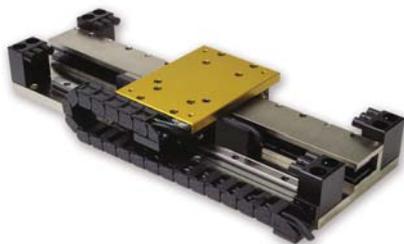


図12: リニアモータの位置決めシステムT2Dシリーズ

2.3 スロットレスモータ

スロットレスモータはちょっと変わったリニアモータの改良型で、コアが鉄のタイプのモータと、鉄を利用しないタイプのモータのデザインの要素を複数組み合わせたものです。スロットレスのモータの収納箱には（図13）、鉄の歯の積層部品がありません。コイルは鉄を使わずに巻きつけてあり、「裏側の鉄」の下に設置されています。そして、収納箱は一列の磁石の列に沿って作動します。スロットレスモータのデザインは、コアが鉄のタイプのリニアモータと鉄を利用しないタイプのリニアモータのデザインを、ある意味合成させたものだと考えることもできます。

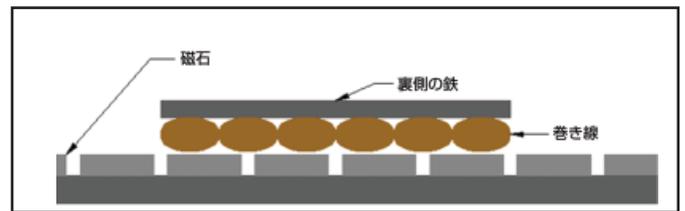


図13: スロットレスのリニアモータ

その結果、以下のような特徴を持つモータが完成します：

スロットレスのリニアモータの利点：

- ・ 磁石の列が一列
- ・ 低価格（鉄を利用しないタイプのデザインと比較して）
- ・ 熱放散の効率が良い（鉄を利用しないタイプのデザインと比較して）
- ・ パッケージのサイズに比して大きい出力性能（鉄を利用しないタイプのデザインと比較して）
- ・ 軽量かつ低い慣性力（コアが鉄のタイプのデザインと比較して）
- ・ 低い引力（コアが鉄のタイプのデザインと比較して）一軸受部の寿命が長くなり、用途によっては軸受部が小さくて済む
- ・ コギング力が小さい（コアが鉄のタイプのデザインと比較して）

スロットレスのリニアモータの欠点：

- ・ 若干の引力とコギング力が働く
- ・ 隙間が必要
- ・ コアが鉄のタイプ、そして鉄を利用しないタイプ両方よりも効率が落ちる一同じだけの動作をするのにより大きな熱を生み出す

Parkerでは、スロットレスのモータを、部品キットと、高精度位置決めシステムの両方で提供しています。本カタログ内の400LXR Positionersの項、もしくはwww.parkermotion.comの「SL Series (SLシリーズ)」のリニアモータの欄をご参照ください(図14と15)。

図14: スロットレスリニアモータのSLシリーズ

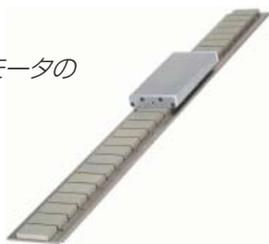


図15: スロットレスリニアモータの位置決めシステム404LXR

3.0 ガイドシステム

リニアモータシステムが、従来の位置決めシステムに搭載されていた回転式伝動装置を搭載していないとは言え、ユーザはそれでも何かしらのリニアガイド/軸受を用意してはなりません。一般に、リニア軸受はその高速および加速性能、耐用年数の長さ、精度の高さ、保守費用の低さ、頑丈さ、そして騒音の少なさに基づいて選択されなくてはなりません。このほかにも、例えば、置き場所の広さ、取り付けがどれだけ正確にできるか(平坦度、平行度、傾斜)、そして熱膨張などについても考慮すると良いでしょう。

