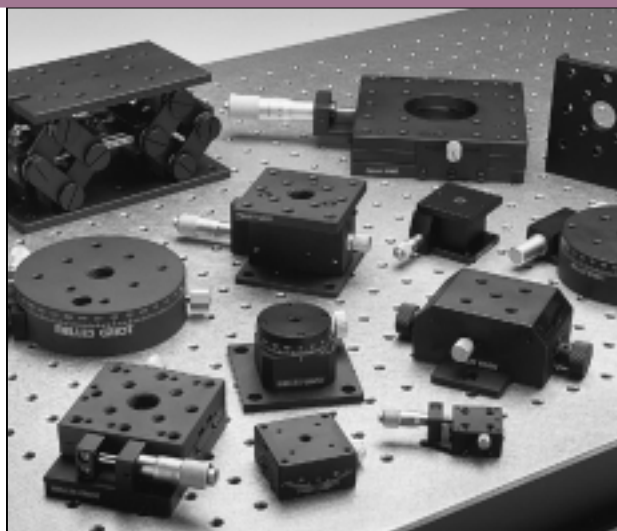


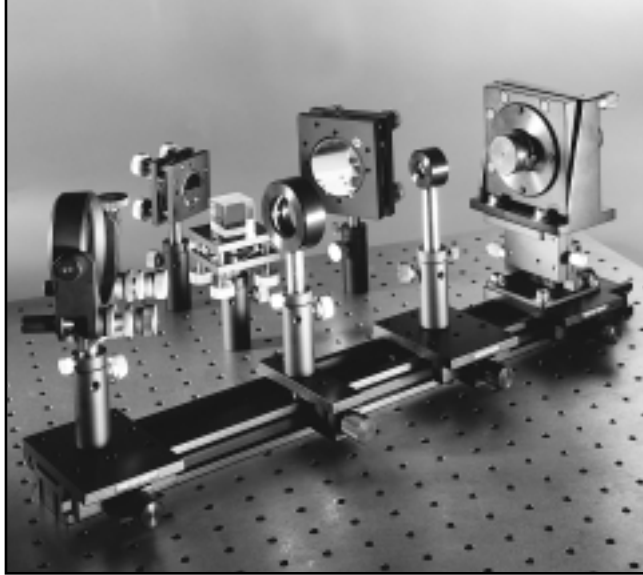
# 位置決め

Fundamentals of Positioning

# 1



オプトメカニカルハードウェアのタイプ	1-2
手動および自動の駆動	1-7
位置決め性能と精度	1-10
材質の選択とそれぞれの特性	1-11



# オプトメカニカル ハードウェアのタイプ

Opto-Mechanical Hardware Types

オプトメカニカルハードウェアは、固定タイプと可動タイプの2つに大別することができます。最も基本的な固定式のハードウェアは、光学部品もしくは他のハードウェアの保持を行ない、これにはレンズホルダ、ポスト、ピラー、光学レール、およびアダプタプレートなどが含まれます。一方、光学実験には欠くことのできない可動式のハードウェアには、トランスレーションステージ、回転ステージ、ミラーマウント、および可動式の光学素子マウントなどが含まれ、このタイプの製品には位置決めのための調整ネジ、アライメントを保持しバックラッシュを取除くためのスプリングが備わっています。しばしばこれらのマウントには、手動の調整ネジに換えて、自動で駆動するためのアクチュエータが取付けられることがあります。固定式および可動式の製品を適切に選択することにより、実験における測定精度が改善され、効率化を図ることが可能となります。

## ポスト、ピラー、およびステイブルロッド™

ポスト、ピラー、およびステイブルロッド™は、光学実験における最も基本的な製品です。ポスト(第9章「ポスト、ピラー、ベース、アダプタプレート」を参照)は通常、直径12 mmのステンレススチール製となっていますが、メスグリオでは小径から大径までの様々なサイズを取り揃えています。直径4 mmのポストは、小型で軽量の光学部品をコンパクトに配置したい場合に使用します。直径20 mmのピラーは、光学定盤上にミラーマウントをしっかりと取付けることができ、また光軸高さを揃えることが可能です。直径1.5インチのステイブルロッドは、最高の保持能力が備わっており、内部の除振構造により安定性が高められています。メスグリオのポストおよびピラーには雌ネジが設けられており、雌ネジが備わるハードウェアには付属のセットスクリューを使用して取り付けることができます。

## テーブルクランプ

テーブルクランプは、光学定盤およびブレッドボード上への光学部品のマウントに使用します。このクランプは黒色アルマイト処理されたアルミニウム製で、光学定盤のタップ穴に合わせM6のキャップボルトが付属しています。このキャップボルトによるクランプへのダメージを防ぐため、ナイロン製ワッシャーも付属しています。

## レンズホルダ

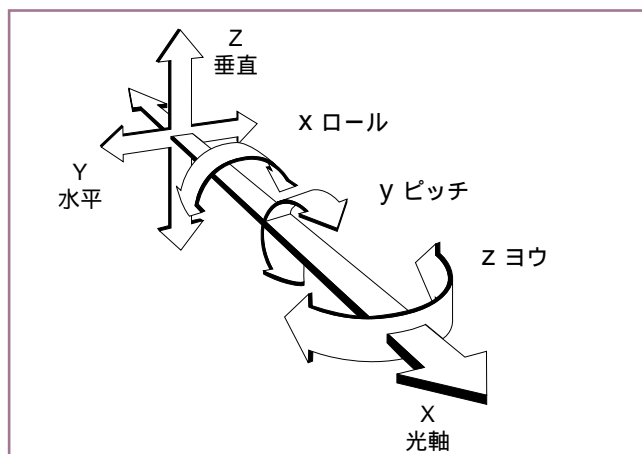
アルマイト処理されたアルミニウム製のレンズホルダには、光学素子を固定するための保持リングが備わっています。メスグリオでは、ほとんどのレンズに適応する様々なサイズの製品をはじめ、シリンダリカルレンズ用ホルダ、および自動センタリングレンズホルダなどもご用意しています(第7章「レンズ、フィルター、偏光素子用ホルダ」を参照)。レンズホルダ自体をポストにより保持する07 LHFシリーズ製品が最も一般的です。多くの実験者の場合、レンズはホルダに入れたままにしており、ホルダ上にレンズの情報を貼り付けているというのが実状です。すぐに使用することが可能な枠付きのレンズもご用意しています。

