

# 精密位置決め装置

## Micropositioners

光学システムにおいて、光線を操作するために高精度のレンズ、ミラー等の光学部品を用意しても、それらを保持、駆動させる光学機械部品または装置の精度が低ければ、システム全体の精度の向上を計ることはできません。従って、本章では光学システムの精度に大きな影響を及ぼす機械的要素、特に精密光学部品を高い精度で駆動させ、正確な焦点位置を求めたり、正確な光軸調整を行ったりするために必要な精密位置決め装置の一般論と最新のマイクロ駆動技術についての説明を行うと共にメスグリオの誇るマイクロ駆動システム“ナノムーバー”についての詳しい説明を行います。

### 精密位置決め装置

ここでいう精密位置決め装置とは、リモートコントロールを行う場合に非常に高い分解能で対象物を遠隔駆動することができる装置を指します。この種の装置は全て電氣的にコントロールされ、2方向以上の駆動を行わせるためにしばしば組み合わせて使用されます。精密位置決め装置“ナノムーバー”は、広範囲の研究開発に係わるオプティクス及びエレクトロオプティクスの分野での使用に適しており、また複雑な動きを必要とする装置への応用にも適しています。最高の光学的性能を得るためには、オプティクスの正確な位置決めコントロールが常に要求されます。しかしながらオプティクス及びエレクトロオプティクスがより小型で、より精密になればなる程、精密位置決め装置の応用範囲と、より優れた仕様及び公差の必要性が劇的に増大します。ここ数年におけるエレクトロオプティクスの分野の傾向に基づき、精密位置決め装置の多くはレーザー技術の継続的な開発及び展開を追跡する格好で開発が進められています。

精密位置決め装置の用途は相当広範囲に及びます。精密位置決め装置はレンズ、ミラーあるいは回折格子等の光学部品を正確にコントロールするために既に広範囲に採用されています。光学部品を接近し難い位置にセットする場合、または最適焦点範囲が非常に小さいために超精密なコントロールが必要な場合等に採用されています。数フェムト秒( $10^{-15}$ 秒)位の短いパルスを発振することができるモードロックレーザーを利用して、実験に基づき光遅延ラインを求める場合には、精密位置決め装置に同程度の分解能が要求されます。(1フェムト秒当たりの光の到達距離は約 $0.3 \mu\text{m}$ )。半導体レーザー加工機またはエッチング装置においては、 $1 \mu\text{m}$ 以下の分解能でレーザービームの位置決めを行うことが絶対的な要件となる

ため、非常に高精度の精密位置決め装置を必要としますが、ここで紹介させていただくナノムーバー™(NANOMOVER™)はこのような用途に最適な機器となります。

細胞生理学においては、フォーカシングしたレーザービームでかなり強烈な刺激を細胞状の物質に与えて診断検査を行う、またはある方法で細胞に加工を施す場合に精密位置決め装置を必要とします。最近、遺伝子工学の分野で、細胞を単一の遺伝子に分離できる有望な第一段階となりうる染色体の物理的分割に成功しましたが、このような技術を完全に達成するためには、レーザービームまたはカッターを正確に、高い安定性を伴って位置させる必要性が欠かせません。より現実的なレベルにおいては、精密なレーザー加工機あるいは従来からある精密加工機に、プログラミングによる遠隔操作が可能で位置決め装置への改良を施すことができれば便利さと有用性が一段と高まります。精密位置決め装置の用途は無限に考えられますが、精密位置決め技術の全ての応用技術をここで紹介することはできません。

### 駆動に関するパラメーターの定義

直線的または回転的な駆動を与える精密位置決め装置の性能を定義するために幾つかのパラメーターを使用することができます。自動化された位置決め装置は何年も前から提供されていますが、パラメーターの定義の設定を曖昧にしたまま製造され、また意味的な誤用や必要以上のパラメーターが使用されている場合がかなりあります。従って、メスグリオでは以下に掲げる必要かつ十分な3つのパラメーターをもって駆動のパラメーターを定義します。

**分解能**：分解能はシステムを駆動する際の移動量の最小単位(例えば、ステッピングモーターの1ステップに対応する移動量)。分解能は非常に重要なパラメーターの一つではありますが、高い繰り返し精度を維持する意味合いを除いて、多くの用途においてはあまり使用されなくなっています。

**繰り返し精度**：繰り返し精度は、設定された位置の再現性の正確さを示すパラメーターで、設定位置と再現した位置との差で定義されます。バックラッシュとヒステリシス現象の影響により通常二方向の繰り返し精度が劣るため、単一方向と二方向とは別々に規定することができます。