以下のような要件を満たすガイドシステムが各種入手可能です。

- すべり軸受
- 静圧軸受
- 空気静圧軸受(空気軸受)
- 転輪(鋼もしくはプラスチックの転輪)
- 転がり接触軸受
- 磁気軸受

実際には、すべり軸受、転がり接触軸受、そして空気軸受が最もよく使用されています。高い精度は求められず、耐荷性もあまり求められない用途の場合には、無潤滑で作動するすべり軸受が最適でしょう。角レールやクロスローラ軸受などの転がり接触軸受は非常に頑丈で、耐荷性にも優れています。さらに、長距離移動をしても、非常にまっすぐで、平坦さを維持できます。空気軸受は最高の性能を発揮します。最大速度や加速度に事実上制限はなく、力が分散してしまうこともほとんどないため、非常に高精度であることが求められる用途においては、空気軸受が最適な手段になります。

4.0 サーボ機構の制御とフィードバック

リニアモータを利用することで、最高の精度と動力を得ることが可能になります。しかし、システム全体の性能は、他の部品一特にサーボ制御装置とフィードバック装置一にも依存します。本項では、リニアモータがどのように整流をして、その位置がどのように感知されて、適切な制御装置を利用することで、システムの性能を最適化することがいかに重要であるかを吟味していきます。

図16は、サーボモータ制御の従来の構造であるカスケード構造を示しています。同じ構造をリニアモータにも適用することができます。利点の一つとして、位置センサを出力部にぴったりつけて、もしくは出力部のそばに設置して、システム全体の精度を上げることができます。

欠点の一つとしては、従来の機械伝動装置がないために、外力の影響がかなり大きくなるのが挙げられます。このため、位置信号の質(分解能と精度)と、サーボ制御装置の性能(サンプリング時間、軌道の更新、そして使用される制御アルゴリズム)が、達成できる「サーボ剛性」のレベルを左右する最も重要な要素となります。

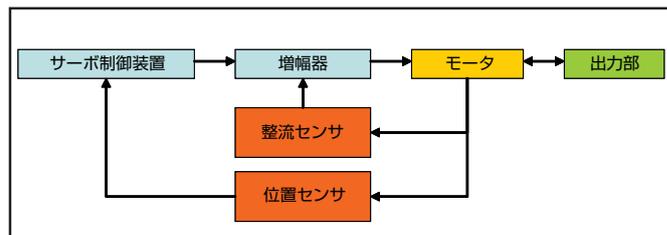


図16(a): サーボモータ制御(位置センサはモータ内に設置)

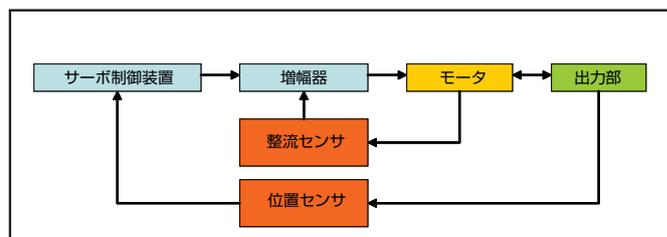


図16(b): サーボモータ制御(位置センサは出力部に設置)

4.1 モータの整流

従来型の回転サーボシステムでは、増幅器が回転部の位置を把握していることが重要です。増幅器が回転部の位置を把握していることで、電流をモータの各相へと正しく切り替えて、軸を必要なだけ回転させることが可能になるのです。多くの場合、デジタルのホール効果センサを3つ（60度、もしくは120度の間隔を空けて）利用して、軸の位置情報を6つの状態に分けて提示します。

同じ原理をリニアモータにも当てはめることができます。増幅器は収納箱の位置を磁気ルールとの相対的な位置として把握して、正しく巻き線を切り替えなくてはなりません。ホール効果用の装置（HED）を軸の一回転内に収まるように合わせて設置することはせず、ホールをモータの磁極のピッチに合わせています。「磁極のピッチ」とは、モータの電気的な周期一回で移動する直線上の距離で、回転モータの一回転とほぼ同じ距離です。