## アダプタプレート、およびネジ山変換アダプタ

これらは、ネジや外形寸法の異なるハードウェア同士を組み合わせる場合のアダプタとして、大変便利な製品です(第9章を参照)。アダプタプレートは、メスグリオ製と他のメーカーの光学部品との互換も可能とします。ネジ山変換アダプタは、ミリおよびインチネジの互換に使用します。アダプタプレートは黒色アルマイト処理されたアルミニウム製、ネジ山変換アダプタはステンレススチール製となっています。

## アジャスタブル光学素子マウント

位置調整機能付きの光学素子マウントは、第8章「ミラー、



6軸の自由度: X、Y、Z、x、y、z

「ビームスプリッター、プリズム用マウント」に記載されています。空間に位置する物体の動作と位置決めを表すには、3軸方向の直線移動と3軸の角度変化が必要です。下図のような6軸の自由度を表すには、一般的にデカルトの理論が用いられています。これらの軸の自由度が光学素子マウントによりコントロール(抑制)されている場合、このマウントはキネマチックと分類されます。

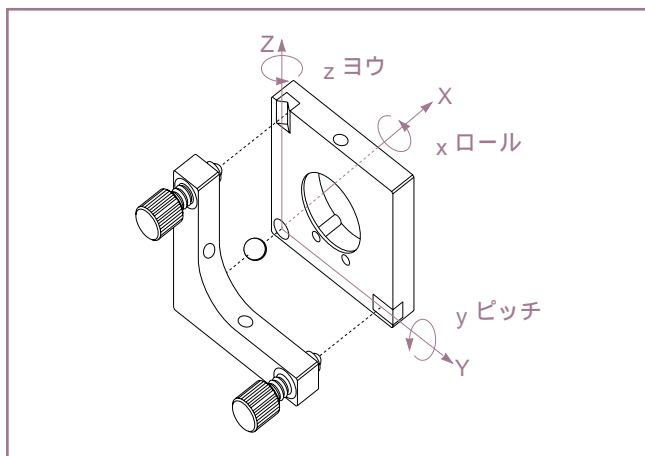
キネマチックマウントは、シンプルで経済的な位置決め用の製品です。このマウントの前側のプレートには、 unnecessary動作を拘束するための円錐形のザグリ、V-溝、および平面の受け(ボールや駆動用ネジのための)が設けられています(下図を参照)。円錐形のザグリはX、Y、およびZ軸方向の動作を、V-溝はy(ピッチ)およびz(ヨウ)軸の動作を、また平面はx(ロール)軸の動作を拘束します。1つの軸を除いて全ての軸が拘束されている時に、この機構をキネマチックと呼び、ミラーマウントやマウンティングプレートに採用されています。ミラーマウントの角度調整は、駆動用ネジがV-溝や平面を押すことによりなされ、プレートはスプリングによりネジ側に引き戻されています。

フレクチャーマウントはキネマチックマウントとは異なり、前側(ミラーを取り付ける側)のプレートの抑制に板バネ(フレクチャー)を使用しています。このバネは、ねじり方向の動きを拘束しながら上下動を抑制する自動車用の板バネに似ています。ねじり方向の動きの拘束は、位置決め精度および安定性を向上

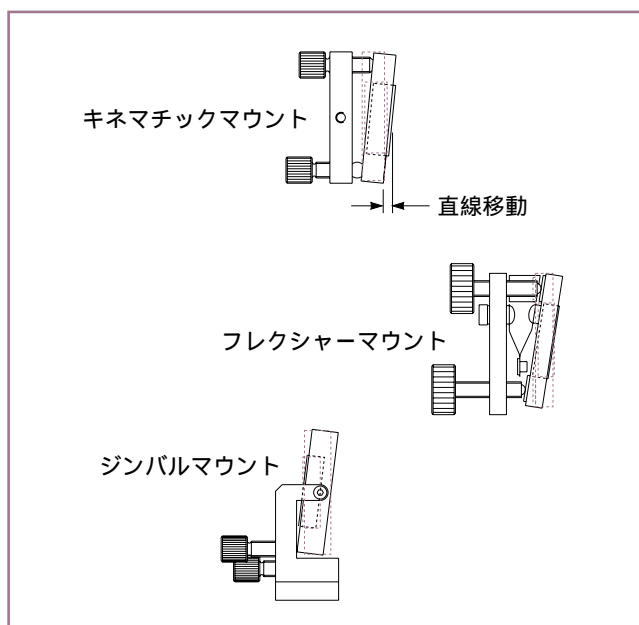
します。この点でフレクチャー機構は、従来のキネマチック機構より優れています。ミラーおよび前側のプレートの重量は、フレクチャーにより支えられます。この時フレクチャーは、駆動用ネジによりコントロールされる3軸方向の自由度を残し、クロスカップリングのような面的な移動を除去します。

フレクチャーシステムの最高の性能を引出すには、板バネのマウント方法とクランプ方法に注意を払う必要があります。フレクチャーは、ステージが所望の方向のみに駆動されるよう、その動きを規制します。また、フレクチャーは他の直交する2軸に関しては、たわむことはありません。フレクチャーを硬くまたは大きくすることにより、駆動軸に直交する方向のフレクチャーの剛性を高めることができます。フレクチャーの幅が十分に広ければ、ねじれに対する抗力が非常に大きくなります。また、適切なリターンコイルスプリング(コイルスプリング)を使用することにより、フレクチャーステージの駆動に対して予圧を与えることができます。

キネマチックおよびフレクチャーマウントは、経済的で精密な位置決め機構です。しかしながら、回転軸がマウントされた光学素子の表面上に位置していないため、1つの軸の駆動がミラ



円錐形のザグリ、V-溝、および平面が備わる07 MHTシリーズキネマチックマウント



キネマチック、フレクチャー、およびジンバルマウント

一の位置に影響を及ぼします。これに対してジンバルマウントは、直線移動することなく、角度を調整することが可能です。ジンバルマウントの回転軸は、直交し、360°の回転が可能で、軸自体は移動せず、光学素子の表面上に位置しています。ジンバルマウントは、ビームを正確にコントロールすることが必要なほとんどの用途に使用されています。

