

加速度

単位時間あたりの速度の変化量。特に指定が無い限り、Newportは加速度をステージが250msで最大速度に到達する値に設定しています。したがって、最大加速度=最大速度×4/S

MTBF

MTBFは、Mean Time Between Failure（故障が起きるまでの平均時間）を意味する略語で、製品の信頼性を表す1つの指標です。パーツやコンポーネントの試験および統計分析により、製品が故障する割合を予測します。これは、信頼性を予測する最も一般的な方法の1つで、確立された分析モデルが使用されます。多くの分析モデルが存在するため、モデルを選択する際には製品やその用途に固有のさまざまな要素を考慮する必要があります。

ステージコンポーネントの検討

Stage Components Considerations

どの位置決め技術がアプリケーションに適しているかを選択することは、複雑な問題をはらんでいます。多種多様なリニアステージ、回転ステージ、アクチュエータがあり、それぞれに長所と短所が存在します。ステージの仕様は確かに重要な選択基準ですが、仕様が十分に網羅されていなかったり、各アプリケーションに直接適用できなかったりする場合があります。このため、ステージを構成するコンポーネントに備わっている能力をよく理解することが重要になります。Newportでは、お客様に適切な選択をしていただくため、すべてのステージを詳しくご紹介しています。このセクションでは、高精度ポジショニング機器に使用される最も一般的なコンポーネントの要点を、その長所と短所をあわせて解説します。

ベアリング

ベアリングは面と面との間の摩擦を減らし、滑らかな回転や直進動作を可能にします。ベアリングは、ステージの振れ誤差、つまり直進ステージの場合の真直度、平坦度、ピッチ、ロール、ヨー、回転ステージの場合の偏心と揺動を決定する主な要素です。また、ベアリングはステージの剛性（行程方向の剛性ではなく）と静的荷重容量を決定します。一方で、動的荷重容量はベアリングではなく主に駆動システムの剛性とモーター出力により制限されます。

さらに、最適な性能を実現するため、ベアリングが取り付けられるキャリッジと本体には、ベアリングに適合する同等の表面品質が求められます。

アリ機構スライド

アリ機構スライドは最も単純な直進ステージで、主に手動による位置決めで使用されます。図1に示すように、接触する2つの面が互いにスライドする構造になっています。アリ機構スライドは移動距離が長く、剛性や耐荷重の点でも優れています。ほかのタイプのベアリングよりも衝撃に強く、汚れに対する抵抗力もあります。その反面、スティクションが大きく、移動速度によって摩擦の大きさが変化するため、精密に成業することが困難で、感度にも限界があります。

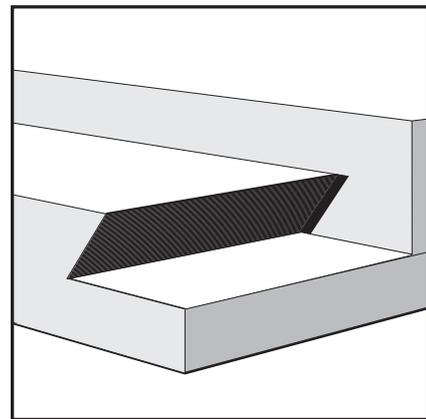


図1: アリ機構スライド

ボールベアリング

ボールベアリングスライドは、すべり動作を回転動作に変えることによって摩擦を小さくします。図2に示すように、ボールはすべり溝に相当するV字溝または焼き入れ鋼製のロッドに挟まれています。ベアリングの遊びをなくすには、すべり溝には外から予荷重を与えてボールに押し付けることが必要です。予荷重を与えてもベアリングの摩擦は非常に小さいため、きわめて滑らかな動きが得られます。ボールベアリングスライドは、個々のボールとすべり溝が点でしか接触しないのでほこりなどによる影響を受けにくく、ほこりが付いても溝から押し出されるようになっています。

ボールベアリングは荷重を伝える接触面積が小さいため、耐荷重はクロスローラベアリングに比べて小さくなります。耐荷重を大きくするには、ボールの直径を大きくするか、またはボールの数を増やす必要があります。すべり溝をアーチ型または円形（図3）に研磨すると、アールがボールの半径に近くなり、平面的なすべり溝を使用したときよりも小さいボールを使用することが可能になります。

ほとんどのボールベアリングスライドは、ボールの回転軸に対して45°方向にベアリングとの接触点が4つあります。この荷重率は均等ですが、一部に差動スリップが生じます。これは、回転軸に近い位置にあるベアリングの接触点は、より離れた位置にある接触点よりも早く動くためです。差動スリップは摩擦と摩耗を生み、性能および速度を限定する場合があります。ゴシックアーク溝形状2点接触構造の二列式ボールベアリングスライドでは、差動スリップが最小限に抑えられますので、荷重容量がより大きくなります。

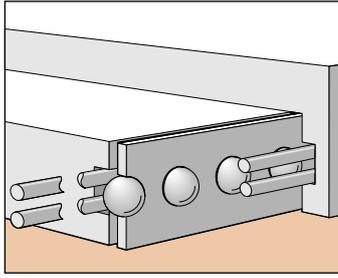


図2. ボールベアリングスライドは摩擦が非常に小さく、耐荷重は中程度です。

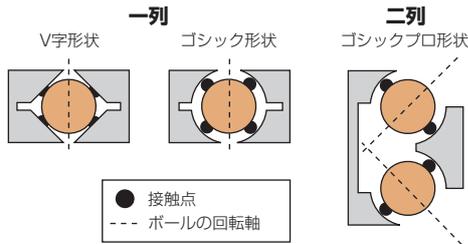


図3. ベアリングのすべり溝、ボールの直径、およびボールの数はステージの耐荷重に影響します。

クロスローラベアリング

クロスローラベアリング (図4) には、ボールベアリングのすべての長所に加え、耐荷重と剛性が大きいという長所を備えています。これは、点接触のボールではなく線接触のローラを使用しているためです。線接触には平均化するという性質があり、一般に偏角や直進の振れはボールベアリングよりも小さくなります。一方、クロスローラベアリングは製造や組み立てに多くの注意を要するため、コストが割高になります。また、すべり溝との接触面の異物を排除しにくいいため、ボールベアリングに比べて汚れに敏感なのが難点です。

