安価なリニアモーションデバイスの性能特性測定法

By Rob Steves, President

概要

リニアモーションアプリケーションの要件を決定したら、リニアモーション製品がどのようにアプリケーションのニーズを満たしているかを検証できますか？ 製造元の仕様はしばしば曖昧かつ/または不完全です。唯一の確実な方法は、自分で製品をテストすることです。しかし、最終的なアプリケーションでの製品のテストは、設計プロセスの初期段階では通常不可能です。この記事では、リニアモーションシステムの最も重要な性能特性を迅速に判断するために、経験の少ない平均的なユーザーが実行でき、洗練された計測器を使用しない一連のテストについて説明します。

Rob Steves、B.A.Sc.、M.Eng：ステッパーモーターベースの精密リニアアクチュエータ、リニアスライド、光学、産業オートメーション、バイオメディカルやその他たくさんの用途に使用されるモーションコントロール製品の設計と製造のリーダーである Zaber Technologies Inc 社の電気機械設計エンジニアおよび社長

初めに

空間内のオブジェクトには 6 自由度があります.X 軸、Y 軸、Z 軸に沿った直線運動、およびそれらの軸のそれぞれの周りの回転です。典型的な直線運動システムを考えてみましょう。このここでは Zaber T-LSR075D リニアスライドを使用します。図 1 を参照して、座標系を次のように定義します。

- X - 移動軸に平行な水平軸
- Y - 移動軸に垂直な水平軸
- Z - X 軸と Y 軸に垂直な垂直軸
- ロール - X 軸回りの回転
- ピッチ - Y 軸回りの回転
- ヨー - Z 軸回りの回転

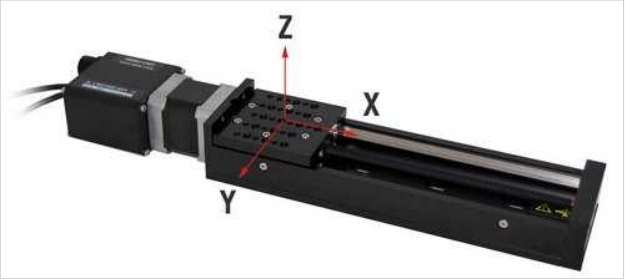

図 1：座標の定義

単軸モーションコントロールデバイスの目標は、6 番目のモーションを正確に制御しながら 5 自由度を制限することです。 写真のリニアスライドの場合、3 つの回転自由度のすべてが制限され、且つ 2 つの直線自由度も制限されます。X 軸方向の動きのみが制御されます。

リニアモーション製品を購入された方であれば、通常以下の一般的な仕様は認識されています。

- 稼働範囲
- 速度
- 負荷容量
- 位置誤差（精度）
- 再現性
- バックラッシュ
- 分解能

読者がこれらの条項には精通していると仮定して、ここでは定義しません。 これらの仕様のそれぞれは、X 軸動作のみを記述していることに留意してください。それは明白ではないかもしれませんが、6 自由度のそれぞれについて、同様の仕様のセットが存在することを理解する必要があります。自由度がある程度の制約を受けているかどうかは問題ではありません。 1 自由度で測定できるものは別の自由度で測定できます。

場合によっては、対応する仕様の値が明白です。 例えば、任意の制約された次元における「範囲」、「速度」、および「分解能」は 0 でなければなりません。他の場合には、その仕様は別の名前で馴染み深いかもしれない。例えば、「水平振れ」および「垂直振れ」は、それぞれ Y 次元および Z 次元における位置誤差を表す寛容表現です。

他の仕様は、標準的な命名規則が採用されていないほど不明確です。 たとえば、ピッチ、ヨー、およびロールのディメンションでの位置エラーについて引用された値を見るのは珍しいことではありませんが、各メーカーはそれぞれ異なるものと呼んでいるようです。 さらに他の仕様はほとんど引用されていません。 これらの仕様は確かに他の自由度に存在しますが、再現性やバックラッシュが稼働軸以外のものについては見当たりません。 図 2：試験対象と試験装置　（未校正）

特定の仕様はほとんど引用されませんが、その値はしばしばユーザーによって要求されます。 場合によっては、これらの仕様を認識する唯一の方法は、デバイスを自分でテストすることです。 この記事の残りの部分が記述しているのはそのプロセスについてです。.

