

モーションの基礎と基準

Motion Basics and Standards

仕様の重要性

ステージの機能は、モーションの方向を目標とする方向に制限することにあります。直進ステージでは、理想的な直線に沿ったモーションが望ましいモーションということになります。制限された方向へのどんなモーションも、理想的な軌道あるいは位置からの偏差の一因となります。ほかに、荷重によって加わる力や、完璧な工作技術や理想的な材料が存在しない現実の世界で完璧なステージを設計し、製造する作業の大変さもずれの一因となります。もう少し穏やかに言えば、高性能システムは複雑であり、その設計においてであれ、実際に使用する段階においてであれ、一見些細に見える問題を見逃してしまうと思われ結果を招くおそれがあるということです。したがって、製品の用途とさまざまな性能とをよく検証する必要があります。

残念ながら、モーションシステムのメーカーやユーザーが使用する用語のなかには、人によって異なる意味に受け取られる用語がたくさんあります。Newportではこのような混乱や誤解を減らすために、ASME B5.57およびISO-230に準拠した用語や定義を使用するように努めています。これらの規格で使用されている用語がある分野にそぐわない場合、あるいはある分野を対象としたものでない場合は、モーション関連業界で一般に使用している用語を使用しました。個々のアプリケーションを理解し、個々のアプリケーションについてNewportのアプリケーションエンジニアを交えて検討することは、目標を遂行するためのシステムの選択に役立ちます。Newportの検査手順の開発に際しては、ここで言及した規格がガイドとしての役割を果たしています。

注意：このカタログに記載した性能データは、別途記述した場合を除いては、1つの軸あたりのデータであり、積み重ねた複数のステージの性能を表すことを意図したものではありません。ステージを積み重ねた多軸アプリケーションの性能については、かならずNewportのアプリケーションエンジニアを交えて検証してください。

モーションコントロールの座標系

位置決めステージはいずれも、X、Y、Zの3方向のリニアな自由度と、同じくこれらの軸を中心とした3方向の回転の自由度を合わせた6つの自由度を持っていると考えられます（図1参照）。

ここで説明するすべてのモーションは、右手系の座標系をもとにしたモーションです。正のX軸と正のY軸（第二指と第三指）のクロス積が正のZ軸（親指）となります。右手の親指が軸の正方向を指しているとする、残りの4本の指はその軸を中心とする正の回転方向に軸を包み込むかたちになります。あらゆる動きは、座標軸に沿った直線運動あるいは座標軸を中心とする回転運動から構成されると考えられます。一般には、X軸とY軸を水平軸（X軸とアラインされている最初またはいちばん下のステージの移動方向）、Z軸を垂直軸とみなします。

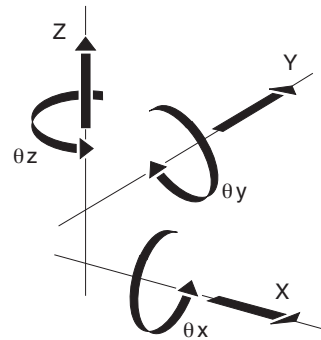


図1：6軸の自由度を持つ右手系の座標系

分解能

モーションシステムに移動あるいは検出するよう命令できる最小量の中で、表示分解能またはエンコーダ分解能とも呼ばれます。最小移動量とは異なります。システムが分解能と等しい量の移動が可能である場合とそうでない場合があります。移動に影響を及ぼす要素には、摩擦、荷重、外的な力、システムの動的特性、コントローラ、振動、慣性などがあります。（最小移動量についての説明もお読みください）

最小移動量

デバイスで一貫して確実に動かせる最小移動量（MIM）。分解能と混同しないように注意してください。分解能は通常はコントローラの最小表示値やエンコーダのインクリメントに基づいた値で、実際のモーションのアウトプットよりもはるかに小さいこともあります。これは重要な違いですが、残念ながらめったに開示されません。Newportはほとんどの製品に最小移動量を規定しています。これは「実質分解能」と呼ばれる場合もあります。ステージの機能に応じて、2つの異なる試験方法が用いられます。