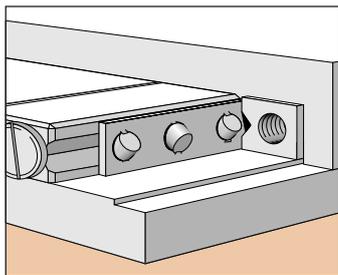


図4. クロスローラベアリングには、ボールベアリングのすべての長所に加え、耐荷重と剛性が大きいという長所を備えています。

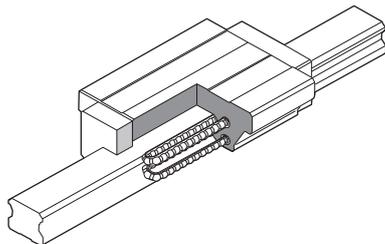


図5. 循環ベアリングでは非常に長い距離の移動が可能で、大きな耐荷重が得られます。

循環ベアリング

循環ベアリングは、キャリッジに取り付けたトラックをボールまたはローラが循環する構造になっています。これらのモジュールは、ステージのベースのそれぞれの側にある精密研磨されたレールに沿って移動します。循環ベアリングは、ボールあるいはローラが予荷重領域を出たり入ったりする必要があるので、一般にリニアベアリングほど滑らかではありませんが、非常に長い距離の移動が可能で、実荷重によるアプリケーションにおいて大きな耐荷重が得られます。また、その構造上、デューティサイクルの高いアプリケーションでリニアベアリング方式のステージを使用したときに問題となるベアリングケースの移動もありません。

駆動システム (ドライブ)

直接駆動システムと間接駆動システムの違いについて検討します。直接駆動システムでは、ねじや伝搬システムを使用せずにモーターの動きと移動が直接結合します。通常、これらのシステムはより高品質な摩擦抵抗のない移動が可能ですので、速度と加速度が高まります。最も一般的な精密直接駆動システムは、リニアステージ用ブラシレスリニアモーター、あるいは回転ステージ用ブラシレストルクモーターのいずれかを特徴とします。リニアモーターについては、モーターに関する説明部分で後述します。

直進および回転式の精密位置決め機構で一般に使用される駆動システムには、リードスクリュー、ボールスクリュー、およびウォームドライブがあります。速度、耐荷重、バックラッシュ、ドライブの剛性といったシステムの動的特性を左右するシャフトの継ぎ手やギヤボックスは、駆動システムとそれを駆動するモーターとの間に設置されます。ギヤボックスは、多くの場合モーターに組み込まれています。

リードスクリュー

荷重を移動させるための非常にポピュラーな方法は、回転するスクリューにナットを取り付け、それを軸方向に動かす方法です (図6参照)。リードスクリューでは接点がスライドするため、スクリューの磨耗速度は稼働量に直接比例します。リードスクリューの長所としては、自動的にロックできる、初期コストが小さい、製造が容易である、材料の選択肢が多い、といった点が挙げられます。

スクリューとナットの間の遊びをなくすため、予荷重を与え、ナットをスクリューに押し付ける必要があります。予荷重には、外付けばね、重力 (垂直使用時のみ適用可能)、またはばねを挟んだダブルナットを使用して行います。

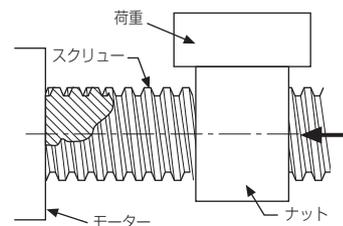


図6. リードスクリューが回転すると、スクリューの軸方向に荷重が移動します。

循環ボールスクリュー

循環ボールスクリューは本質的にはリードスクリューですが、スクリューとナットの間にあるトラックを利用してボールベアリングを循環します（図7）。パーツの数が多いことから公差に注意する必要があり、製造コストが割高になります。スクリューの外形は、循環するボールに適合した丸いかたちをしています。

ボールスクリューがリードスクリューに比べて優れている点は、ステージの再現性と精度に影響を与えるスクリューの熱発生が小さく、伝達効率が高いことです。そのため摩擦が少なく、ほとんどのボールスクリューステージは似たようなリードスクリュードライブステージに比べ、速い速度と小さい移動量が得られます。ボールスクリューのさらなる利点は予測可能な長寿命と低摩耗率です。しかし、ボールスクリューはセルフロックできないため、垂直に使うアプリケーションなどに制限があります。また、ボールスクリューはナット内の循環ボールにより、発生するノイズがリードスクリューに比べ多くなります。

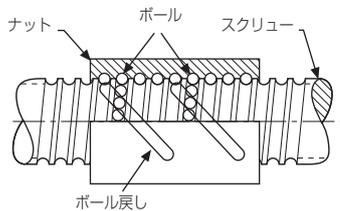


図7：ボールスクリューは循環ボールを使い、摩擦を低減しているため、従来のリードスクリューより高効率が得られます。

ウォームドライブ

ウォームギヤシステムは、スクリュー（ウォーム）とギヤ（ウォームホイール）を噛み合わせて回転モーションを別の方向への回転モーションに変換する手段です。スクリューが回転すると、ギヤと噛み合っているウォームのネジがギヤを回転させます（図8）。ウォームドライブシステムは一般的に回転ステージのドライブシステムとして使われており、非常に薄型な設計が可能です。バックラッシュを除去するために、高い横剛性の洗練されたウォームによる予荷重によってウォームとウォームホイールが完全に接触しています。ウォームドライブ回転ステージの直接駆動またはベルト駆動に対する利点は高いトルク容量とセルフロック機能です。