試験装置（テスト機器）

試験対象といくつかの典型的な試験装置を図 2 に示しています。左上には光ブレッドボード（アルマイト処理アルミ板に一定間隔でタップ穴がある）。 右上には、花崗岩の定盤があります。 最近では、表面精度が驚くべき程高精度なものが非常にわずかな費用で得られます。 12 インチ x12 インチの表面精度 0.0001 インチ(約 3 ミクロン）内に平らに仕上げたものがわズが￥5,000 程です。

以下の写真には、0.0005 "の分割数を持つ 2 つのダイヤルインジケータと、さまざまな構成でそれらを取り付けるためのハードウェアがあります。以降の写真に使用されている他の機器が表示されますが、同じテーマのすべてのバリエーションです。

ダイヤルゲージと固定冶具

測定速度

代表的に、速度に関する唯一の軸はX軸（移動軸）です。これから測定される他の自由度にも常に一定の変化がありますが、通常は位置誤差だけを考慮し、速度は問題になりません。 移動軸に沿って、ユーザーが関心を持っているいくつかの速度関連の仕様があります。これらは最低速度、速度分解能、速度誤差（精度）、最高速度です。 デジタル制御システムによって特定の離散（不連続）速度のみを実行することができます。最小速度は一般に速度分解能と同じであり、これらは通常制御ハードウェアによって予め定義されており、単に「設定速度」命令または任意の動作システムに存在する同様の機能を参照して簡単に実行できます。

速度誤差は、通常のストップウォッチで比較的容易に実施できます。 単に加速度を0に設定し、速度を低い値に設定し、到達するまでに正確に1000秒かかると計算された移動命令を実行します。 ストップウォッチを使用すると、人的ミスを考慮しても+/- 1秒のタイミング精度を達成するのは簡単です。1000秒の移動では+/- 0.1%の精度で速度を測定できるはずです。
より高い精度が必要な場合は、完了までに10000秒かかる移動命令を試行して、速度の測定精度を±0.01%達成することができます。 （文字通り）一日中テストを実施すれば、100000秒で+/- 0.001%の精度を試すことができます。これは、1秒間よりも正確なストップウォッチを使用していることを前提としています。モーションデバイスがコンピューターで制御されている場合、テスト対象が明確なので、スピードを測定ははるかに簡単です。

移動命令を実行し、完了に要する時間を測定し、実際の速度と速度誤差を計算して表示するためのテストスクリプトを書くことができます。 ただし、オペレーティングシステムは決定的ではなく、マシン上で実行されているプロセスに応じて、ストップウォッチを持つ人よりも正確に完了時刻を測定することができない場合があります。 最大速度は試行錯誤によって決定できますが、負荷に依存する可能性が高いことに注意してください。

負荷容量の測定

リニアモーションデバイスに掛かる荷重は、X、Y、Z軸に沿った力、またはそれらの軸の周りのモーメントの形を取ることができます。 例えば、センタリングされたウェイトは、ステージには、Z次元のみに力が掛ります。荷重がセンタリングされていない場合は、Z次元の力とXまたはY軸まわりのモーメント（またはその両方）の両方掛がかります。これらの力とモーメントは、両方ともデバイスの寿命に作用します。また、デバイスと同様に移動することができます。一般に引用される2つの負荷仕様があります。 これは、スライドが失速（ストール）する最大負荷と、スライドの寿命が保証期間を超えて低下する可能性がある推奨負荷です。 メーカーはユーザーに対して早期にデバイスが劣化する動作を奨励することを好まないので、しばしば推奨負荷のみが引用されます。 しかしながら、ユーザーは対応する寿命が短くなっても構わない場合は、推奨負荷を大幅に超えることができることを認識すべきです。

最大負荷は通常速度に依存します。これを測定するためには、固定された重りをステージに取り付けることによって、既知の力またはモーメント（または2つのものを分離することが困難であるため、力とモーメントの組み合わせ）を適用することができます。次に、達成可能な最大値を決定するために速度を変化させることができます。いくつかの異なる負荷をテストし、補間することで、速度によって変化する最大荷重の合理的なプロットが得られます。

寿命に対する負荷の影響を決定することは、負荷に対する速度の影響を決定するほど簡単ではありません。 さまざまな負荷で障害が発生するまで、いくつかのデバイスをサイクルテストする必要がありますが、これは通常エンドユーザにとって実用的ではありません。 しかし、メーカーにとっては、ベアリングやレールなどの個々の部品を簡単に交換して連続テストを行うことができ、寿命テストのコストを大幅に削減することができます。

測定位置誤差

上述したように、位置誤差は、一般に、ユーザにとって第一の関心事です。 位置誤差は、6自由度の各々で測定することができます。多くの場合、単一のセットアップを使用して、線形寸法と回転寸法の両方で位置誤差を同時に測定することができます。