# マイクロステッピング法

## Methods of Micropositioning

**精度：**精度は目標とする位置と実際の位置の絶対的な偏差として定義されます(例えば、動きの直線性の測定において)。換算された精度が評価され、かつ補償された繰返し誤差を読み取る値であるため、通常パラメータとしての精度は他のパラメータと比較してそれほど重要なものとはなりません。

精密位置決め装置には3つの主なタイプがあり、夫々に独自の長所短所があります。3つのタイプとは、圧電方式、DCサーボモーターおよびステッピングモーターを使用するタイプです。

### 圧電(ピエゾ)素子方式

ある種のセラミック物質は与えられた電界につり合った幾何学的ひずみを作り出します。この現象を圧電効果といいます。このような特性を持つ現実的な物質は多数の微小結晶体でできており、各々の結晶体は永久二重極を持っています。与えられた電界が結晶体を並べようとして二重極に力を加え、ひずみを生み出します。結晶体の非対称形状と共に、分極されたセラミックの予め整列させられた結晶体の性質は、電界効果の下での物質の膨張に帰結します。これと逆の効果、則ちピエゾセラミックを圧することにより点火スパークを得るのに十分なチャージを発生させる効果がシガレットライター等に 응용されています。

ピエゾ素子の変形による“動き”は基本的に非常に小さいので、圧電タイプの精密位置決め装置に微細な移動量を達成させることが可能です。しかしながら、活性材料の全長の0.2%より大きな変形を得ることが不可能であるため、駆動範囲が大きく制限されるということがこの技術の主な欠点となっています。また、繰返し精度に悪影響を与えるヒステリシス、非直線性およびクリーピングの問題等がピエゾ素子の他の欠点としてあげられます。正確なピエゾ素子のコントロールを行っても、ヒステリシス及びクリーピングのために、このタイプの精密位置決め装置では優れた繰返し精度を達成することはできません。一定の電圧を印加されているピエゾ素子はその長さが時間経過に従って対数的に変化します。このようなクリーピングは強力な電界の下でピエゾ素子の分極特性が変化することに起因します。更に、高い電界を印加した場合、僅かではありますが重大な影響を及ぼす圧電効果の非直線性により精度の低下を招きます。従って、正確な繰返し動作が必要な精密位置決め装置をピエゾ素子でコントロ

ールするためにはフィードバック機構を採用することが基本となります。

ピエゾ素子を用いた精密位置決め装置の主な長所としては、この種の装置としては機械的に単純であること、大きな負荷を駆動できること、高い分解能が得られること、高速で駆動を行うことができること等が挙げられます。しかしながら、センサーやフィードバックループを使用する必要性によりピエゾ素子の長所である高い分解能や単純さは幾分軽減されてしまいます。また有効な駆動範囲を得るために、利点である速度が減少したとしても、蠕動運動機構やラチェットタイプの運動機構を得るために、いくつかの素子を結合させる必要があります。

### DCサーボモーター

精密位置決め装置にはDCサーボモーターもしばしば採用されています。この場合、通常は駆動用精密リードクリューを直線または回転運動を作り出すために使用しています。高性能DCサーボモーターにはブラシレスモーターを含む多数のタイプのものがあります。全ての種類のDCサーボモーターは、軽量、低慣性アマチュア、印加電圧の変化に対する素早い応答等の共通の特徴を有しています。しかしながら、DCサーボモーターの特性は一般的にスピードと負荷の違いにより変化してしまいます。DCサーボモーターの各モデルは、セッティング条件が異なると性能のピークも違ったものとなってしまいます。また、この種のモーターにおいては、焼けを防ぐために、巻線が励磁されていない完全な静止状態にある時には保持トルクがゼロとなる欠点があります。

この種のモーターは、オープンループ法で使用すると、モーターを既知の速度で駆動することができますが、正確な移動量、例えば変位を知ることはできません。従って、DCサーボモーターのサーボループにエンコーダのような位置検出装置を組込むことが、既知の変位を作り出すための絶対条件となります。