駆動部の摩擦が最小移動量の制限要因となるステージの場合は、前進方向へ多数回の小さなインクリメンタル動作コマンドを実行し、それに続いて後退方向へコマンドを実行します。この過程におけるステップごとの実際の変位量を外部計測器、たとえばレーザー干渉計や自動コリメータで測定します。この測定では外部計測器を使用することが重要です。なぜならば、たとえエンコーダが正確な変位を表示したとしても実際のステージキャリアの動きがエンコーダの示す変位量と正確に一致するとは限らないからです。原則として、Newportは最小移動量を指定しますが、この値は実際に起こった変位の標準偏差の3倍がコマンドで指定されたステップサイズよりも小である最小のステップサイズと定義されます。この定義は、実際に起こる個々のステップのサイズが規定許容範囲内に収まることを保証します。MFA-CCリニアステージを対象として実施した測定の結果を図2に示します。このグラフは実際に起こった変位量の分布を示すものです。このテスト方法を使用すれば、ステージのバックラッシュ（動作方向を切り換えたときに出力とは関係なく起こる変位）やヒステリシス（動作方向を切り換えたときに起こる非リニア出力動作。駆動部の弾性力に起因する）も同時に詳しく解析することができます。

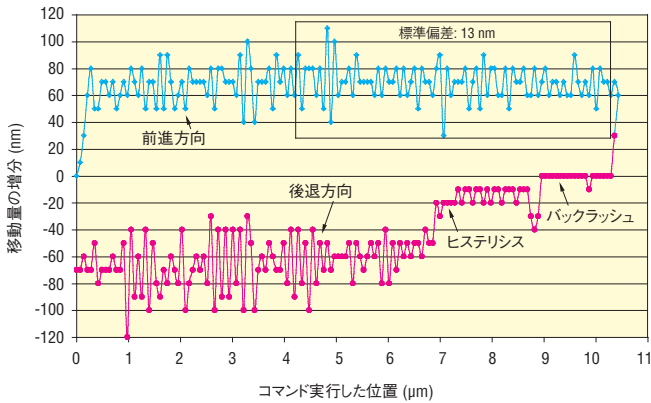


図2：MFA-CC直進ステージの最小移動量

MIMがノイズのみによって制限されるステージの場合は、別のテスト方法が使用されます。より少数のインクリメンタル動作をまず前進方向へ、続いて後退方向へコマンド実行させ、そのときの実際の位置を高い頻度で記録します。ここでも、実際の位置は外部ツールを用いて測定しますのでエンコーダーの示す位置とは大きく異なることがあります。時間的に大きな頻度で測定することによりステージの時間応答の精密な解析が可能となり、位置ノイズも正確に決定することができます。原則として、位置ノイズのピークtoピーク値を2倍した値がMIMの値として指定されます。このような測定をIMS-LM直進ステージを対象として実施した例を図3に示します。

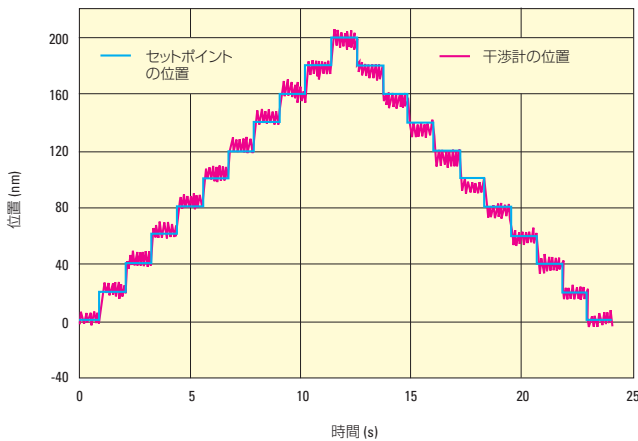


図3：IMS-LM直進ステージの最小移動量

再現性

再現性には、一方向再現性と双方向再現性の2つの種類があります。再現性と精度は別のもので、再現性は非常に高いが精度には欠けるというシステムもあり得ます。図4は、精度と再現性の違いを示したものです。



図4：精度と再現性

一方向再現性

システムが同一方向から目標位置に向けて移動する場合の再現能力。再現性を正確に測定するためには、リバース値に相当する距離よりも離れた位置から個々の目標位置に向けて移動させる必要があります。図5は、一方向再現性の性能データを示したグラフです。個々の目標位置に向けて同一方向からそれぞれ5回ずつ移動しています。黒い点は各目標位置におけるデータの分散状況を表しています（注：点の数が5つ未満に見えるのは点が重なり合っているためです）。