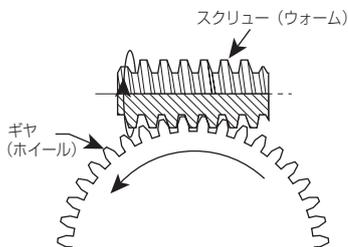


図8：ウォームドライブシステムは速度が早く、大きなトルクが得られます。

ギヤボックス

ギヤボックスは、回転モーションと力を伝えるための装置です。標準のモーターでは困難あるいは不可能な高いトルクや分解能を得るための減速手段としてよく用いられます。たとえば、ギヤ比が10:1のギヤボックスでは、出力シャフトが1回転する間に入力シャフトが10回転します。このギヤ比と200ステップのモーターを組み合わせると、出力シャフトの有効分解能が2,000ポイント/回転のデバイスが得られます。

分解能を変えられるだけでなく、非一体型ギヤ比のギヤボックスを使用すると出力トルクや速度を変えることもできます。上記の例では、トルクが大きくなり、速度が小さくなります。

ギヤボックスはかなりの量のバックラッシュやヒステリシスをモーションに導入してしまいます。たとえバックラッシュフリーの仕様であっても、ほとんどのギヤボックスはヒステリシスや長い時間をかけて進行するバックラッシュに妥協することになります。Newportでは可能な限りギヤボックスの使用を避けております。

ベルトドライブ

ベルトドライブ（図9参照）は機能としてはギヤボックスに類似していますが、ピニオンを直接接触させるのではなくピニオン間に張った歯付きベルトを介して動力と動作を伝達します。ベルトドライブはより低い減速比を使用してトルクとサーボ感度を向上させることができますから、ギヤボックスよりも多くの設計上の選択肢を提供します。また、ベルトドライブではバックラッシュの問題が発生せず、メンテナンスを殆ど必要としません。しかし、ベルトドライブでは幾らかのヒステリシスが発生し、このヒステリシスは口径の大きい方のピニオンが半回転する間にゆっくりと蓄積します。ベルトヒステリシスが動作性能へ影響するのを防止するため、Newportでは可能な限りエンコーダーをベルトドライブの後に配置しています。

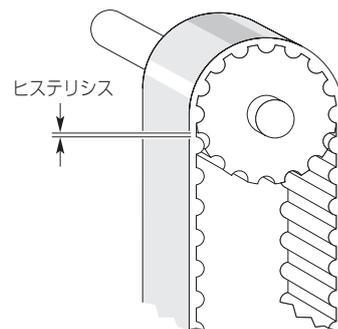


図9：ベルトドライブを使用するとより低い減速比を使用できますから、トルクとサーボ感度の向上が可能になります。

フレキシブル・シャフト・カップリング

カップリングは、ドライブトレインで完全に一致していない2つの軸の間で力やモーションを伝えるために使用されます(図10)。フレキシブル・カップリングは、一般には軸が平行でなかったり、角度がずれている軸を接続するために使用します。カップリングの構造にもよりますが、それ以外の軸の不一致を処理できるカップリングもや、ねじり剛性や耐荷重の大きなもの、あるいは高速に対応できるものもあります(図11)。

カップリングは無限の剛体ではないので、すべてのカップリングはモーションにいくつかのヒステリシスを与えます。モーション性能においてカップリングによるヒステリシスの影響を避けるため、Newportでは可能な限りエンコーダーをカップリングの後に配置しております。

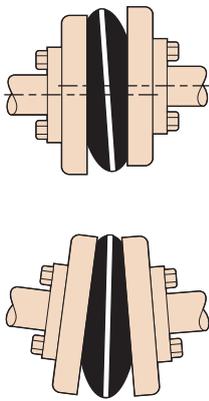


図10: シャフト・カップリングは、2つの回転軸の角度や平行性のズレを調整します。

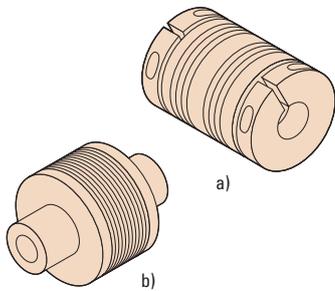


図11: フレキシブル・カップリングにはさまざまな構造があります。
a) ヘリカル: 軸が一致していなくても、バックラッシュがなく、安定した速度が得られます。
b) ベローズ: 通常は軽量のアプリケーションで使用されます。9°までの角度のずれ、および1/4in.の平行性のずれに対応できます。10,000rpmまでOK。

フィードバックデバイス

フィードバックデバイスの基本的な役割は、物理的なパラメータを電気信号に変換し、モーションコントローラが使用できるようにすることです。一般的なフィードバックデバイスには、位置フィードバック用エンコーダ、速度フィードバック用タコメータ、行程終端情報用光学スイッチまたはメカニカルスイッチ、固定基準位置用インデックス信号、ブラシレスモータの位相情報用ホール効果センサがあります。

間接測定法と直接測定法

フィードバックデバイスがモーションシステムのどこで測定を行うかが、コントローラにフィードバックされるデータの品質に直接影響します。フィードバックデバイスの位置が制御対象に近いほど、コントローラが好ましい結果を得る効果が高まります。たとえば、位置制御中にステージキャリッジのリニア位置を直接測定した場合、リードスクリューの角度位置を測定した場合や、エンコーダとキャリッジの間の駆動システムのアーキテクチャに関する知識からキャリッジ位置を推定した場合よりも高品質なフィードバックが得られます(図12を参照)。前者は直接出力測定法として知られ、駆動システムが引き起こすバックラッシュ、ヒステリシス、windupなどのエラーを回避します。間接測定法として知られる後者のタイプはこれらのエラーの影響を受けます。