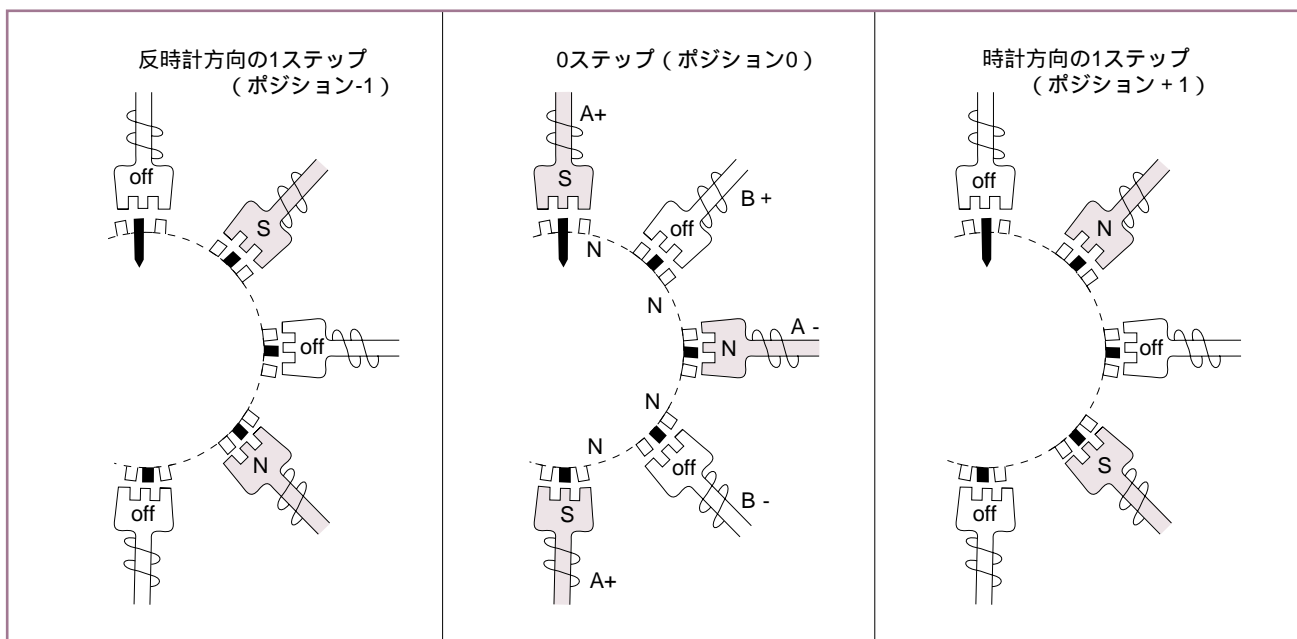
DCサーボモーターで駆動される精密位置決め装置は、所望の移動範囲を得ることができます。しかしながら、この駆動方法では速度範囲が制限され、また分解能と繰返し精度が低下する傾向があります(特に2方向の精密位置決め装置においてヒステリシス現象のために繰返し精度が低下します)。ヒステリシス現象は保持トルクの欠如の結果生じるもので、縦(Z軸)方向の移動を行わせる場合には最悪の欠点となります。

## ステッピングモータ

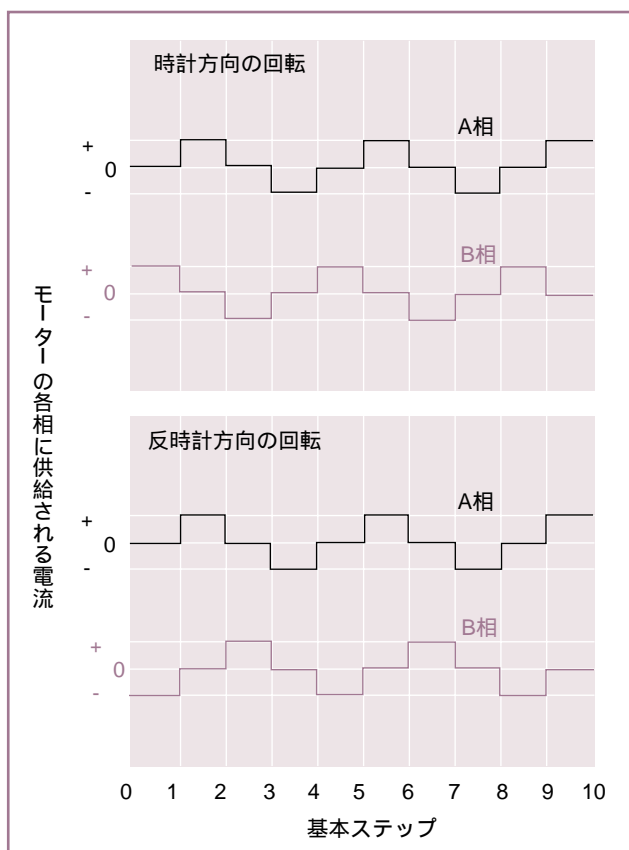
多くの精密位置決め装置において、ステッピングモータは最良の選択であると評価されています。ステッピングモータはステージ等に直線または回転の運動を行わせるよう精密リードスクリューを駆動するため、あるいは直接回転動作を与えるために用いられます。ステッピングモータはブラシレスDCサーボモータの技術から開発されたもので、その作動原理はよく知られていますが、精密位置決め装置の技術的背景としてここでその要点を説明致します。ステッピングモータは外周上に等しい間隔をもたせて多数の強磁性材料よりなる歯を配設した円筒形のロータより成ります。ハイブリッドステッピングモータ等のある種のステッピングモータにおいては、上述した歯は永久磁石で作られています。通常、ロータは、数セットの電磁石を並べたポール(極)またはステイター(固定子)と呼ばれる円筒状の囲いの中でベアリングにより支持されています。電氣的に極性が同じである固定子(ステイター)のセットを“相”と呼びます。2相または4相がほとんどのステッピングモータに共通の相数です。