増幅器は、電気的な周期における収納箱の位置を確定した後、ホールの状態が変わった段階でモータの相を切り替えます。これは一般に台形整流と呼ばれています。

最新型のサーボ増幅器では、収納箱の位置は電源投入時のみに判断されれば良く、それだけで稼働できるようになっています。最初の位置さえ把握されれば、駆動部は位置センサから離れて整流を行うことが可能であり、その結果、デジタルHEDよりもずっと高分解能のフィードバックを得ることができます。これによって、モータは正弦波に整流されます。正弦波に整流されることで、切り替えの連続が滑らかになり、障害が減り、熱の生成も少なくなります。

サイン波状の整流を実現するもう一つの方法に、アナログのホール効果用の装置を使用する、というものがあります。アナログのホールは、磁気軌道の磁極の上を通過する際にサイン波状の信号を発生します。アナログのホールは位置フィードバックや整流フィードバックを提供するための安価な方法として、これまでも利用されています。しかし、こうした装置は電子ノイズに反応しやすく、その結果整流に影響が及ぼされてしまう可能性があります—それが翻って、動作の滑らかさを阻害してしまうのです。

用途によっては、コスト削減の観点や、巻きの回数を減らしたり、部品数を減らしたり、あるいはその用途特有の観点から、HEDが望ましくない場合もあります。しかしそれでも、サーボの駆動部はモータの収納箱の位置を把握する必要があります。こうした場合、正しく装置したサーボ駆動部を利用して、**自動整流**を行うことができます。**ParkerのCompax3**の駆動部/制御部は「試験動作付きの自動整流」機能を装備しており、これによって自動的に整流角が確立されます。このシステムでは、Compax3は電源が投入された際にモータ内で小さな動きを誘発するテスト信号を適用します。こうした動きの物理的な大きさはかなり小さく—電気角度10程度（多くのリニアモータの2mmよりも小さい）であるため、モータが「ジャンプ」してしまう心配はありません。さらに、このテスト信号は「緩和」してあるため、このようにシステムが動いてしまう可能性は最小限まで抑えられています。

4.2 位置フィードバック

直線位置フィードバックをモーションコントローラに提供する方法は色々あります。一部を挙げただけでも、アナログ変換器、ラックアンドピニオン式のポテンシオメータ、レーザー干渉計などが挙げられます。それぞれ、精度や費用が異なります。しかし、リニアモータの位置決めシステム向けに最も人気があるフィードバック装置は、リニアエンコーダです。

多くのリニアエンコーダは、「直線の見盛り」上をエンコーダの「読み取りヘッド」が移動する際に、順次増分してゆくパルス列を発信して、モーションコントローラに対して個別の「カウント」を返しています。一般に、読取ヘッドは出力部近くに搭載されて、直線の見盛りは位置決めシステムの土台部分に設置されます。リニアエンコーダでよく利用される2つのタイプは、光学タイプと磁気タイプです。

光学エンコーダは反射光走査技術を利用して、非常に高分解能かつ高精度のフィードバックを提供します。光学エンコーダはナノメートルレベルの分解能のフィードバックを提供する能力を有しています。磁気エンコーダは誘導走査技術を利用して、光学エンコーダよりもずっと経済的なフィードバックを可能にしているものの、その精度や分解能は光学エンコーダよりもかなり劣る結果となっています。磁気エンコーダは一般に、1~5ミクロンの範囲の分解能を有しています。

リニアエンコーダの3つ目の種類として、サイン波エンコーダが挙げられます。サイン波エンコーダは個別のパルスではなく、アナログのサイン波およびコサイン波信号を発信します。多くの最新型のモーションコントローラは、こうしたアナログ信号を極めて細かい分解に変換する能力を有しています。例えば、Compax3の制御装置は、1 Vpp信号を14個に分解することができます。例：正弦/余弦信号周期が16,384個に分解される。正弦エンコーダの一般的なピッチ周期は1mmですから、この分解は制御装置内で62nmまで分解されることとなります。