Y 誤差とヨー誤差 の測定

ヨー誤差を測定するためのセットアップはまた、Y 誤差を測定するのにも役立ちます。 図 3 を参照してください。花崗岩の定盤はリニアスライドに平行に取り付けられています。 2 つのダイヤルインジケータは、接触プローブが花崗岩の定盤の垂直面に静かに触れるようにステージに取り付けられています。スライドの移動範囲にわたってダイヤルゲージの読み取り値の変化を最小にするように、定盤はスライドと平行に整列されています。

ロールの構成要素のないヨー成分のみを測定するためには、プローブの接触面と定盤との接触点がスライドのベアリングと同じ平面内にあることが重要です。セットアップを観察すると、Z 方向および X 方向の小さな動きがダイヤルの読み取り値に影響しないことがわかります。ピッチやロール角の小さな変化もありません。したがって、これは、Y 位置誤差およびヨー位置誤差を測定するための良好な設定であることは明らかです。

スライドの移動中のいくつかの場所で、両方のダイヤルゲージから読み取り値を取得することができます。 各位置では、Y 位置は 2 つのダイヤル測定値の平均として計算でき、ヨー角（ラジアン単位）は 2 つの測定値の差をプローブ間の距離（この場合は 5 インチ）で割ったものです。フルレンジでの Y 位置およびヨー角の最大変動移動範囲はそれぞれ Y 誤差およびヨー誤差となります。Y 誤差は、より一般的に水平ランアウトと呼ばれます。

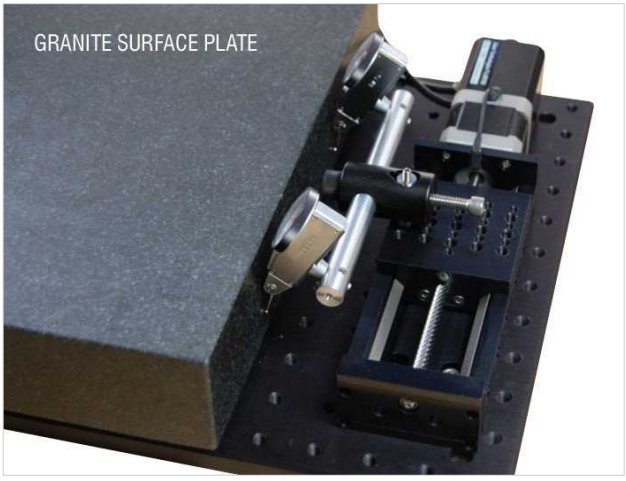

図 3：Y 誤差およびヨー誤差を測定するためのセットアップ

ピッチ誤差の測定

この場合、ピッチ誤差はリードスクリューのピッチ誤差と混同しないでください。 リードスクリューピッチ誤差は、後に測定されるX誤差への関連要素として発生します。現時点でのピッチ誤差は、スライド・プラットフォームがX次元の全運動範囲にわたって移動するときのスライド・プラットフォームのピッチ角の変化を指します。

ピッチエラーを測定するためのセットアップを図 4 に示します。これはヨー誤差の測定に似ていますが、ダイヤルゲージの In プローブは、垂直エッジではなく、花崗岩の定盤の水平エッジに対して動いています。ここでも、定盤との接触点がリニアスライドベアリングと同じ平面内にあることが重要です。これを実現するためにスライドステージは光学定盤上で持ち上げられています。 X または Y の小さな動きがダイヤルの読み取り値に影響を与えないことがわかります。 ヨー角の小さな変化もありません。 Z 位置とロール角の変化はゲージの読みに影響しますが、両方のゲージにも同じ影響があります。ピッチ角は 2 つの測定値の間の差に関係するので、その測定は、Z 誤差またはロール誤差によって悪影響を受けることはない。

ピッチ角（ラジアン単位）は、2 つの測定値の差をプローブ接触点間の距離（5 インチ）で割ったものです。 全行程にわたって測定されたピッチ角の変動がピッチ誤差となります。 この設定を使用して Z 誤差を測定しようとされる人がいますが、測定されるロール誤差の成分と Z 誤差を区別することは不可能なので、それは良い選択ではありません。

Z誤差とロールエラーの測定

ロール誤差を測定するためのセットアップを図 5 に示します。リニアスライドと花崗岩の定盤はピッチ測定と同じ位置に保たれていますが、接触点が Y 軸に沿うようにダイヤルゲージの設定が変わります。X と Y の小さな動きはダイヤルの読み取り値に影響しないことがわかります。 ピッチまたはヨー角の小さな変化もありません。 したがって、これは Z エラーとロールエラーを測定するのに適しています。 ダイヤルゲージは、接触点が 2.5 インチ離れているように設定されています。右端のプローブの接触点はステージの中心から 2.5 インチ離れています。