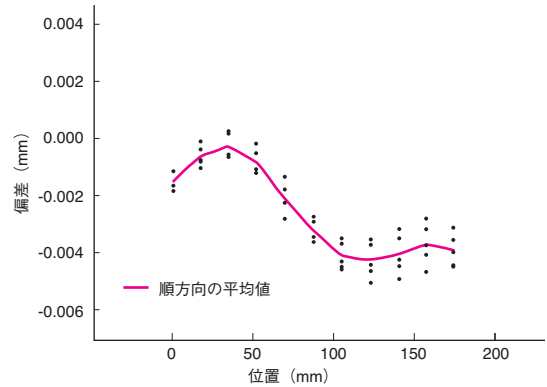


図5：個々の測定位置における偏差を示す直進ステージの一方向再現性試験のデータ。

双方向再現性

システムが双方向から目標位置に向けて移動する場合の再現能力。再現性を正確に測定するためには、リバース値に相当する距離よりも離れた位置から個々の目標位置に向けて移動させる必要があります。図6は、双方向再現性の性能データを示したグラフです。順方向のデータと逆方向のデータが上下に分かれているのはリバース値によるものです。順方向と逆方向の個々の目標位置に向けて順方向と逆方向でそれぞれ5回ずつ、計10回移動しています。一方向と同様に黒い点は各目標位置におけるデータの分散状況を表しています。どの目標位置についても、リバース値に相当する距離よりも離れた位置から目標位置に向けて移動しています（注：点の数が5つ未満に見えるのは点が重なり合っているためです）。

図5と図6に示したデータは、ステージの精度と再現性を評価するために使用できます。

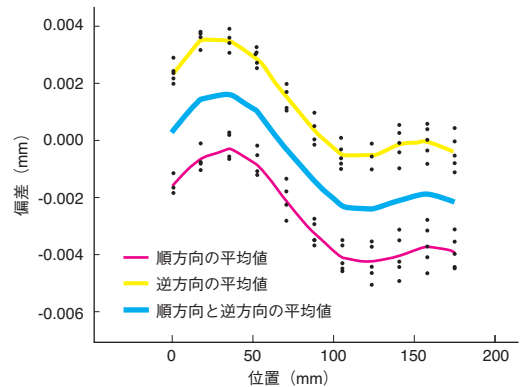


図6：個々の測定位置における偏差を示す直進ステージの一方向再現性試験のデータ。

リバース値

互いに逆向きの関係にある行きと帰りのモーションで、ある一点に関して読み取った位置の値の差。この値は、バックラッシュとヒステリシスが組み合わさった値です。互いに作用し合う複数のコンポーネントで構成されたモーションシステムでは、バックラッシュとヒステリシスを切り離すことはきわめて困難です。リバース値は双方向再現性と精度に影響を及ぼします。図2にバックラッシュとヒステリシスが示してあります。

バックラッシュ

リバース値の1つの成分です。駆動システム中の出力モーションを発生させない互いに作用し合う機械的パーツ間の相対的な動きによって生じます。原因としては、パーツ（ギヤの歯など）間の隙間や機械的な変形などがあります。バックラッシュは双方向の再現性と精度に影響を及ぼします。ただし、バックラッシュは一般的に再現性が高いため、コントローラで補正できる場合もあります。Newportのコントローラは、相対的にバックラッシュの補正機能を備えています。バックラッシュは逆方向時のコマンドモーションと出力モーションの間が断続的なため、精密アライメントや追跡アプリケーションにも影響を及ぼします。好ましくない結果が生じる可能性があるため、これらのアプリケーションではバックラッシュを完全に補正することは推奨しません。

ヒステリシス

リバース値の1つの成分で、システムの最近の履歴に依存します。システムに作用する力が反転したときに観察され、さまざまなコンポーネントの弾性力によって発生します。双方向再現性と精度に影響を及ぼします。逆方向に移動しているときはアウトプットモーションがインプットモーションに対して直進しないため、ヒステリシスは精密アライメントや追跡アプリケーションにも影響を及ぼします。バックラッシュとは異なり、値は低いかもしれませんが、ヒステリシスはあらゆるメカニカルシステムに存在します。

精度

精度は、リニアまたは回転モーションの移動量と標準との一致の度合いを表します。モーションシステムの精度は、試験のセットアップ、環境条件、移動量の測定方法によって大きく左右されます。ミクロンあるいはサブミクロンの世界では、とくに温度が不安定であったり正しく制御されていないと、熱膨張が精度に大きな影響をおよぼします。ほかにも、精度を低下させる一般的な要因としてコサインエラー（余弦エラー）やアップエラーが挙げられます。また、6軸のいずれかの軸で望ましくないモーションが生じるとさらに不確か性が大きくなります。多軸システムでは、ステージの組み合わせによる影響を考慮する必要があります。