これらのエンコーダはすべて、増分する位置情報を提供します。したがって、制御装置が位置情報を失った際（例：電源を落としたとき）のためにホームポジションを確立しておく必要があります。一部の用途では、絶対値のフィードバックを行って、モータの実際の位置が即座にわかる必要のあるものもあるため、こうした場合にはホームの位置を確立させる必要はありません。一部のエンコーダメーカーは、同期式シリアルインタフェース（SSI）を利用してデータを転送する絶対値リニアエンコーダを製造しています。Parkerの**Aries**シリーズのサーボ駆動装置は、SSI経由で送信絶対値のフィードバックに対応しています。さらに詳しい情報に関しては、Parker担当者までご連絡ください。



図17: ParkerのACR制御装置とAriesの駆動装置

リニアエンコーダを利用する際には、スキャナー（読取）ヘッドを正しく取り付けることが非常に重要です。正しく取り付けられていないと、機械的共振効果が引き起こされて、センサのヘッドが振動することによって、計測された位置が間違ってしまう可能性があります。このような場合、制御ループで得られる処理能力と、ひいては位置決め最大の厳密さが大きく削がれてしまいます。場合によっては、位置情報がある部分の分だけすっぽり抜けてしまって、システム全体が完全に精度不良になってしまう可能性もあります。

直線の目盛りがガイドの軸受とまっすぐ並んでいない場合には、「コサイン波型のエラー」として精度が削がれてしまう可能性があります。（図18）は、リニアエンコーダの目盛りがまっすぐに並べられていない場合に、コサイン波型のエラーがどのように引き起こされるかを示しています。

実際に移動した距離がLで、 $L = L_{enc}(\cos\theta)$ です。エラーの大きさは、 $error = L_{enc}(1 - \cos\theta)$ で求められます。したがって、読取ヘッドの取り付けと、直線の目盛りを厳密に取り付けて、正確に並べることに注意を払うことが重要になります。

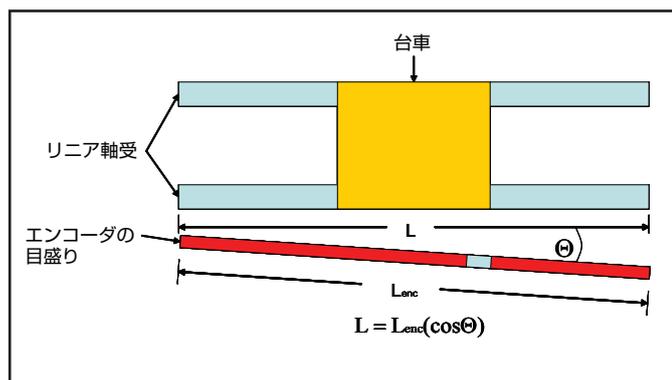


図18: エンコーダの目盛りが正しく並べて設置されていないために引き起こされたコサイン波型のエラー

4.3 サーボ制御

リニアモータの直接駆動型の性質により、中間の機械部品もなく、外部からの障害や衝撃荷重を吸収するような、ギアの減速も行われません。その結果、他の技術を利用している時と比較して、こうした障害が制御ループに対してかなり大きな影響を与えてしまうことになります。このことより、軌道更新速度の速い制御装置を用いることが非常に重要になります。さらに、速度を「フィードフォワード」制御、加速、あるいは急速に動かすことのできる制御装置を用いることも重要です。こうしたパラメータにより、ユーザは加速時や減速時、そして外部から障害があった場合に位置決めのエラーを最小限に抑えることが可能になります。