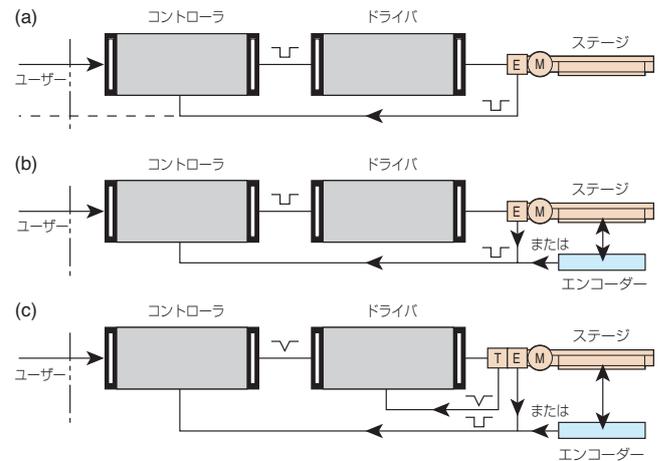


図12: クローズドループシステム。
a) 間接測定法ロータリーエンコーダを使用
b) 直接測定法リニアエンコーダを使用
c) 位置フィードバック用のエンコーダと速度制御用タコメータを使用

ロータリーシャフトエンコーダは、低コストでロータリーモータの位置を確認できる、スクリュー駆動型ステージに理想的なフィードバック機構です。Newportのステージでは、ロータリーエンコーダはいつでもリードスクリュー、ボールスクリューまたはウォームスクリューに直接取り付けられます。これにより、ベルト、ギアまたはカップリングwindupやバックラッシュが原因のエラーはなくなります。最終的な位置出力は、依然としてリードスクリューやボールスクリューの精度に依存します。

ほとんどのロータリーエンコーダは直交エンコーダですので、2種類のデジタル信号がオフセット角90°で出力されます。通常、これらの信号はチャンネルAおよびチャンネルBと呼ばれます(図13)。チャンネルBが加わることで、フィードバック信号に方向情報が提供されます。方向検出能力は、エンコーダの回転がパルス端で停止した場合に重要となります。方向を解釈できなければ、カウンタが立ち上がり信号の端を通る各遷移をカウントしてしまい、位置を見失います。直交信号スキームのもうひとつの長所は、チャンネルAとチャンネルBの立ち上がり端と立ち下がり端に基づいて、エンコーダサイクルごとに4つの位置を特定できる点です。一般的に、ロータリーエンコーダは1回転あたりサイクル数(CPR)で特徴付けられますが、1回転あたりポイント数または1回転あたりカウント数で特徴付けられる場合は、直角位相が考慮されます。

ロータリーエンコーダの多くが、インデックスパルスと呼ばれる機能を有します。インデックスパルスは、エンコーダーが回転するたびに1回発生します。これは、エンコーダの回転時にエンコーダが1カウントする間の絶対的なメカニカル基準位置を確立するために使用されます。このインデックスパルス信号をホームスイッチやメカニカルゼロ信号と共にホーミングに使用すると、ほとんどのスクリュウ駆動ステージにおけるホーミング再現性が向上します。

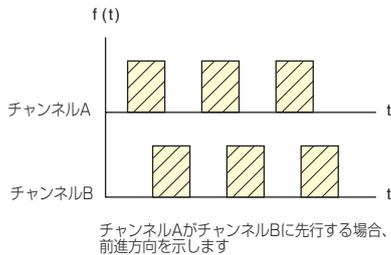


図13: 直交エンコーダ出力は、位置フィードバックのほかにも方向情報も提示します。

直接読み取りエンコーダ

ロータリーシャフトエンコーダは効率的かつ低価格のデバイスですが、そのデータは実際にはモータシャフトの角度位置を示しています。このため、リードスクリュウの累積エラーや周期エラー、熱膨張、ねじのウィンドアップ、ナットのバックラッシュなどの数多くのエラー発生源が存在します。これらは、ロータリーエンコーダから導いた位置情報と、荷重が本当に存在する位置との間の精度が低下する原因となります。ユーザーの荷重と完全に一致する場所に位置フィードバックデバイスを取り付けることは物理的に不可能ですが、近くに取り付けることで、実際の位置をより正確に示すことができます。これが、直接読み取りエンコーダの主な長所です。

直接読み取りエンコーダは長いリニアスケールと小型の読み取りヘッドで構成されます。スケールはキャリッジに直接取り付けられ、固定読み取りヘッドがキャリッジの位置を直接読み取ります。スケールが固定で読み取りヘッドが動くシステムも存在します。ロータリーステージでは、大きな直径のロータリーディスクが回転プレートに取り付けられます。ほとんどの場合、高精度ステージと共に使用される直接エンコーダは非接触光学機器です。

直接読み取りエンコーダにはさまざまなグレードがあります。一般的に使用されるのはスチールスケールで、信号周期は20 μm です。さらに高品質なスケールはガラススケールで、4 μm 以下の信号周期が特徴です。ほとんどのエンコーダヘッドは、正弦曲線信号に加え、90°シフトした二次信号を読み取ります。補間回路を小型ヘッド内部に取り付けることで、ほとんどのシャフトエンコーダに匹敵するさまざまな差動直交信号を提供できます（図13を参照）。この信号の長所は、大部分のモーションコントローラがこの信号を読み取れる点です。内部補間を行うことで、20 μm の信号周期をもつスケールで最大50 nmの分解能に対応します。