精度は、最小移動量と混同されることがあります。たとえば、スクリューで駆動するステージを例にとりて考えてみましょう。ピッチが1 mmのスクリューを1回転あたりステップ数が200のステッピングモータで直接駆動する場合、ステージの精度は必ずしも0.005 mm（モータのステップ1つに相当する値）になるとは限りません。精度の分析に際しては、スクリューのピッチやモータのステップ角の変動を計算に入れる必要があります。同様に、ガラススケールエンコーダを使用しているステージでもスケールの精度、ステージの

軸に対するスケールの軸のアラインメント（コサインエラー）、読み取りヘッドとスケールのアラインメント、エンコーダ信号の補間といった要素を計算に入れる必要があります。

Newportでは、製品の精度およびその他の性能は適正に制御された環境（気温摂氏20度で、大気圧と湿度を補正）で測定されています。試験は、セットアップや手順、機器、データの分析について定めた文書化されたマニュアルに従って実施されます。手順の策定に際しては、広く認められた国の規格や国際規格（ISO-230、ASME B5.57など）を参考にしています。関係のあるすべての機器は入念にメンテナンスを実施し、認められた手順に従って校正を行い、国の規格に基づいてトレースできます。

絶対精度

システムの実際の出力値と命令値（理想値）との差のことで、より直感的には誤差と呼ばれます。たとえば、モーションシステムに10 mm移動するよう命令したときの実際に移動量が、完璧な物差しと適正な規格に準拠した手順で測定して9.99 mmであったとすると、命令値からの偏差は0.01 mmということになります。精度は、単位移動量あたりの値として表すことも、ステージの総移動量に対する値として表すこともできます。たとえば、総移動量が200 mmのステージであれば、移動量100 mmあたり誤差5マイクロメートルという言い方もできますし、総移動量（200 mm）あたりの誤差8マイクロメートルという言い方もできます。Newportでは、精度をどのように解釈すべきかを個々の製品の仕様に明記しています。

線形誤差補正後の軸精度

指定した移動軸の線形誤差補正を行った後の絶対精度からの偏差を加味した精度です。単調に増大する線形誤差には、コサインエラー、リードスクリューのピッチの不正確さ、測定ポイントにおける偏角（アップエラー）、熱膨張による影響などがあります。これらの誤差は、位置と偏差の関係を表すグラフ（図7）の最良適合直線の勾配を利用して近似化することができます。この直線の勾配（誤差/移動量）がわかれば、次の式で絶対誤差の近似値が求められます。

$$\text{絶対誤差} = \text{軸精度} + (\text{勾配} \times \text{移動量})$$

Newportのモーションコントローラおよびステージでは、補正係数をコントローラに入力することで線形誤差を補正できます。手順はコントローラのユーザマニュアルに記載されています。

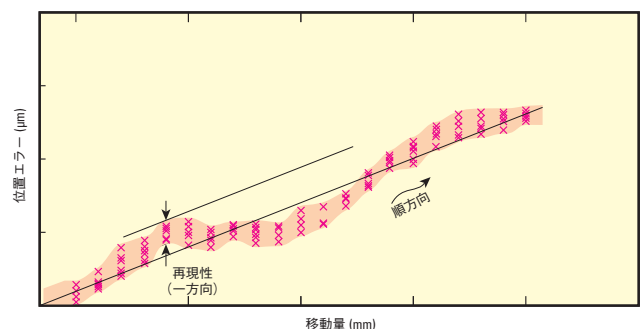


図7：線形偏差補正のための適合直線の勾配

ステージの振れ

回転モーションではなく直線モーションの軸の振れ。望ましい理想的な直線モーションからの逸脱のことで、直交する2つの成分で構成されます。望ましい理想的な直線モーションからの逸脱のことで、直交する2つの成分で構成されます。ISO-230やASME B5.57規格では、このような振れは「直進性」あるいは「直進性の欠如」と定義されていますが、モーション関連業界では平坦度および真直度という言葉で呼ばれ、下記のように定義されています。