## トランスレーションステージ

水平、もしくは垂直面上における移動をトランスレーションと呼んでおり、ステージもしくはプラットフォームを直線移動させるために必要な、いくつかの機構があります。

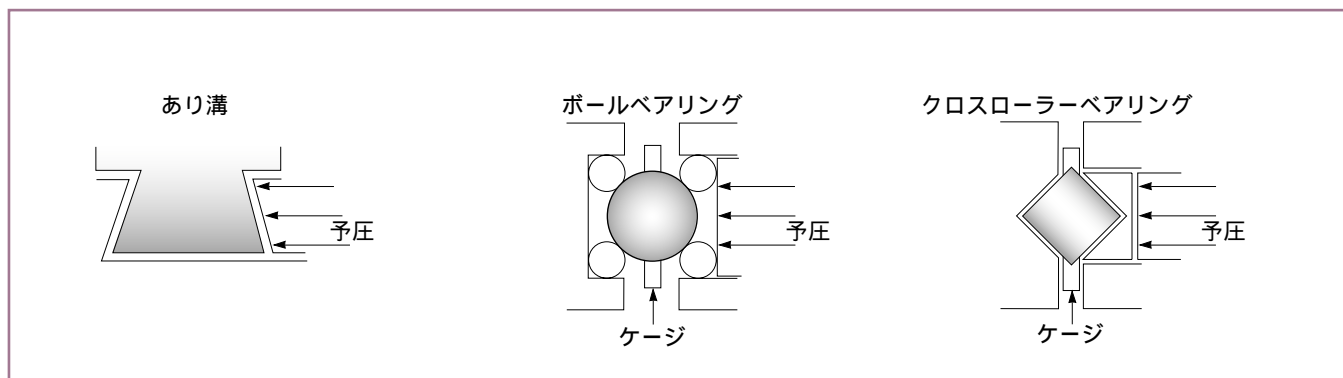
あり溝スライドは、長距離の移動を必要とする場合にシンプルで有効な機構であり、通常低コストのシステムに用いられます。適切な予圧とガイド面の硬度を得ることにより、幅広い用途に適しますが、摩擦とスティクション(静摩擦)が大きいため、高精度のシステムにはほとんどの場合使用されません。スティクションにより位置決め分解能が制限され、蓄積された残余ストレスが自然放出されるため、クリープやドリフトが生じます。また、摩擦により駆動機構に大きな力を必要とし、スティクションもこの影響を増大させます。最終的に、あり溝スライドの動作はスライド表面の潤滑の効果に依存しますが、微小な分解能は根本的に劣っています。

ボールベアリングステージは、摩擦の大きいあり溝スライドの運動を、摩擦の小さい転がり運動に置き換えたものです。ベアリングボールは、隣接するボール同士が接触することを防ぐケージと共に、V溝もしくはレール内に一列に並べられてい

ます。駆動時の揺れを最小にするため、ガイド全体にわたって予圧がかけられています。ボールとレールの接触面が非常に小さいため、微小な凹凸もステージの動作に影響します。ステージの揺れを防ぐため、予圧をかけることにより動作を滑らかにする必要があります。

金属同士の接触面の食い付きを防ぎ、摩擦とスティクションを減少させるために、ベアリングには潤滑が必要です。ボールはレールと点接触するため、その許容負荷重には制限があります。予圧は効果的ですが、その圧力をかなり高くする必要があります。これにはいくつかの問題点があります。摩擦とスティクションが増大し、また予圧が温度に依存するという点です。時間の経過と共に予圧が低下し、それに伴ってボールとレールの間の潤滑の効果も低下します。ステージに大きな負荷がかかる場合、ボールがレールを傷付ける可能性があり、恒久的なダメージを受けることがあります。メスグリオでは、高負荷重のアプリケーションにはボールベアリングスライドの使用をお勧めしていません。一方、ボールベアリングには点接触であるが故の利点も備わっています。これは、小さなほこりやゴミの粒子をボールが押し分けて進むことによる自浄作用を持つ点です。

クロスローラーベアリングステージは、ボールを鋼製のローラーに置き換えたものです。ローラーは、隣接するローラー同士が接触しないよう、ケージにより間隔が保持されています。複数のローラーの回転軸が互い違いに90°交差することにより、ステージをいかなる向きに設置した状態でも負荷重をかけることができます。ボールベアリングの場合の点接触は、ローラーベアリングの場合には線接触となります。クロスローラーベアリングの表面(点ではなく線)には、高い予圧をかけることが



ガイド機構の構造

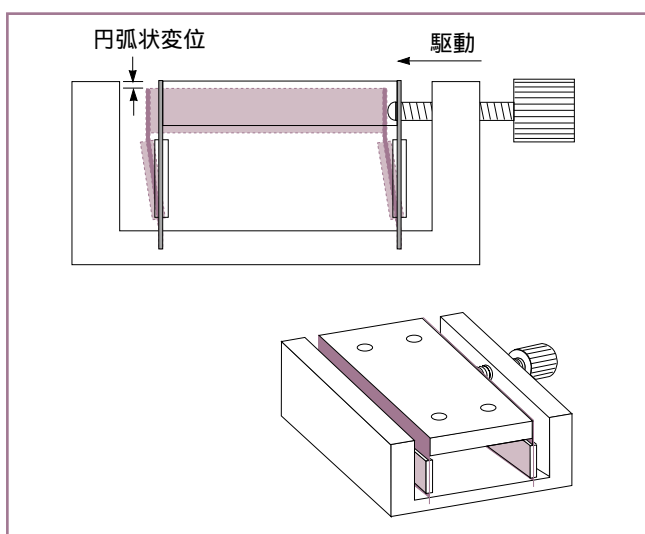
でき、従って許容負荷荷重が大きくなり、厳しい仕様にも合致することが可能となります。

しかしながら、ベアリングに高い予圧をかけられるということは、予圧をかけるためのセットスクリューが大きなストレスにさらされることを意味します。これにより、ガイドのたわみや、予圧の緩みといった長期的な問題の発生する可能性が大きくなります。更に、許容負荷荷重が大きいたということは、摩擦とスティクションが大きくなることとなります。