さらに高い分解能が求められるアプリケーションでは、正弦曲線信号1Vppのエンコーダが広く使用されます。この場合、エンコーダの信号補間は、より高度な信号分割を行えるモーションコントローラが実行します。たとえば、XPSコントローラは32,768倍に信号を再分割することが可能ですので、20 μm ピッチのスケールからエンコーダ信号のノイズよりはるかに小さいサブnm域の分解能が得られます。XPSコントローラでは、有意義な値を提供するため、ユーザーが入手可能な分解能はエンコーダのノイズ値を超える値に限定されますが、コントローラが内部計算に使用する内部分解能では、常に完全データを使用します。

タコメータ

速度調節が必要なアプリケーションでは、速度は直接測定するか、エンコーダが提示する位置情報から導き出します。より高品質な速度制御には、モーター速度に電圧や電流レベルが比例するタコメータが使用されます。タコメータのフィードバックは速度変化に対応して瞬時に変化するので、コントローラから高速補正とさらに厳しい調節を行えます。

オリジンスイッチとリミットスイッチ

オリジンスイッチは再現可能な基準点を定義するデバイスです。このスイッチは、オン/オフスイッチやホール効果スイッチなどのメカニカルスイッチの場合も、光学エンコーダのインデックスパルス（頂点がゼロ）などの光学デバイスの場合もあります。リミットスイッチは、定義したポイントを超えて移動することを防止するために使用されます。通常、このスイッチは、ステージの機器行程が停止する直前のステージ行程終端に配置されます。メカニカルスイッチの場合も、光学スイッチの場合もあり、リミット値に到達するとモーターの電力を下げるように設計されています。リミットスイッチはリニアステージと関連して使用される場合がほとんどですが、ケーブルの巻き込みなどの問題を避けるためにロータリーステージで使用される場合もあります。機械駆動型マイクロスイッチは、モーターの電力を下げ、過剰走行を防止するために使用される場合がほとんどです。メカニカルスイッチの再現性は、そのヒステリシスと摩耗耐性により制限されます。

モーター

ブラシDCモーター

ブラシDCモーターは、基本的には磁界の中に回転子（ロータ）を置いた構造になっていて、モーターのコイルに電流を流すとロータが回転します。回転速度は付加する電圧に比例し、トルクは電流に比例します。DCモーターの最大の特徴は、その動作の滑らかさと速さにあります。一般的なダイナミックレンジは $10^3 \sim 10^4$ です。DCモーターは効率も高く、大きな出力/重量比が得られます。ステッピングモータとは異なり、アイドル状態ではフルトルクは発生しません。

シャフトに設置したロータリーエンコーダを利用して高精度のクローズドループサーボ位置決めや速度制御を行うことが可能ですが、さらに高精度の位置決めが必要なアプリケーションでは、ドライブトレインに設置した高分解能の直接位置読み取りエンコーダとシャフトに設置したタコメータが必要になります。

ステッピングモーター

ステッピングモータは、磁気による引力と反発力の基本原理によって作動します。ステッピングモータは、デジタルパルスを機械軸の回転に変換します。回転量は生成される入力パルスの数に比例し、速度はパルスの周波数に比例します。一般的なステッピングモータには1つの永久磁石、および（または）固定子の付いた鉄製回転子があります。ステッピングモータを回転させるために必要なトルクは、図14に示すようにモーターを整流することによって発生させます。

DCモーターとステッピングモーターの1つの違いは、DCサーボモーターに電圧を付加するとトルクと回転の両方が発生するのに対し、ステッピングモーターでは電圧を付加してもトルクしか発生しない点です。ステッピングモーターを回転させるためには、流す電流を整流する（切り換える）必要があります。

整流とは、モーターの電磁コイル中を流れる電流の大きさと方向を切り換える操作です。ブラシDCモーターは自動的に整流が行われるように設計されていますが、ステッピングモーターにはそのような自動整流機能はありません。

2つのコイルに同時に通電すると、フルステップのモーションを10またはそれ以上の小さなステップに分けることができます。小さなステップに分割することをミニステップ、あるいはマイクロステップと呼び、このようにして位置決めシステムのモーションの滑らかさや分解能を上げることができます。現代のモーションコントローラは1つのフルステップを非常に高い数のマイクロステップに分割することが可能で各ステッピングモーターのフルステップごとでマイクロステップを実行する場合、数にリミットがあります。

このマイクロステップ機能のあるモーターはモーション感度の究極の限界を提供します。さらに実際には、マイクロステップは同じではなく、モーターの設計や負荷によって5~20%変化します。この効果は、ほとんどのステッピングモーター駆動ステージの低速での速度安定性に限界を与えます。

ステッピングモーターは、クローズドループのDCサーボシステムに代わりに、ステッピングモーターをオープンループで使用することがよくあります。パルスをカウントすることは位置およびステッピングモーターを仕様内のトルクおよび速度レンジで使った場合の確実な動作の良い指標になります。しかしながら、ステッピングモーター駆動は、ステップを飛ばしたり、余分なステップを追加したり、モーターの失速など予測不能な仕様レンジ外の結果になる可能性があります。シャフトエンコーダをステッピングモーターに追加することはステッピングモーター動作の信頼性を検出する方法です。

ステッピングモーターをほとんど瞬時にトルクを発生させられるオープンループで動かすことは、DCブラシモーターをクローズドループで動かすよりも早く駆動できます。それゆえ、ステッピングモーター駆動ステージは機械的な静止摩擦をうまく処理します。DCモーター駆動ステージはモータートルクが静止摩擦を上回り、しばしば位置を飛び越えてしまうことが起きます。この位置オーバーシュート、駆動系での機械的ヒステリシスの組み合わせは、DCブラシモーターステージの最小移動駆動能力に制限を与えます。同じステージで高品質のステッピングモーターを搭載した場合は非常に小さなステップ駆動した時に一貫性のある結果で駆動することが可能です。