直読ではありませんが、ちょっとしたジオメトリでは、Z位置は右端の読みを倍にし、左端の読みを引くことによって得られます。

ロール角は、2つの測定値の差をプローブ間の距離（この場合2.5インチ）で割ったもので与えられます。全移動範囲にわたるZ位置およびロール角の変化は、Z誤差およびロール誤差となります。Z誤差は、より一般的に垂直振れと呼ばれます。それが大きなの関心事であれば、Z誤差を測定する簡単な方法がありますが、すべての自由度で位置誤差を測定する場合、同じ設定でZ誤差とロール誤差を測定すると便利です。

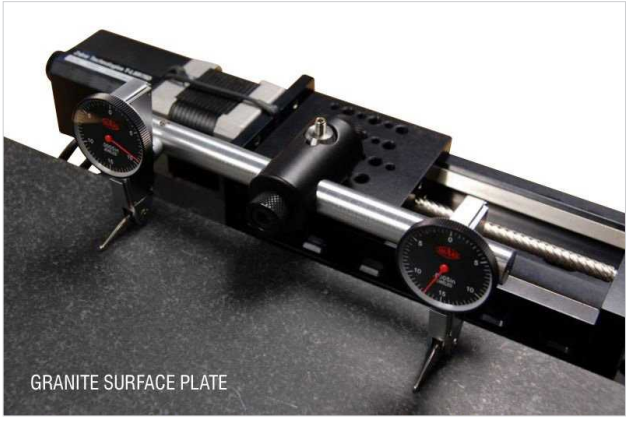

図4：ピッチエラーを測定するためのセットアップ

図5：Z誤差とロールを測定するためのセットアップ

X誤差測定

X軸に沿った位置誤差はしばしば「精度」と呼ばれますが、値が大きいほど精度の低いデバイス見做されます。

この仕様値はほとんどの場合メーカーによって明記されているため、ユーザーがテストする必要はありません。高価な機器が無い場合は測定するのが最も難しい仕様なので、これは幸運です。

図6は、X誤差を測定するための典型的なセットアップを示しています。リニアエンコーダが取り付けられ、X軸に移動します。エンコーダの分解能は、テストするモーションコントロールデバイスの分解能よりも小さくなければなりません。ここでは、Heidenhain MT 1271測長ゲージが使用されています。それは0.05μmの分解能を有します。当該リニアスライドは比較的粗いリードスクリューを有しているため、分解能はわずか1μmである。ゲージの動作範囲がテストされているモーションデバイスの動作範囲よりも大きい場合は問題になりませんが、比較的短い距離での位置誤差の傾向が得られるので、これは厳密には必要ではありません。写真のゲージはわずか12mmの移動量を有し、リニアスライドは75mmのストロークです。

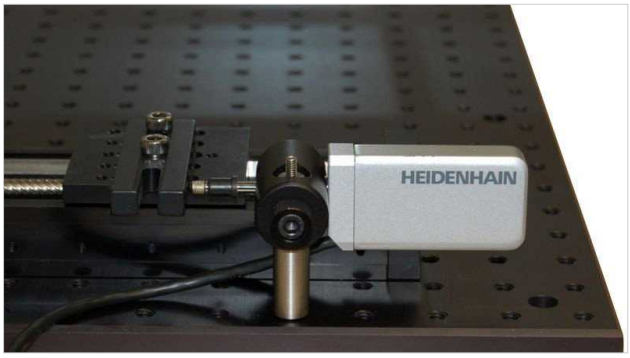

図6：Xエラーを測定するためのセットアップ

鋭い観察者は、写真に設定されているように、X誤差に加えてピッチおよびヨー誤差の小さな成分を測定することに気付くでしょう。しかしながら、短い範囲でX誤差が測定される場合があっても、ピッチ角及びヨー角が大幅に変化することはありません。

特に、開ループであるステッパモータ制御システムでは、移動軸に沿った位置誤差の大部分をモータ自体に追跡することができます。デバイスがマイクロステッピングコントローラを使用する場合は、3 つの異なるシナリオの下で位置決めエラーを確認する必要があります。

1. 少なくとも 4 フルステップを単一のマイクロステップで移動する。
2. モータの少なくとも 1 回の完全回転をフルステップで移動する。
3. デバイス（またはゲージ）の範囲を全回転で移動する。