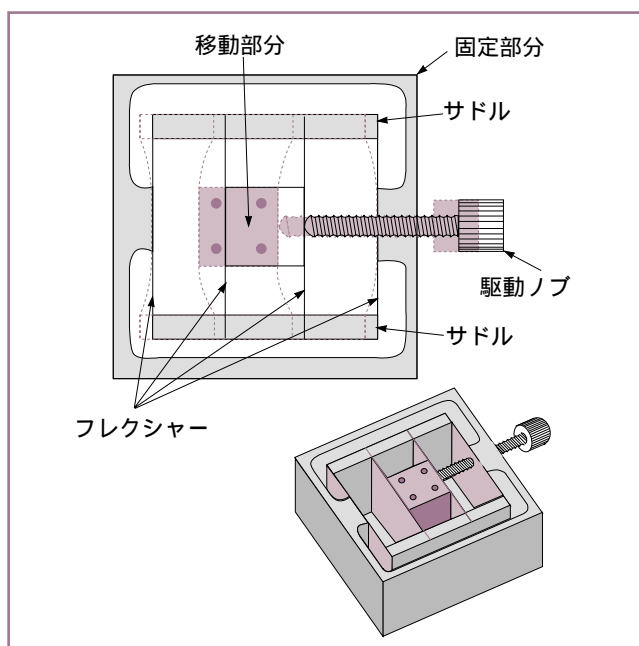
ステージを駆動する際、ローラーは予圧のかかっている部分を絶えず通過し、結果として予圧が連続的に変化してことになります。ローラーはこの部分を押し分けて移動しなければならず、ベアリングのノイズが発生し、もしくは移動の速度が変化し、スムーズな駆動ではなくなってしまいます。高精度の駆動を行なう場合、これが重要な問題となります。

ガイド機構の汚れは、クロスローラーベアリングにとって問題となります。ゴミがレールやローラーに付着すると、徐々に表面に堆積していきます。結果として摩擦とスティクションが増加し、分解能(設定感度)が制限され、駆動が不安定となります。

ミラーマウントと同様に、トランスレーションステージにもフレクチャーを使用することができます。この場合、フレクチャーは直線上を移動しながら、若干円弧状の軌跡を描きます。



シンプルなフレクチャーの配置における板パネのたわみと円弧状変位



複合フレクチャー配置により得られる直線駆動

従って、ここでは二次的なクロスカップリングが発生していることとなります。これを円弧状変位と呼び、ステージのプラットフォームがベースの方向に向かって縦方向に移動します(左図参照)。位置決めアプリケーションにおいて、稀にこの変位が問題となる場合があります。非常に正確な直線駆動が必要な場合には、複合フレクチャー機構を使用します(上図参照)。

フレクチャーステージには、高い剛性と耐ショック性が備わっています。固定されたフレクチャーが屈曲することのできるスペースは、幅0.5 mm、長さ30 mmほどしかないため、低周波数で共振する自由度を持っていません。

フレクチャーステージは、弾性体の変形を利用しています。摩擦とスティクションの双方は、非常に小さいため測定することができません。これらは原子の相互作用に起因しています。究極の性能が必要であり、アプリケーションにおいてフレクチャーステージに存在する制約が問題とならないようであれば、フレクチャーに並ぶものはありません。その制約とは、駆動範囲がステージの寸法の10%から15%ほどであるということです。100 mmのサイズのフレクチャーステージの駆動範囲は、およそ10 mm程度しかありません。

## Z軸トランスレーションステージ

垂直方向の直線駆動を行なうには、いくつかの方法が存在します。まず、直角ブラケットを使用して、通常のトランスレーションステージを垂直方向にマウントすることです。また、アジャスタブルポストホルダは、レンズなどの光学素子を垂直方向に移動するための便利な方法です。通常このホルダには、高さ調整用のリングと円筒状のネジが備わっており、ポストをホルダ本体に取付け、調整用のリングを回すことにより高さの調整を行ないます。その他の一般的なものとして、ステイブルロッド(第10章「光学レール、ステイブルロッド」に記載)に採用されているラックとピニオンギアを使用する方法が挙げられます。

最も一般的で精密なものとしては、マクロメータによりカムを押すことで、Z軸方向の駆動を行なう方法があります。このカムは、マイクロメータの水平方向の動きを、垂直方向に変換する働きをします。この時、ベアリングガイドにより垂直方向のみに動作することができるトッププレートが、カムにより持ち上げられます。位置決めが必要な光学部品は、このトッププレート上にマウントされます。

ラックギアとピニオンギアにより駆動が行なわれるメスグリオのステイブルロッドマウンティングシステムは、0.2 mmの設定分解能で、長距離の垂直方向の位置決めが可能です。リードスクリューを回すことにより0.1 mmの設定分解能で垂直方向にプラットフォームを駆動することが可能な、デュアルステイブルロッドシステムもご用意しています。

大きな負荷荷重が加わる用途向けには、ステイブルロッドよりも長い駆動範囲(最大70 mmまで)と、プラットフォームの平行度の誤差が駆動範囲全体において150 μm以下である、ラボ用ジャッキをご用意しています(第11章「トランスレーション、回転ステージ」を参照)。大変安定した一対のパンタグラフを持つ構造はスティクションが無く、ステンレススチール製リードスクリューの先端に取付けられた大型のノブにより、ジャッキの上下方向の駆動を行ないます。また、真鍮製のサイドアームが、前後左右方向の揺れを防ぎます。メスグリオのラボ用ジャッキの許容負荷荷重は、最大で30 kgとなっています。



カムにより駆動されるZ軸トランスレーションステージ



ラックとピニオンギアにより駆動されるステイブルロッド™



# 手動および自動の駆動

Manual and Powered Drivers

## 手動による位置決め

調整ネジは、光学素子を位置決めするための最も経済的な手段の1つです。メスグリオでは、必要とされる設定分解能に合わせ 0.5、0.3(80 TPI)、および0.25ピッチの精密調整ネジを使用しています。これらの調整ネジは通常ステンレススチール製であり、真鍮製の雌ネジにねじ込まれます。もっとも精密な用途向けには、ステンレス製の雄ネジと真鍮製の雌ネジのペアが、手作業によりラップ仕上げされています。

標準のマイクロメータは、繰返し同じ位置に位置決めを行なう場合に便利です。内部の精密ネジと外周のスケールにより、精密な移動が繰返し可能です。これによりコストは高くなりますが、機能的に拡充します。

差動マイクロメータは、非常に精密な位置決めが必要な用途にお勧めします。メスグリオの主な製品として、ウルトラマイク(UltraMike™)が挙げられ、50 nmの設定分解能が得られます。この製品は、価格が他の製品に比べて高くなりますが、非常に精密な位置決めが必要とされる用途には最適です。この用途としては、直径が数ミクロンのシングルモードファイバーのコアに、集光されたレーザービームをアライメントする、などが代表的です。