ステッピングモーターが固定されているときに熱を発生させないというのは良くある誤解です。なぜなら、それはモーター固有の機能では無いからです。それは完全にモーションエレクトロニクスの能力に依存します。今日のステッピングモーター駆動のほとんどがモーター巻線の電流は常にオンです。XPSのような、いくつかの優れたモーションコントローラは、駆動後の電流を自動的に低減するスタンバイ電流調整機能を持っています。

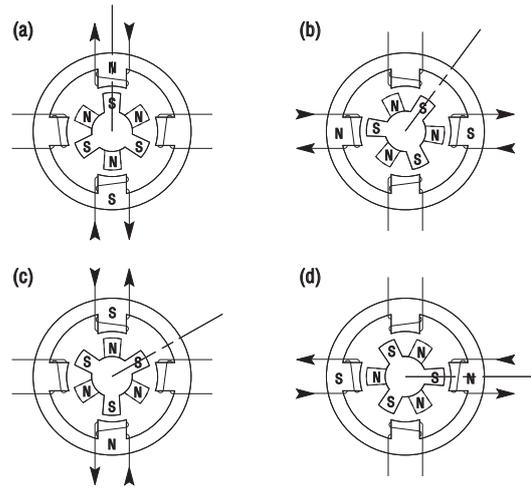


図14：ステッピングモーターでは、モーターの固定子の極に交互に電流を流したり止めたりすることによってロータを回転させるためのトルクを発生させます。

リニアモーター

リニアサーボモーターは精密位置決めシステムにおいて、ボールスクリュウのような伝統的なメカニカルアクチュエータに比べて数多くの利点を持ち、とても重要な部品になっています。リニアモーターは磁力を生成する永久磁石とコイル電流に比例して力を発生するコイルアセンブリによって構成されています。

主な設計上の選択はコイルアセンブリの中の鉄の有無に関連しています。いくつかの市場の意見では、アイロンレスモーターは高品質部品であるが、単純すぎる。アイロンコアモーターは利点の強調なしにアイロンコアモーターを誇張しすぎています。

コイルアセンブリに鉄を使う主な利点はモーター効率の向上です。その結果として、アイロンコアモーターは近いサイズのアイロンレスモーターより約30~40%熱発生が少なく、単位体積あたり10~30%多くの連続的な力を発生することが出来ます。この温度変化はとても重要であり、高精密機械の主要な誤差の原因です。

アイロンコアモーターのアイロンレスモーターと比べた主な欠点はコイルとマグネットの間に強い引力があり、「コギング」という定期的な力があることです。コギング力は高速において達成可能な速度安定性に影響を与えます、しかしXPSのような高性能電子機器ではアイロンコアモーターからの速度リップルが、約100mm/sまで目に見えない速度アップを行います。また、高速でもXPSコントローラはIMS-LMステージ(アイロンコアモーター使用)の速度安定性を約±0.2%に維持することができます。

アイロンコアモーターは磁束追加の結果、インダクタンスが増加します。アイロンベースコイルのブラシレスモーターは電気的時定数がアイロンレス設計の5~20倍で達成可能なサーボ帯域幅を低くする効果があります。このパラメータは優れたダイナミック性能を得る鍵であり、非常に短いストロークでのモーションのステッピング時間を直接決定します。したがってアイロンレスモーターを使ったXMステージは10 μmの非常に短いストロークのモーションでアイロンコアモーターを使ったIMS-LMステージより速く実行することができます。短いストロークのモーションの場合、ステージの最大速度と加速度は無関係です。

コンポーネントが動くか固定されるかの決断はアプリケーションに依存しています。可動マグネットトラックは大きな移動質量と大きな可動範囲に不利な条件を課しますが、固定コイルケーブルを使うことができます。可動コイルは一方では、移動質量を低減し、よりコンパクトにできます。しかし、電気コイルケーブルによる適切なサービスレベルが必要です。

伝統的に、任意に移動できるリニアモーター設計は、コイルアセンブリにマウントされた3つのデジタル磁気センサに基づいて、巻線を一連の6つのステップで励起する増幅器と共に3相コイルに適用されています。純粋に一定速度で動く必要がある場合、よりシンプルな一連の6つのステップの代わりに正弦波の整流を代用することができます。これは、リニアエンコーダを使用してコイル電流の関係性を決定する（XPSコントローラで実行したように）、あるいはコイルアセンブリにマウントした2つのアナログ磁気（ホール）センサを使用してコイル電流を均衡させることで達成できます。エンコーダを基にした手法では、サーボコントローラが軸当たり2種類のアナログDAC入力を提供する必要があり、電源を入れる際は“位相検出”初期設定ルーチンを実行しなければいけません。エンコーダを基にした手法とアナログセンサを基にした手法のどちらも、正弦波の整流には、新しい入力に対応する特別なサーボ増幅器が必要です。

材料

モーションコントロールの機械的コンポーネントに使用される材料には、それぞれ長所や短所があります。以下で、モーションメカニクスで使用される最も一般的な材料の特性について説明します。

剛性

一定のたわみを生じさせるために必要な力の大きさを表す尺度。力とたわみは比例関係にあり、次の式によって関係づけられます。

$$\Delta x = (1/E) * xF/A$$

上記で、Fは力、 Δx はたわみ、 x は公称の長さ、Aは力に垂直な面の面積です。Eは材料に固有の定数で、弾性率、ヤング率、あるいは剛性と呼ばれます。材料の剛性が大きいほどEの値も大きくなります。