平坦度

図8では、理想的な直線モーションはX軸に平行なモーションとして表されます。平坦度の偏差とは、Z軸方向へのぶれのことです。

真直度

図8では、理想的な直線モーションはX軸に平行なモーションとして表されます。真直度の偏差とは、Y軸方向へのぶれのことです。

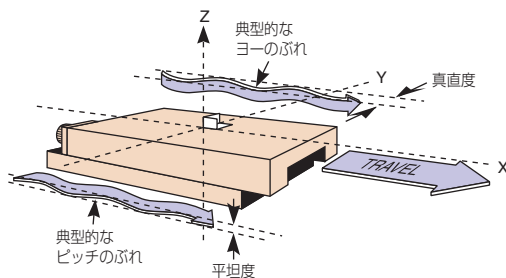


図8：直進ステージの軸ずれ偏差

直進ステージの傾斜

理想的な直進モーションに対する実際に測定したモーションの傾き（角度）。傾斜には直交する3つの成分があり、それぞれピッチ、ロール、ヨーと呼ばれます（図9）。この3つの成分は複雑に組み合わさっていることもあります。

多軸システムや、基準点がステージベアリングから離れた場所にあるアプリケーションでは特に、振れ誤差を高い精度で評価するには複雑な検討が必要な場合があります。このような場合、ステージの角度偏差が原因で発生し、距離により増幅された直進軸ずれ誤差が振れの主な成分です（アップエラーも参照）。このため、Newportのほとんどのステージでは角度偏差が注意深く特徴付けている一方、平坦度と真直度の仕様を規定しているのは一部の製品に限られます。

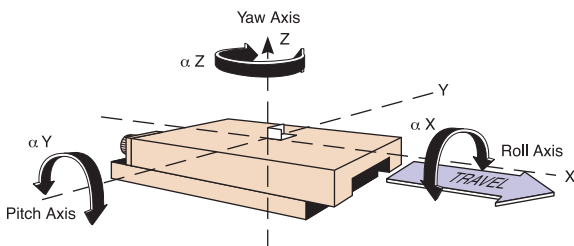


図9：ロール、ピッチ、ヨーは、移動の方向をもとに定義されます。

クロスカップリング

多軸システムにおいて、ある軸に対する入力によって別の軸で生じる変化のことで、

アップエラー

アップオフセットモーメントアームによる傾斜の増幅によって生じる軸のずれによる線形エラーです（図10）。この種のエラーは、モーションの軸から測定対象のポイントまでの距離が比較的大きい場合に問題となります。このエラーは、1マイクロラジアンでオフセット20 mmにつき約0.02マイクロメートルとなります。

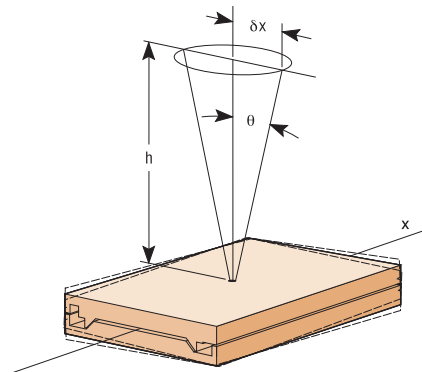


図10：オフセットポイントにおける測定によるアップエラー。ステージの傾斜に注目してください。

コサインエラー

測定軸とモーション軸がずれている（平行でない）と、コサインエラーが発生します。このエラーは、測定軸とモーション軸との角度の関数になります（図11）。測定軸をモーション軸と平行にすることでエラーを排除できます。

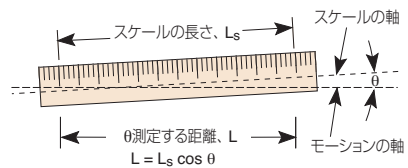


図11：スケールとモーション軸のずれによるコサインエラー

回転ステージの偏心

偏心とは、ステージが1回転する間の回転中心の平均位置からの径方向（回転軸に垂直な方向）へのずれ（図12参照）のことで、径方向振れ量とも呼ばれます。完璧なベアリングを持ち、完璧にセンタリングされたステージでは偏心は発生しません。

回転ステージの揺動

揺動は、1回転する際の理想の回転軸に対する実際の回転軸の傾き（図12）のことです。最もわかりやすい例は、ステージの回転面やテーブル上面が周期的に傾斜する現象で、アッペエラーの原因になることがあります。偏心と同様、揺動もベアリングが完璧でないことによって発生します。