## ステッピングモータを使用した自動位置決め (マイクロポジショニング)

メスグリオのステッピングモータはマイクロステップと呼ばれる技術を採用することにより、無類の分解能、繰返し精度、駆動範囲、および精度を達成しています。他の方法により、上記の要素の1つに関して優れたものがあるかもしれませんが、メスグリオのステッピングモータは多くの高分解能を必要とするアプリケーションに対して、総合的な性能を提供します。

ステッピングモータは、直線もしくは回転の動作を得るための精密リードスクリューの駆動、もしくは回転ステージを直接駆動する用途に使用することができます。これは、ブラシレスDCモータの技術が発展したものです。

ステッピングモータは、円周上に等間隔で強磁性の歯を配置した円筒形のローターから成ります。ハイブリッドステッピングモータでは、この歯が永久磁石となります。ローターは、ステーター(固定子)もしくは磁極(ポール)と呼ばれる電磁石が並

べられた円筒状のケースの中に、ベアリングで支持されています。同じ極性を持つステーターのセットの数を相と呼び、ステッピングモータの場合には2相および4相のタイプが最も一般的です。

次ページの下側に示す図は、2相ハイブリッドステッピングモータの動作原理を示しています。各相は、90°間隔で配置された4つ(向かい合ったステーターの極性が同じとなる2組)のステーターから成ります。1つの相に電流が流れる時、図中で+および-と記載されたステーターは、それぞれ相対する磁力の極性を持つこととなります。この時、8つのステーターの個々の歯が、歯のピッチの1/4の角度を移動することに注目してください。A相に電流が流れ、B層への電流が0である場合、A相に磁気が発生し、ローターの歯(N極)がA相のステーターの歯(ポジション0: 図中の12時の位置)に並びます。1つのステップは、電流が他の相へ切換えられ、ローターの歯が最も近くのエネルギーが最小である位置に引き付けられることにより達成されます。B相への電流の方向により、時計回りにステップ(+1ステップ)するか、反時計回りにステップ(-1ステップ)するかが決まります。

1回転当りのステップ数は、ローターの周囲に配された歯の数の4倍となります。従って、100の歯を持つローターの場合、1回転のステップ数は400となります。モータのスピードは、電流スイッチングの速さを変化させることによりコントロールします。

ステッピングモータは、DCサーボモータやピエゾ素子よりも優れた特徴を呈します。ステッピングモータは、一連の電流ステップで駆動され、エンコーダを使用すること無しに1ステップ以内の分解能で最終的な位置を割出すことができます。マイクロステップ法を使用することにより、このステップを精確に等分割することができ、分解能を高めています。サーボのフィードバック信号は必要ではありませんが、必要であれば使用することも可能です。

ステッピングモータには理論上の駆動範囲のリミットはありませんが、精密に駆動する範囲を延長するためには、並外れた品質を持つ長距離用のマイクロメータの送りネジが必要となります。パルス対ステップの距離が完全に保持されれば、誤差が蓄積されることはありません。

ステッピングモータは、静止している間に少なくとも1つの相を励磁するため、ドリフトやクリープが発生しません。失速

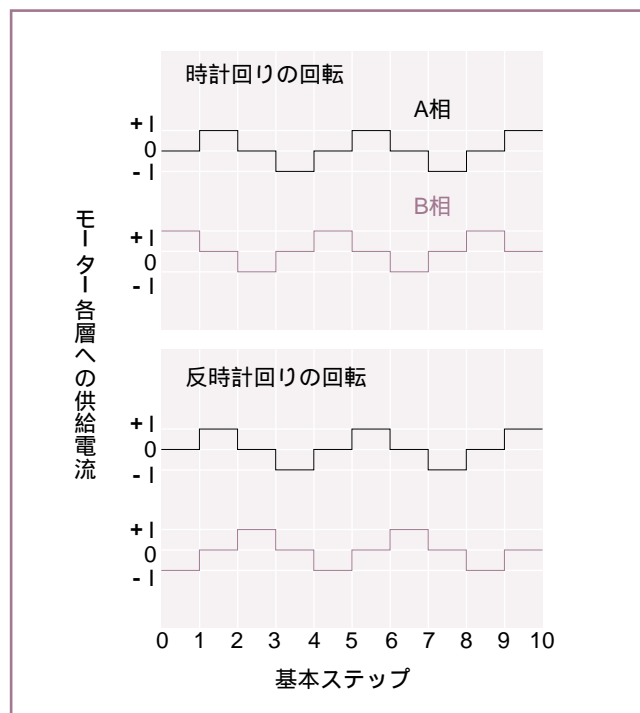
すること無しに比較的大きな負荷荷重を加速することが可能なように、パルスのスピードを落としている時ほど動的トルクが大きくなります。ステッピングシステムには複雑な駆動回路が必要となりますが、他の高分解能のデバイスに匹敵するか、それ以上のスピードでの駆動が可能です。

モータについて考えられる1つの欠点は、機械的な結合を介して直線的な動作を生み出しており、従ってバックラッシュが発生する点にあります。メスグリオでは、バックラッシュによる誤差を補償するため、ソフトウェアの機能によりこの問題を解決しています。

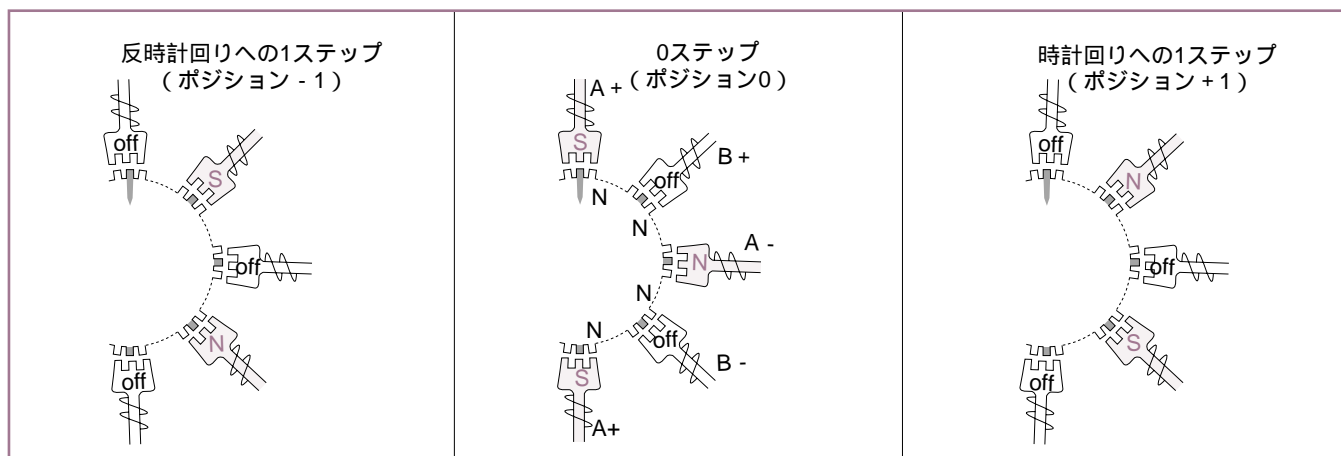
### piezoelectric actuator used for automatic positioning (nanopositioning)