動作の内容に急激な動作などのパラメータを定義することで、非常にダイナミックな動作の位置決め精度が向上し、機械システムに与えられる応力を減らし、機械的共振の励振を最小限に抑えることが可能になります。さらに、慎重に取り扱う必要のあるペイロードにも、急激な動きを制限した定値を付与することで、その動作の内容を最適化することが可能になります。ParkerのACRとCompax3の制御装置のシリーズは、フィードフォワードのパラメータすべての最適化を可能にし、高速応答性能によりリニアモータの制御レベルを向上させます。

リニアモータシステムでもう一つ共通する問題点は、ガントリロボットの制御です。平行軸の伝動が機械的に接続されるベルトやねじで駆動するタイプのガントリロボットと異なり、リニアモータのガントリロボットには、いわゆる機械的な連結部がありません。平行軸の間で厳密な制御がなされなければ、結合部や機械部分に損傷が引き起こされる可能性があります。従来の「主導部—従属部」という制御方法は、ガントリロボットでは従属部の軸が結合をしても、主導部の軸がそれを感知できないため、うまく作用しません。

Parkerの制御装置のACRシリーズには、ガントリ・ロック機能が備えられており、これによってガントリシステムに対して非対称での補正が行われます。各軸のフィードバックを、もう片方の軸のサーボループにロックすることで、両軸が完全に連携して、結合部や機械部分の損傷は引き起こされなくなります。

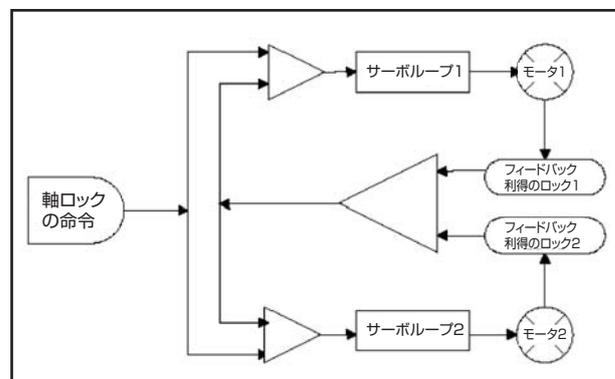


図19: ParkerのACR制御装置のガントリ・ロック機能

5.0 リニアモータの位置決めシステムのパッケージ

これまでに見てきたように、リニアモータシステムの精度に影響を及ぼす要素は数多くあります。精度は軸受の技術、構造的安定性、フィードバックシステムの組込みと精度、そして制御装置の能力によっても影響を受けます。さらに、機械の頑丈さや振動などの特性も、機械の精度全体に対して大きく影響します。

その結果、すべての部品を高精度のリニアモータシステムに組み込むには、かなりの量の専門知識が必要になります。多くの機械メーカーや実験装置のユーザは、それぞれ特定の工程に関しての専門知識を備えているだけで、部品の統合に関する専門知識はあまり有していないものです。さらに、多くのシステムインテグレータはリニアモータの設計をモデル化し、分析し、最終的に導入するような時間はありません。

このような理由により、複数の設計者が、既にパッケージ化された、設計済みのリニアモータの位置決めシステムを選択しています。設計および統合作業をベンダーに任せることで、費用効率の高い、高精度のモーションコントロールのソリューションを、非常に短期間で商品化して、顧客に届けることが可能になるのです。部品はそれぞれ、高速応答、高加速度、滑らかな移動、高速度、そして迅速なセトリング時間に向けて性能を設定してある。さらに、位置決めシステムは、接続処理、ケーブルトラック、そして実装の際に様々な選択肢を有しており、これには多軸型システムへの互換性も含まれます。

Parkerでは、ほぼどのような用途にもお使いいただけるよう、様々なリニアモータのパッケージをご用意しています。

- 高い出力と、大きな運動力学、そして、高精度を求められる用途向けの工業レベルの位置決めシステム
- 極めて高い精度の位置決めが求められる用途向けの高精度レベルの位置決めシステム
- 研究室における自動化、光通信学、電子工学、およびその他の、小型の形状内で高精度が求められる用途向けの小型高精度レベルの位置決めシステム