下に示す図はメレスグリオ社の精密位置決め装置であるナ

ノムーバ™に使用されている理想に近い2相ステッピングモータの作動原理を示しています。各相は90°ずつずらせて配置された4つの固定子で構成されています。極性が同じである2つの固定子を互いに向かい合わせた2組の固定子の各組は、互いに逆の極性を有しています。従って、図において+および-で示される固定子の極性は、各相に電流が流される時互いに逆の極性となります。8つの固定子の歯はロータの歯のピッチに関して固定子の歯がそのピッチの1/4ずつずれるよう連続的に配置されています。A相に電流が流され、B相を流れる電流が0である時、A相に誘導された磁界は固定子Aの歯とロータの歯(N極)とを整列させるよう働きます(図のポジション0)。B相に電流が流れるよう切り替えることにより、ロータの歯が最も近くの新たにエネルギーが最小になった固定子の位置に引き付けられることにより、モータの1ステップの駆動がなされます。B相を流れる電流の方向の違いにより、このステップは時計方向(図のポジション+1)または反時計方向(図のポジション-1)のどちらの方向にもなされます。“2相ステッピングモータのロータが各1ステップの回転に対してその歯のピッチの1/4だけ回転する”ということ容易に理解できるように、図中のロータの歯にマークがなされています。ロータ1回転当た



各相に供給される電流をどのようにスイッチングしたら一つのステップによりローターが駆動されるかを示す二相ステップモータの図解(1ステップ=ローターの歯の1/4、二つの相はA、Bで示されています)



両回転方向に対する典型的な二相ステッピングモーターの電流スイッチングパターン

りのステップ数は、ロータの外周に設けられている歯の数を  $N_t$  とすると  $4N_t$  となります。ナノムーバ™ に用いられているステッピングモーターにおいては、歯の数が100であるのでステップ数は400となります。図には駆動の変化に対応する供給電流のパターンが両方向の回転について示されています。

モーターの速度は供給電流のスイッチングの比の変化によりコントロールされます。

ステッピングモーターはDCサーボモーターやピエゾ素子を用いた駆動源より優れた特徴を呈します。このステッピングモーターは+レベル、-レベル及び0レベルの数を正確に数えることができる方形波電流により駆動されるため、エンコーダを使

用しなくても1ステップ以内の分解能で最終的な位置を容易に知ることができます。さらに、後述するマイクロステッピング法として知られる技術により、ステップ電流の1ステップをより小さな幅の等しいステップに分解することが可能です。

ステッピングモーターにはサーボ帰還信号が必要ではありませんが、もし必要であれば帰還ループで使用することも勿論可能です。精密駆動範囲を拡張する場合に長尺マイクロメータの送りネジに非常に高い質を必要としたとしても、精密位置決め装置の駆動範囲を理論的に制限することはありません。また、ステッピングモーターに生じる誤差はパルス電流からステップへの変換が完全に行われる限り蓄積されることはありません。ステッピングモーターは静止中に位置決め装置にドリフトやクリープが生じないよう、少なくとも1つの相の一部または全てを常に励磁しています。相対的に大きな負荷を失速することなく加速できるよう精密位置決め装置のステッピングモーターでの駆動を可能にするために、動的トルクはパルス比が低い程大きくなります。ステッピングモーターを用いたナノムーバ™ は圧電タイプの装置とほぼ同じ程度の分解能があり、また最も重要な差異として繰り返し精度が極端に優れていることを挙げるすることができます。この装置には複雑な駆動回路が必要とされますが、ステッピングモーターシステムは他の分解能の高い装置では達成することができないようなスピードでの駆動を可能にします。ナノムーバ™ は、現在市販されているほとんどの精密位置決め装置に比べて精度及び繰り返し性能が優れているにもかかわらず、従来の装置より速い2.5 mm/secの最大速度を有しています。

ステッピングモーターとDCサーボモーターの両者に共通する不都合に、直線的な作動を得るための機械的な結合を必要とすることが挙げられ、従って繰り返し性能とバックラッシュに問題が生じることがありますが、このような不都合はロストモーション補償(Lost Motion Compensation)をプログラムしたソフトウェアで解決することができます。ナノムーバ™ においてはロストモーション補償で単一方向及び2方向の両駆動の方向に対して  $\pm 100$  nmの繰り返し精度が達成されています。