ある種の結晶材料が圧縮される時、その圧力に比例した電圧が発生します。これは、圧電現象もしくはピエゾ電気と呼ばれます。逆に、この物質に電解が加えられた場合、その形状が変化します。自然界に存在するいくつかの物質も圧電現象を呈しますが、現在ではほとんどのデバイスに鉛ジルコン酸塩チタン酸塩 (PZT) のような多結晶セラミックが用いられています。

従来の材質とデザインにおいては、100 nmの直線変位を得るために1000 ~ 2000 Vの電圧を必要としていました。この変位量



両方向への回転に対する標準的な2相ステッピングモータの電流スイッチングパターン



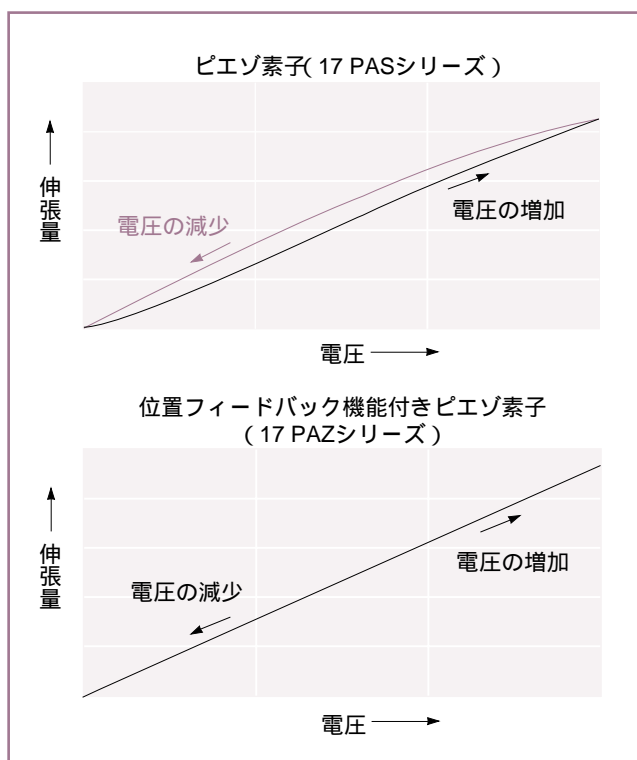
各相へのスイッチング電流によりローターが1ステップ分回転することを示す、2相ハイブリッドステッピングモータの動作原理 (1ステップ：ローターの歯の間隔の1/4に相当)

は、アクチュエータを構成する piezo の材料の層の数と、各層に印加される電圧に依存します。高い電圧が必要とされますが、消費電力は低く、一定の負荷が加わった状態で一定の位置を保持する場合には、ほとんどエネルギーを消費しません。piezo 素子は、印加される電圧の変化に対し、ミリ秒の時定数で応答することができ、位置の分解能は電源のノイズのみに制約されます。

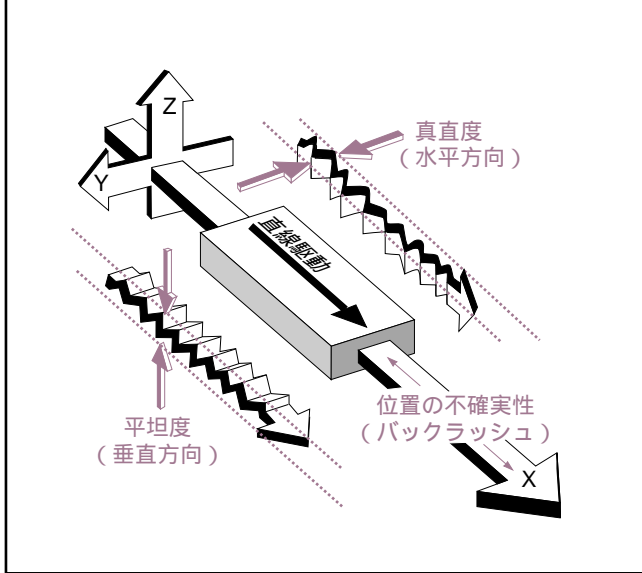
現在、いくつかのセラミック製 piezo スタックは、より低い電圧で使用することが可能です。あるものは最大 150 VDC を印加することができますが、より低い電圧 (0 ~ 75 VDC) で動作させることも可能です。このような低電圧の piezo スタックは、現代の電子回路での動作に十分対応します。メレグリオは、0 ~ 75 VDC の範囲で動作する長寿命で信頼性の高く、特に 10 V 以下の電圧において高い応答性を示す piezo アクチュエータを開発しました。

メレグリオでは、2つのタイプの低電圧 piezo スタックをご用意しています。どちらも摩擦やスティクション無しに動作し、ナノポジショニングの用途向けに十分に考慮された最適な製品です。これらの相対的な特性は、右図に要約されています。上側の図の曲線は、従来の piezo アクチュエータ (17 PAS シリーズ製品) の標準的な動作状態を示しています。始めに供給された電圧により伸張し、次に電圧の減少に従って収縮する際、ヒステリシスの影響を伴っています。下側の図の曲線は、ヒステリシス無しに直線的に動作していることを示しています。この曲線は、能動的な位置フィードバック機能が備わる piezo アクチュエータ (17 PAZ シリーズ製品) の動作状態を表しています。数ナノメートルの位置決め分解を持つこのコントロール技術により、1% より優れた応答の直線性を得ることができます。