図20: 小型リニアモータステージMX80L

6.0 リニアモータと他の技術の比較

リニアモータが、最大の運動能力と最高の精度を提供する、ということは既に定評ある事実です。しかし、多くの機械メーカーは予算もそのときに応じてしか設定せず、それぞれの位置決めニーズを解決するのに一般的な回転型から直線型へと力を変換する技術を利用しています。本項では、競合するこれらの技術を詳しく吟味して、リニアモータに切り替えた場合の、長期的な利点について示します。

6.1 ベルトドライブ

ベルトやプーリは、自動化の世界における主力製品です。両者は、その部品コストは経済的でありながら、高速であり、妥当なレベルの位置決め再現性を有しています。しかし、ベルトドライブを使用する際にも、固有の限界は存在します。ベルトドライブシステムは一般に、以下の部品により構成されています。

- 高張力のベルト
- プーリ
- 慣性を合わせるための変速装置
- モータと連結器
- ベルトに設置した台車
- 転がり軸受もしくはすべり軸受

こうした部品の巻きのねじれ、緩み、そしてベルトの伸びなどはすべて、システムの不正確さに直結します。ベルトドライブシステムの一般的な再現性は $\pm 0.2\text{mm}$ ですが、一般的なリニアモータシステムの再現性は $\pm 1\mu$ です。その場合にも、ベルトを最適な具合に張って、軸受を最初から組み込んでおく必要があります。さらに、フィードバックは出力部ではなく、モータに接続されています。これによって、システムの精度はさらに落ちることになります。

さらに、これらの部品はすべて「バナ状」の性質をしており、共鳴したり、セトリング時間に遅れを生じさせたりします。したがって、ベルトドライブシステムは高速で稼動することができるものの、振動を吸収したり、迅速に整定したり、という目的のために調整を行うのは難しいと言えます。この問題は、長年にわたってベルトを利用し続けた場合には、ベルトが緩んでしまう傾向があるため、状況は悪化する一方です。結局は、この避けられない緩みのせいで、ベルトドライブは作動する期間が限られてきてしまいます。

最後に、ベルト駆動型のシステムは、保守を頻繁に行う必要がある場合が多いものです。ベルトは時間を追うごとに張りの強度が緩み、場合によっては歯から外れてしまう場合もあります。すべり軸受は故障する場合もあります。連結器は、外れてしまったり、ぴっちり合わなかったりします。こうした問題点すべてによって、ユーザは貴重な生産時間を中断して、アクチュエータの保守に時間を割かなくてはならなくなってしまいます。

リニアモータは、その直接駆動型の性質により、保守は必要ないも同然です。軸受にきちんと油さえ差してあれば、位置決めシステムを保守するためにすべきことは、他にはほとんどありません。機械的な伝動装置は一切使用していないため、リニアモータの位置決めシステムは、巻きのねじれ、緩み、ベルトの伸び、もしくは整定によって起こる問題に直面することはありません。リニアモータの位置決めシステムは非常に反応が良く、極めて迅速に整定がなされるのです。ベルトドライブの加速度や速度の特性と同じかそれ以上の性能を発揮しつつ、ベルトドライブよりもずっと高精度の位置決めを行うことができます。最後に、リニアモータはその稼働期間に限りはありません。どれだけ長期間にわたって作動したとしても、動的な性能はまったく変わることがありません。

6.2 ねじ駆動型システム

ねじ駆動型の位置決めシステムは、比較的高精度の位置決め用途でよく使われています。ねじ駆動型の位置決めシステムは費用効率も高く、用途ごとのニーズに応じて、様々なレベルの精度のシステムを利用することが可能です。ねじ駆動型のシステムは一般に、次のような部品で構成されています。

- ・ 精密に研磨、もしくは圧延されたボールねじもしくは送りねじ
- ・ ボールナットもしくはすべりナット
- ・ モータ
- ・ モータブロックと連結器
- ・ 台車
- ・ リニアガイド — 一般に角レール、クロスローラ、丸レールのいずれか