熱膨張

温度の変化は、ステージのサイズや形状を変化させます。変化の度合いは、コンポーネントのサイズ、温度変化の度合い、および材料の種類によって異なります。温度の変化による寸法の変化は、次の式で表されます。

$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

上記で、 α は熱膨張率係数で、材料によって異なります。

熱伝導率

材料のなかには、アルミニウムのように温度変化が均一でないコンポーネントに適したものがあります。不均一な温度を生じるのは、たとえばレーザーダイオードのような熱源をマウントした場合です。ダイオードは周辺温度よりも温度が高くなるため、マウントを通して熱を放散し、ステージに温度勾配を生じさせます。熱を放散しにくい材料では、温度勾配によって大きなひずみが発生します。

不均一な温度変化によって生じるひずみは、熱膨張係数に比例し、熱伝導率 c に反比例します。

$$\text{相対熱ひずみ} = \alpha/c$$

コンポーネントの周辺動作温度が室温と大きく異なる場合は、複数の材料を使用しているコンポーネントに十分注意する必要があります。たとえば、ステージ部分にアルミニウムを使用し、ベアリングにステンレス鋼を使用している直進ステージでは、アルミニウムとスチールの熱膨張率が異なるため、温度の変化によってベアリングの予荷重が失われたり、アルミニウムとスチールの界面に生じる応力によってステージが変形したりすることがあります。

材料の不安定性

材料の不安定性とは、時間の経過にともなう物理的寸法のことで、コールドフローあるいはクリープとも呼ばれます。アルミニウム、黄銅、ステンレス鋼では、クリープが観察されるまでに要する時間は数ヶ月あるいは数年といった長さになります。

アルミニウム

長所

アルミニウムは軽くてコールドフロー（クリープ）を生じにくく、剛性/比重にも優れています。熱膨張係数が比較的大きい反面、熱伝導性に優れているので、熱勾配を伴うアプリケーションや温度変化に対する迅速な調整が必要とされるアプリケーションに適しています。アルミニウムは加工が容易でコスト効率に優れているため、ステージ構造物に幅広く使用されています。また、錆を生じないため、一般的なユーザ環境では表面を保護しなくても腐食が問題になることはありません。

短所

陽極酸化処理した表面は非常に多孔質なので、高真空条件下での使用には適しません。

表面仕上げ

アルミニウムは陽極酸化処理することで優れた耐食性と、良好な仕上げ面が得られます。最も多く使用される色は黒です。陽極酸化処理を施すと表面が硬くなり、ひっかき傷や磨耗に対する耐性が生まれます。アルミニウムは、塗装によっても優れた結果が得られます。

スチール

長所

スチールは弾性率が高く、剛性に優れ（アルミニウムの約3倍）、優れた安定性を備えています。さらに、熱膨張係数がアルミニウムの約1/2（図15）と小さいので、温度変化が均一な一般的なユーザ環境で安定性を確保するのに最適です。また、ステンレス鋼は真空のアプリケーションに適しています。

パラメータ	スチール	アルミニウム	黄銅	グラナイト
剛性、E, Mpsi (GPa)	28 (193)	10.5 (72)	14 (96)	7 (48)
密度、 ρ , lb/in ³ (gm/cc)	0.277 (7.6)	0.097 (2.6)	0.307 (8.5)	0.1 (2.7)
剛性/比重比、E/ ρ	101 (25.4)	108 (27.7)	45.6 (11.3)	70 (17.8)
熱膨張係数、 α ($\mu\text{in/in}^\circ\text{F}$)	5.6	12.4	11.4	4
熱伝導率、c (BTU/hr-ft- $^\circ\text{F}$)	15.6	104	67	2
相対熱ひずみ、 α/c	0.36	0.12	0.17	2

図15. 一般的なステージ材料の特性

短所

スチールはアルミニウムよりも加工に時間がかかるため、スチール製のコンポーネントはコストが高くなります。スチールでは腐食が大きな問題となりますが、ステンレス合金では腐食の問題は最小限に抑えられます。

表面仕上げ

スチール製のパーツには、普通メッキあるいは塗装が施されています。メッキにはクロム、ニッケル、ロジウム、カドミウムがよく用いられます。スクリューやマウントハードウェアには、防錆黒色酸化仕上げがよく用いられます。ステンレス合金は、他のスチールのように錆びることはありません。ステンレス合金は非常にクリーンな材料で、特別な表面の保護は必要ありません。ガラスビードを吹き付けた表面は半光沢となり、光を反射しません。

黄銅

長所

黄銅は重い金属で、スチールより密度が高く、加工が容易です。主として減摩材として使用され、スチールやステンレス鋼のスクリューやシャフトにおける自己溶接作用を避ける異種金属としてもよく用いられます。黄銅は、きわめて高い耐クリープ性が要求される精密アプリケーションに使われたり、ダイヤモンド切削によって非常に滑らかな面を作るのに使われます。

短所

黄銅の剛性/比重比はアルミニウムやスチールほど高くはありません。また、熱膨張率はアルミニウムと同程度ですが、熱伝導性は約1/2と低くなります。

表面仕上げ

光学分野で使用する場合、黄銅は通常、黒く着色されます。また、表面の耐久性を増すためにクロムやニッケルでメッキを施すこともあります。

グラナイト

長所

ユニークな物理的特徴を備えたグラナイトは、最先端の技術で加工することで空気ベアリングのサポート構造物に最適な材料となります。表面の平坦度は、トータルシステムの位置決め精度や再現性にとって重要な要素になります。

グラナイトでできたこれらの構造物の研磨された表面は、市販されている製品のなかでは最も平坦です。熟練者による手作業の研磨では1 m²あたり1.5 μm という平坦度が得られます。機械による自動研磨で得られる平坦度は、通常1 m²あたり15 μm です。