これらのシンプルなアクチュエータの他に、メレグリオでは先進的な位置決め技術を取り入れたステージもご用意しています。ナノフレックスシリーズは、1軸および2軸のステージです。より多軸のステージとして、3軸および6軸の各々の軸に、モータおよび piezo の組み込みを自由に選択することが可能な製品もご用意しています。詳しくは、「レーザー&オプティクスガイド 精密位置決め装置」カタログをご参照ください。



piezo スタックの2つの動作モード



## 位置決め性能と精度

Positioning Performance and Accuracy

位置決め精度は、目標とする位置と実際の位置の絶対的な偏差です。駆動の直線性と精度が、この偏差の要因となります。トランスレーションステージを駆動する際に、その動作が一つの軸方向のみに制限されていることが理想です。いずれの偏差も、ステージにガイド機構を組み込む際の誤差によるものです。これらの誤差は、Y軸またはZ軸の直線方向のズレ、もしくはx(ロール)、y(ピッチ)、またはz(ヨー)の回転方向のズレによるものです。平坦度(Z方向の変位)および直進度(Y方向の変位)の誤差は、角度的な誤差により発生します。

常にある程度存在する**角度偏差**は、ステージにマウントされた光学部品に大きく影響します。ベアリングガイドを使用するステージの一般的なピッチ誤差は、駆動範囲の両端における負荷荷重により発生します。このピッチ誤差は、駆動に伴うZ軸方向の変位を示します。

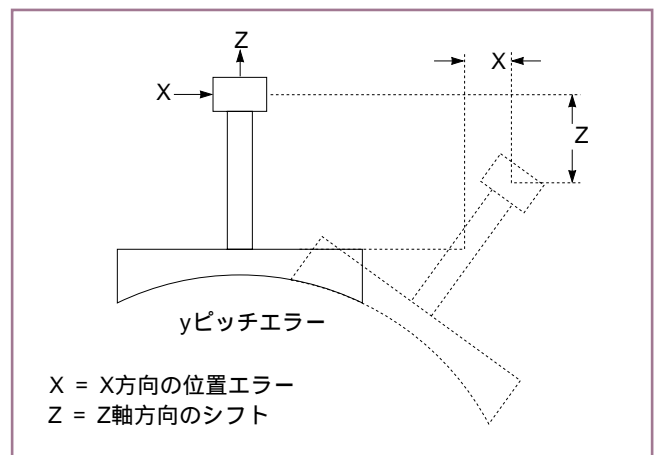
**繰返し精度**は、目標位置に繰返し接近する場合の誤差を意味します。一方向の繰返し精度は、単一方向から目標位置に接近し測定を行ない、バックラッシュやヒステリシスの影響が隠れてしまう場合があります。二方向の繰返し精度は、双方向から目標位置に接近し測定を行なうため、測定値にはバックラッシュとヒステリシスの影響が含まれ、より実状に沿った値となります。

**分解能**は、ステージを駆動する際の最小の移動量と定義されています。多くのアプリケーションにおいては、高い繰返し精度が伴わなければ、高い分解能も意味はありません。より細かいピッチのマイクロメータや調整ネジ、径の大きな調整ノブの使用、および摩擦とバックラッシュを減少させることにより、分解能を高めることができます。分解能は、単に駆動メカニズム部分のみではなく、ステージ全体で測定する必要があります。

**アップエラー**は、駆動される面からのオフセットと角度的な誤差が合成されて発生する、直線上の位置的誤差です。これは、直線上の位置決め精度に最も悪影響を及ぼします。アップエラーは、ステージに内蔵するベアリングと、マウントされる光学部品との距離によって増加します。ステージ上にポストでマウントされた光学部品、もしくはアングルブラケットを使用したX-Y-Z軸ステージなどが、この誤差の発生する一例です。ステージのy軸(ピッチ)における角度誤差は、ポストでマウントされた光学部品のZ軸方向のシフトと、X軸方向の直線的な誤差となります(右図参照)。アップエラーは、ガイド面の湾曲、不均一なガイドの予圧、不十分な予圧とバックラッシュ、ベア

リングとガイド面の汚れ、外部からの負荷荷重と光学部品のオーバーハングによるガイドのねじれなどが原因となり発生します。アップエラーは、実際に使用する軸を駆動面にできる限り近づけることにより小さくすることができます。

**コサインエラー**は、駆動されるトランスレーションステージと、そのアクチュエータ(もしくはその他の精密駆動装置)との、角度的なアライメントのズレにより生じます。エラーの大きさは、アクチュエータの駆動量と $1-\cos$ の積に等しく(ここでは、アクチュエータの角度ズレ)、ステージ全体の精度への影響は無視できる値です。例えば、 $1^\circ$ の角度ズレを持つアクチュエータが備わる駆動範囲25 mmのトランスレーションステージの場合、駆動範囲全体で発生する誤差は $3.8 \mu\text{m}$ となります。



ポストでマウントされた光学部品のアップエラー



# 材質の選択と それぞれの特性

Material Selection and Properties

アプリケーションに対する正しい位置決め用光学部品の選択は、オプトメカニカルハードウェアの材質と製造方法にかかっています。メスグリオは、各々のアプリケーションに対する製品の選択を支援することができます。

## 材質と特性

堅牢で、精度と安定性の高い光学位置決め装置は、材質の適切な選択から始まります。この場合、コスト、機械加工性、耐久性、耐腐食性、剛性、熱膨張、および重量などの要素を考慮しなければなりません。メスグリオのハードウェアは、そのほとんどがアルミニウム、スチール、および真鍮それぞれの材質の良好な特性を考慮した設計となっています。一方、特別な材質が特殊なアプリケーションに使用されます。一例として、熱的な安定が必要とされるファブリペロー干渉計の場合、インバー、クォーツ、もしくはセラミックのような熱膨張係数の小さな材質を光学素子の保持に使用する必要があります。特殊なアプリケーションに対しこれらの材質を使用する場合、コストの増加と、それに伴う仕様の改善とを比較検討する必要があります。