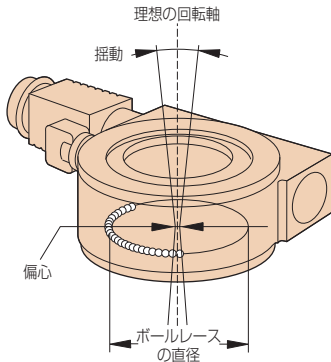


図12：回転ステージの回転軸のずれ

位置の安定性

位置を指定された範囲内に一定時間維持する能力。安定位置からの逸脱はドリフトとも呼ばれます。ドリフトの原因には、パーツの磨耗、振動、潤滑油の移動、熱の変化などがあります。

耐荷重

ステージの仕様を満たしながらステージに対して一定の方向に付加することのできる最大の力。この最大の力には、静的な力（質量×重力）と動的な力（質量×加速度）が含まれます。動的な力には、ステージに作用する振動のような外的なあらゆる力を含める必要があります。ステージが物体に与えることのできる加速度の大きさは、耐荷重を超えずに与えられる範囲に限られます。回転ステージでは、トルク（角加速度と回転の慣性モーメントの積）が力と同義語になります。カンチレバー荷重が大きくなると、直進ステージにおける回転トルクも重要な要素となります。別途記載した場合を除き、このカタログでは耐荷重は中心への垂直荷重を指すものとします。（図13）

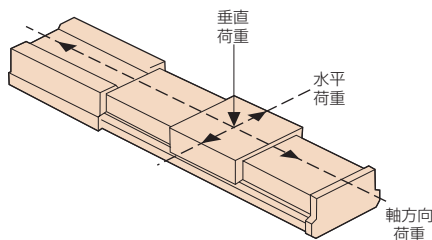


図13：耐荷重の仕様は中心への垂直荷重です。

中心垂直耐荷重

直進ステージでは、荷重の重心をキャリッジの中心におき、モーションの軸とキャリッジ面に垂直な方向に付加できる最大荷重です（図13）。回転ステージでは回転軸の方向に付加できる最大荷重です。また、回転ステージでは回転の慣性モーメントが限界値を超えてはなりません。

水平耐荷重

モーションの軸に垂直で、かつキャリッジ面に平行な方向に付加できる最大荷重のことで、横方向耐荷重とも呼ばれます（図13）。この値は垂直耐荷重よりも小さいのが普通です。

軸方向耐荷重

ドライブトレインの方向に付加できる最大荷重です（図13）。垂直にマウントした直進ステージでは、指定された垂直耐荷重は軸方向耐荷重によって制限されます。ただし、ステージを垂直にマウントする場合はカンチレバー荷重についても考慮する必要があります。

実荷重の軽減

計算式およびパラメータ値については、カタログに記載されている個々のステージの仕様の項を参照してください。大きな荷重を使用するアプリケーションに関しては、弊社のアプリケーションエンジニアにご相談ください。

慣性

物体が速度の変化に逆らおうとする性質。慣性が大きくなるほど、物体を加速あるいは減速させるのに大きな力が必要になります。慣性は、物体の質量と形状の関数になります。使用可能な力の大きさが制限されている場合は、使用可能な加速や減速の値を許容値に調整する必要があります。

速さ（速度）

単位時間あたりの移動距離。仕様に記載した最大速度は、ステージで垂直耐荷重に相当する荷重を使用した場合の値です。荷重を小さくすれば、より早い速度を使用することも可能です。指定した最小速度は、モーションシステムの色度安定性によって大きく左右されます。このカタログでは、速度（ベクトル）と速さ（スカラー）という言葉を同じ意味で使用しています。

速度安定性

モーションシステムが指定された範囲内で一定の速度を維持できる度合いを表します。通常は、目標速度に対するパーセント値で表します。このパラメータは、ステージの機械的な構造、フィードバック機構、モーションコントローラーの種類、制御アルゴリズム、速度の大きさ、アプリケーションによって異なります。

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。

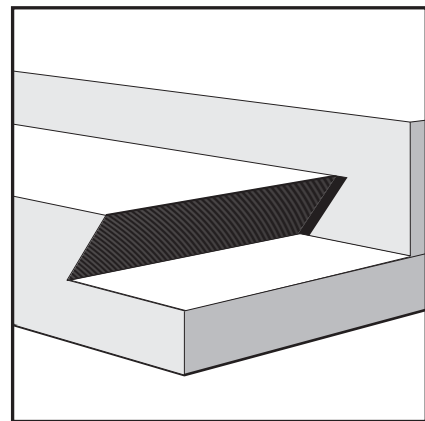


図1：アリ機構スライド

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。