グラナイトの重要な特性の1つは、研磨によって高い平坦度を実現できるその群を抜いた硬さにあります。グラナイトが耐磨耗性や耐衝撃性においてスチールよりも優れていることは、各種の試験で確認されています。優れた強度を持つグラナイトは、なかでも大きな静的荷重を使用する大型システムに適しています。また、磁性を帯びていないため、電子銃を使用するアプリケーションにも最適で、化学薬品から影響を受ける用途にも使用できます。

グラナイトは寸法の安定性にも優れ、精密サポート構造物としての使用にも適しています。内部のストレスが皆無なため、温度の変化に対する応答は均一で予測可能です。さらに、比重が大きいので熱的に安定しており、実験や工程への短期的な周辺温度の変動による影響を防ぐことができます。

短所

大きな構造物やテーブルにグラナイトを使用すると、重量がかさみます。高い平坦度が要求されないアプリケーションでは、スチール製のハニカム構造の方が優れた剛性/比重比が得られ、固有周波数に関して減衰が可能でシステムの性能を最適化できます。

真空仕様

10⁻⁶ Torrまたはそれ以下の高真空下で使用するステージは、真空環境用に特別に設計、製造する必要があります。標準的な直進ステージに使用される材料の多くは、高真空下でガスを放出します。そうなると真空空間は「真空漏れ」と同じような状態になり、十分な真空度を維持することができなくなります。

Newportでは、真空仕様の製品が10⁻⁶ Torrの圧力レベルで正しく機能し、真空環境に許容量以上のガスを放出しないようにするため、しかるべき手順を経てこれらの製品の設計、製造を行っています。製品を正しく設計、製造するためには、動作圧のほかにもさまざまなデータが必要になります。放出ガス、質量損失、凝結する可能性のある揮発性物質の許容量は、アプリケーション、ポンプ容量、温度条件などによって異なります。

材料に関しては、使用可能な金属、セラミックス、塗装、潤滑剤、接着剤、ゴム、プラスチック、電機部品、その他の選択という問題があります。たとえば、陽極酸化処理したアルミニウムの表面は多孔質で多量の空気分子を取り込んでおり、大量のガスを放出します。そのため、真空度の高いアプリケーションでは陽極酸化処理していないアルミニウムを使用します。モーターも、真空環境での使用に備えて特別に設計、製造する必要があります。

材料の加工に際しては、真空下で放出されるおそれのあるガスやその他の物質を取り込みやすい表面加工は避ける必要があります。また、アセンブリのくぼみにガスが取り込まれないように注意することも必要です。

材料の選択や加工に加え、クリーニング、取り扱い、組み立て、梱包の方法にもしるべき注意が必要です。これらの作業は、空気中の浮遊物質などがコンポーネントと接触しないように、クリーンルームで行います。Newportでは、熱気乾燥は行っていません。

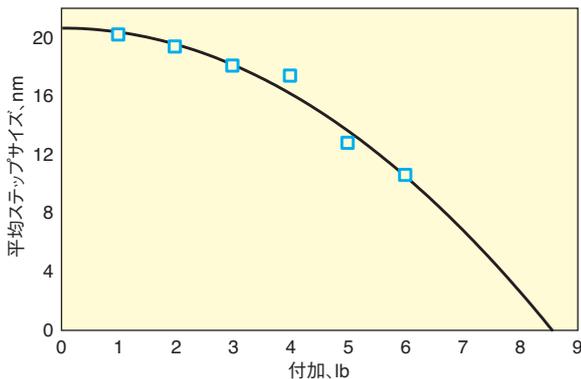
真空環境で使用する製品の性能仕様は、非真空環境用の性能仕様とは異なります。たとえば、真空環境では熱は非真空環境ほど容易には発散できず、モーターのデューティサイクルを小さくする必要があります。そのため、最大速度が制限されることがあります。真空仕様の製品を使用する必要がある場合の個々のアプリケーションの条件については、ご相談ください。

クリーンルーム仕様

Newportには、クリーンルーム仕様の製品を設計、製造するための設備があります。クリーンルーム仕様の技術や方法、手順、材料の条件の多くは真空仕様のそれとよく似ていますが、これらの条件は個々のアプリケーションによって異なります。個々のアプリケーションの条件については、ご相談ください。

Picomotorの特性と定義

Definitions of Picomotor Characteristics



負荷に対するPicomotorアクチュエータの平均ステップサイズ。
Picomotorアクチュエータで1-6 lbs (0.454-2.722 kg) の負荷を持ち上げ、干渉計で測定した。

角度分解能

Picomotor™アクチュエータの最小回転量です。シングルパルス電圧の印加で起こる回転の代表値です。Picomotorは摩擦を利用してスクリーンを回転させるため（Stick-Slip アクチュエータ）、1パルス当りの実際の角度変化量は、回転方向、荷重、温度、摩耗の影響で変わります。一定の荷重及び温度下で一方向に移動するときの1パルス当りの角度変化量には、New Focus™の測定で数%以下の変動が確認されています。

角度移動量

モーター駆動ステージのベースに取付けたマウントプレートの角度の最大変化量です。

自由度

マウントやステージ（電動/手動不問）で、スクリーンの回転による調整が可能な直線移動軸と回転軸の総数です。

フリップ間再現性

Flipper™マウントで、連続してフリップ動作したときの角度位置の差です。

保持力

モーターがステージの位置を保持するのに必要な力量です。

ライフタイム

モーターを規定のパルス繰返しレートで連続運転できる総時間です。

Picomotorは、ライフタイムとパルス繰返しレートが比例関係にありますので、より低いレートでモーターを動作させれば、比例してライフタイムをより長くできます。

リニア移動量

Picomotorアクチュエータの最大移動量です。これはPicomotorのスクリーンの長さだけで決定されます。