バイポーラステッパモーターをベースにしたモーションシステムでは、1 ステップ、4 ステップ及び完全 1 回転周期で繰り返される周期的な誤差が生じます。 加えて、リードスクリューに関連する誤差が生じる場合もあります。移動範囲内の任意の位置における総合的な位置誤差は、すべてのこれらのエラーコンポーネントの総和です。 通常、合計誤差のみが引用されますが、一部のエラーは完全なステップまたはモーターの完全な回転で移動するなど、いくつかのエラーを排除することができるため、各ソースによって提供されるエラーの量を知ることは有益です

各誤差の要因からの影響を理解することは、フルステップ、またはフル回転で移動することで性能をどれほど改善することができるかの程度を合理的に推定することができます。

繰り返し精度測定

再現性の仕様に関しては、もし、問われた場合、通常は移動軸に対してのみ引用されます。 しかし、位置誤差を含む任意の自由度にも再現性があります。上記の位置誤差測定テストを複数回実行することによって同じ設定での時間、X、Y、Z、ヨー、ピッチ、およびロール誤差の再現性を決定できます。 用途によっては、直線運動システムが非常に正確であることは重要ではないかもしれない。 場合によっては、高い再現性があるだけでよい場合もあります。 通常、直線運動システム（特にステッピングモータベースのシステム）の繰り返し精度は、それらの精度よりもはるかに優れています。

バクラッシュの測定

再現性と同様に、バックラッシュは通常、移動軸に対してのみ引用されますが、位置誤差を含む任意の自由度もバックラッシュを持つ可能性があります。言い換えると、ある方向からある場所に近づくことは、他の方向から同じ場所に近づくこととは異なる誤差測定をもたらす可能性がある。 ２つの誤差測定値間の差はバックラッシュであり、これは通常、全移動範囲にわたって比較的一定です。

バックラッシュは双方向の再現性とも呼ばれ、どちらかの方向から場所に近づいて結果を比較することで、予想通りに測定できます。

平行度測定

これまでに挙げた仕様はすべて動的仕様です。 すなわち、それらはその静的な幾何学的形状よりもむしろ装置の動作に関連しています。 動的スペックを測定するには、デバイスを移動する必要があります。平行度は、ユーザーが測定に関心を持つ可能性がある静的仕様の 1 つです。 ピッチ、ヨーおよびロール誤差は、スライドがその移動範囲を移動するときの角度位置の変化の尺度ですが、平行度はそれらの変化が発生するベースラインの尺度です。

図 7 は、平行度を測定するための典型的なセットアップを示しています。 花崗岩定盤に取り付けられた高さゲージは、さまざまな場所でステージ表面の高さを測定するために使用されます。 平行度は単に高さの変化です。 必要に応じて、より具体的に、X 方向の平行度（前後方向の高さの変化）と Y 方向の平行度（左右の高さの変化）を別々のエンティティとして引用できますが、単一の値が引用された場合のみです。平行度は、ステージ表面の適切な寸法（長さまたは幅）で割ることによって、ラジアン単位の角度に変換できます。

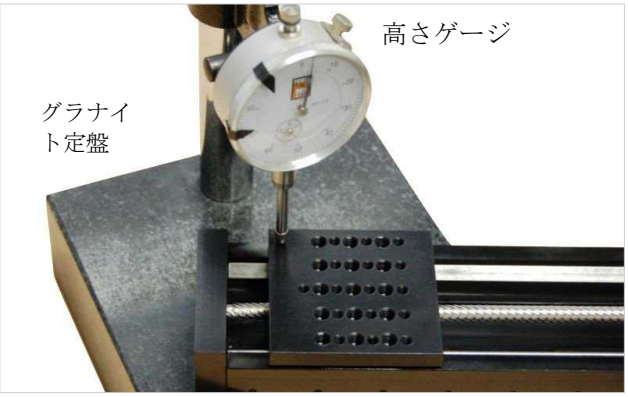

図 7: 平行度を測定するための設定

結論

比較的安価な装置を使用して、直線運動装置のいくつかの重要な性能特性を測定することが可能です。 これらの測定技術は、製造業者によって明示された仕様を検証するためにも、明示されていないスペックを決定するためにも有用です。

テクノロジーリンク株式会社
TECHNOLOGYLINK,LTD.
〒171-0022 東京都豊島区南池袋 3-18-35
OK ビル 2 階
Tel: 03-5924-6750　Fax:03-5924-6751
E-mail: sales@technology-l.com
URL: http://www.technology-link.jp

If you found the above information interesting, consider subscribing to our newsletter to receive product announcements, user tips, and special promotions (typically worth $100 off a selected product). Subscribe online at www.zaber.com.