## アルミニウム

アルミニウムは、オプトメカニカルハードウェアの材質として、最も一般的なものです。この材質は、経済的、機械加工が容易、軽量であると共に、高い重量対強度比を持っています。アルミニウムは柔らかい材質ですが、耐摩耗性と耐久性を高めるためのアルマイト処理を施すことにより表面の強度を高めることができ、また黒色にすることにより表面の反射光を抑えることができます。アルミニウムには、長時間にわたる安定性が必要とされる光学部品にとっては望ましくない、温度による伸縮が起こります。アルミニウムの熱膨張係数( $24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )は高い値を示しますが、熱伝導率も高いことにより光学部品内の温度勾配が素早く減少し、熱膨張の差異により起こる歪みを和らげます。この大きさは、相対的な歪み(熱膨張係数 / 熱伝導率)によって示されます。更に、アルミニウムの大きな熱容量が、部分的な熱のばらつきと、それによって起こる寸法の変動を緩和します。

アルミニウムは、レンズホルダ、キネマチックミラーマウント、およびプリズムテーブルなどの光学部品ホルダに使用されます。アルミニウムは、この材質のボディに対してスチール製の調整ネジを使用した場合、比較的大きな摩擦が発生する点に問題があります。大きな摩擦はネジの磨耗を引き起こし、調整

ネジの感触や遊びを低下させます。一方、品質の良い潤滑材により、この摩擦を減らし、製品の寿命を延ばすことができます。OEMアプリケーションのように、頻繁に調整することが無い場合には、特に効果的な方法です。また、過酷な使用条件、もしくは若干のコストアップが許される場合には、アルミ製のボディに真鍮製のブッシュを取り付ける方法があります。真鍮製のインサートにより摩擦が減少し、操作感や遊びを向上するために、ネジを製造する際、より厳しい寸法公差を設定することが可能となります。良い例として、アルミ製ボディに真鍮製のインサートを使用したキネマチックマウントが挙げられます。

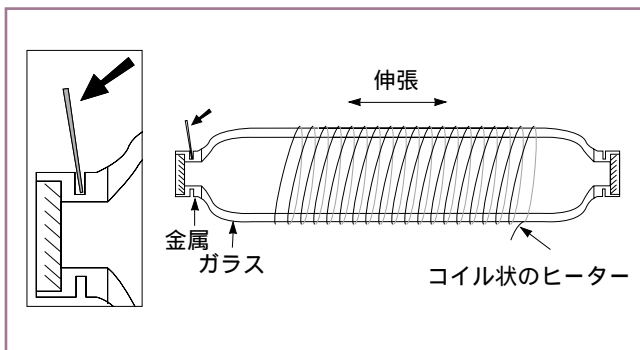
## スチール

スチールはアルミニウムに比べ、高い剛性と低い熱膨張係数( $11 \sim 17 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )を持っています。一方、重量対強度比は同等でありながら熱伝導率が低いことから、相対的な歪みはアルミニウムよりも大きくなっていますが、負荷荷重の変化に対してもその寸法を維持するため、位置決めステージに多く使用されています。

スチールのユニークなアプリケーションのひとつとして、メスグリオのマイクロポイントフレクチャーマウントが挙げられます。このマウントは、熱膨張と磨耗の問題が最小となるよう、硬質のパネ鋼で一体成形されています。スチールは、その高い剛性からポストおよびピラーの材料として多く用いられています。ニッケルメッキが施されたスチール製チューブと、振動を軽減するための充填材(特許)を組み合わせたメスグリオの除振ステイブルロッドは、独自の設計により材質から起こる問題点を解消している最も良い例といえます。

## 真鍮(黄銅)

真鍮は、光学機械部品の材料として古くから用いられています。他の材質に比べ優れた加工性を持ち、面精度が必要とされる用途に適しますが、重量に対する剛性の比が低いため、現在ではアルミニウムやスチールに置き換えられてきています。複数の材質を組み合わせた製品の場合には、主としてアルミニウムもしくはスチールで製造されますが、精密なブッシュや調整ネジなどには真鍮が用いられます。メスグリオでは、複合材料の使用が適さない部分に、経済性を考慮しながら引き続き真鍮を採用しています。例えば、メスグリオのフレクチャーマウントには、ステンレススチール製の調整ネジが真鍮製の本体に直接取り付けられています。



ミラーマウントの変形によるレーザーキャビティミラーの角度アライメントと、熱によるキャビティ長のチューニング

## 熱膨張

温度による膨張の度合いは、材質により様々です。スチールは、良好な熱的特性を持ち、また安価であり、コストを抑えながら熱的な安定を必要とする位置決めアプリケーションにとっては最適な材質といえます。今日の研究開発の分野は、長時間の安定性、優れた精度、および位置決めの際の多軸の自由度など、ますます増える要求に対して挑戦しています。また、シングルモードファイバーのピグテール、および高分解能の顕微鏡におけるサブミクロン単位の機構の進歩に伴い、さまざまなタイプの材質にもアプローチしています。

温度補償技術を考慮した設計は、レーザーキャビティの設計者に良く知られています。メスグリオは、研究室や製造現場の環境における位置決めの問題を解決するため、この技術を採用しています。

長さ10 mmのスチール製のバーは、1 °Cの温度変化につき長さが100 nm変化します。この長さの変化は、原子の直径の数百倍に相当します。スチールを光学部品の位置決めを使用する場合、意図する位置からシフトしてしまう可能性があります。従って、精密な光学素子もしくは装置の設計者は、このシフトを補償する、もしくは熱により発生する歪みを除去する手法を考慮しなければなりません。

## 表面処理

多くの場合、材料の表面処理は、材質自体の選択と同様に重要な要素です。適切な表面処理は、製品の保護、耐久性、および外観を向上させることができます。ほとんどのハードウェア製品には反射光を抑えるため、黒色アルマイト、もしくはその他の処理を施してあります。

アルミニウムに施すアルマイト処理は表面を硬化させ、保護し、傷や磨耗を防止します。また、滑らかではなく艶消し加工されたアルマイト処理により、光が拡散し、反射光が抑えられます。これは、肉眼へのダメージを与える可能性のある高エネルギーレーザーを使用する場合には、特に必要です。

スチールに対する表面処理は、そのアプリケーションにより異なります。スチール製のパーツには、耐腐食性と耐久性を増すためのニッケルメッキを施します。トランスレーションステージに使用するスチールには、光の反射と腐食を抑える黒色クロムメッキを施します。ステンレススチールは基本的に耐腐食性と耐久性を併せ持つため、通常は光の反射を防ぐ艶消し加工のみを施します。

真鍮は通常、黒色クロムメッキもしくは塗装を施すか、未処理のまま使用します。