送りねじは一般に効率が悪く、多くの場合50%未満までしか到達しません。費用効率は良いものの、ナットは摩擦で損耗する傾向があります。さらに、送りねじのほとんどは精密に研磨されていないため、その精度や再現性が劣る場合があります。効率が90%近いボールねじは、精密に研磨されたパッケージ、もしくは精密に圧延されたパッケージで入手可能です。しかし、そのボールねじも時間の経過と共に摩耗して、ねじリードの変形が生じたり、緩みが出てしまう傾向があります。こうした問題が、やがて精度の低下とセトリング時間の鈍化につながるのです。いずれの場合にも、速度はねじピッチとねじの長さによって制限されます。ねじが長くなればなるほど、高速時に「たわみ現象」を発生する傾向があります。そのため、リニアモータの速度や加速度性能には遠く及ばなくなってしまうのです。突き詰めるうちに、ねじがあまりにも長くなって、製造時に扱いづらくなってしまいます。

最後に、ベルトドライブ同様、ねじ駆動型のシステムも保守を必要とします。いずれ、ナットは摩耗し、連結部は外れ、ねじは交換しなければならなくなります。その際にも、製造の手を止めて、ユーザの貴重な時間とお金を割かなくてはならないのです。

リニアモータには中間に機械的な伝動装置がないため、ねじ駆動型のシステムに見られるような欠点はありません。さらに、長さで制限を受けたり、長さに比例するような動的性能で制限を受けたりすることはありません。リニアモータの欠点として一つ挙げられるのは、制動を必要とするような垂直方向の用途に本質的には適していない、ということです。一般に、この問題は、圧空の、ねじベース、もしくは錘ベースの平衡錘を追加することにより解決することができます。

6.3 コストの比較

多くの場合、リニアモータシステムを購入する際の先行投資額は、ベルト駆動型のシステムやねじ駆動型のシステムよりも高くなります。しかし、場合によっては、コストを同レベルにまで引き下げたり、場合によっては2つのシステムよりも低く抑えたりすることも可能です。高い精度を求める多くの機械メーカーは、精密に研磨されたボールねじと、リニアエンコーダによるフィードバックを購入しています。一般に、手元の位置決めシステムにこうした部品の分の追加費用が生じることで、リニアモータシステムよりも全体額が高くなってしまっているのです。さらに、リニアモータの製造方法が改善され、製造量が拡大していることにより、リニアモータの費用が引き下げられているのです。長期にわたって見た場合、ユーザは価格の差が劇的に縮まっていくのを目撃することになるでしょう。最後に、所有者としての（保守や故障時間などを考慮に入れた）全体費用を比較した場合には、リニアモータの方がずっと安価で済むこととなります。

7.0 リニアモータの未来

リニアモータの分野は、今後劇的に発展していくことが予測されます。コストがどんどん引き下げられて、技術革新がますます行われれば、もっとももっと多くの産業がリニアモータの技術を取り入れるようになるでしょう。大きな動力を取り扱い、高精度で、保守がほぼ完全に不要なリニアモータは、従来の回転型から直線型へと力を変換させる伝動装置のユーザに魅力的に映るはずで

リニアモータの創生期においては、半導体や電子工学などのハイテク産業のみがリニアモータの技術を取り入れていました。その後、工作機械などの産業が直接駆動型のシステム固有の利点を取り入れるようになって、現在ではリニアモータの売上全体の内の1/3近くを占めるようになってきています。現在では、原材料の取り扱い産業や、包装産業、医療産業、そして食品加工産業が、ベルト駆動型システムやねじ駆動型システム、そして空圧型システムからリニアモータに切り替えつつあるのです。こうした新しい顧客層すべてが、本技術の浸透度を臨界量にまで押し上げて、広く支持を受けるよう、貢献してくれているのです。実施、リニアモータは製造業全体に対して、極めて画期的な影響を及ぼすようになりそうです。