熱膨張の制御
リニアステージで最高の再現性を得るための戦略

機械エンジニア、DavidGoosen著

初めに

私たちのほとんどは、すべての一般的なエンジニアリング材料を加熱するとどうなるかは分かっていますが、この熱膨張が精密位置決め装置の再現性に如何に影響を及ぼすかに驚くことでしょう。非常に多くの位置決め機器がその測定要素として送りネジを使用しているので、「最初の関門」の熱膨張で長さ 150 mm のステンレス鋼送りネジを考えてみましょう。 17.3 x 10 -6 m / m° C の線熱膨張係数で、5° C の温度変化を受けた場合、親ねじの長さはどうなりますか？ 長さの変化は次の式で与えられます。

$$\Delta L = L\alpha\Delta T$$
$$= (17.3 \times 10^{-6})(0.150)(5)$$
$$= 13.0 \times 10^{-6}\ \text{m}$$

親ネジは 13 µm 伸びます。これはどのくらい重要だと思いますか？ まあ、同様の親ねじを使用する Zaber の X-LSQ150B リニアステージの定格再現性は 2.5 µm です。操作中にこの温度変化が発生した場合、ステージの再現性が 5 分の 1 に低下します。熱膨張は明らかに追加の検討に値するものです。

本稿の第 1 部では、熱膨張が直線位置決め装置の再現性にどのように影響するかの理論を探ります。 パート II では、代表的なリニアステージ X-LSQ150B で行った再現性テストの結果を紹介します。 結果は、熱膨張の重大さとそれを制御するためのいくつかの膨張戦略の有効性を示します。

本稿では、特に熱膨張が再現性にどのように影響するかに焦点を当てます。 精度は温度変化によっても影響を受けますが、ほとんどのアプリケーションでは、それは統計上では大きな影響はありません。 数マイクロメートルの精度の低下は通常、ステージ内の他の誤差の原因によって影が薄くなります。 最も正確な位置決め用途のために、正確さに対する熱膨張の効果は確かに綿密な精査が必要となります。

© 2014 Zaber Technologies Inc.

PART I - THEORY

リニアステージの熱伝播図

リニアステージの再現性に対する熱膨張の影響を示すために、例として Zaber の X-LSQ150B ステージ（下の図 1 参照）を使用します。ここで紹介する分析はこの段階に固有のものですが、示されている原則は任意の位置決め装置に適用できます。 図 2 は、同じステージの熱回路図を示しています。

図 1 : Zaber 電動シリアステージ X-LSQ150B シリーズ

定義と過程

仮定を提示しそして用語を定義することから始めましょう。 リニアステージの位置決めの再現性について有意義な議論をするために、キャリッジ位置測定用の基準位置を定義しなければなりません。 下の図で「基準位置」とマークされている場所に注意してください。 ほとんどの Zaber リニアステージでは、ホーム（0）位置はステージの移動のモータ側にあるホールセンサーによって設定されます。図に示されているように、ホールセンサーがトリガーされるキャリッジ位置が作業基準位置になります。

この分析の目的のために、リードねじは残りのステージ構成部品から熱的に絶縁されていると仮定します。フレキシブルカップリングを介してリードねじの 1 端部をモータシャフトに取り付け、他方の端部をボールベアリングで支持すると、ねじからの両方の導電温度経路が悪くなります。 リードねじは対流と放熱によってのみ外部に熱を放散すると仮定します。代表的な動作条件では、熱絶縁の仮定は正確であるべきです。

対照的に、モーターとステージベース間の熱経路は良好な熱伝導率を持っています。

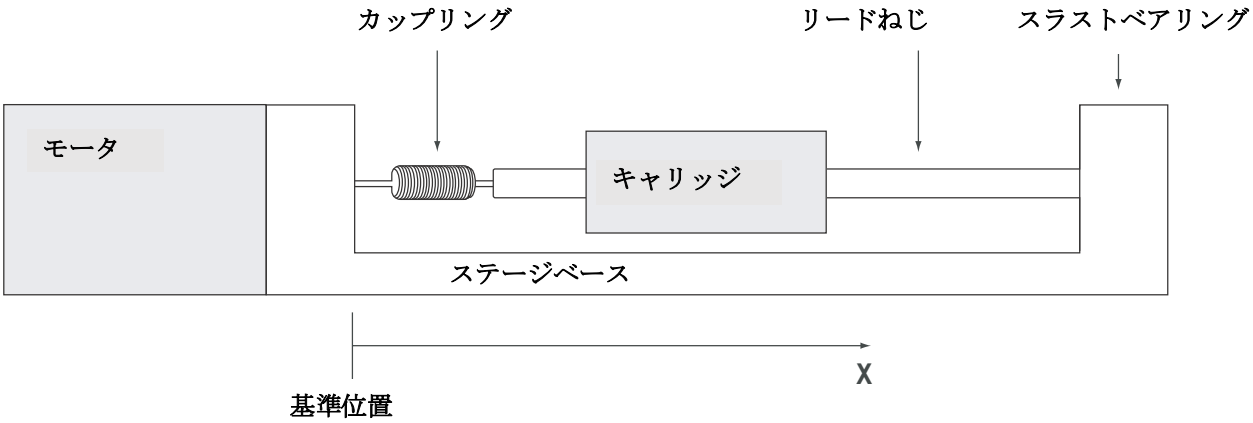


図 2: X-LSQ150B リニアステージの熱回路図

この場合、モータはステージベースとの接触面積が大きく、しっかりとボルトで固定されているため、良好な接触圧が得られます。 したがって、モータによって発生した熱の一部がベースに伝達されると仮定します。

最後の仮定は、2 つのステージ構成要素（ベースとリードネジ）の熱膨張がキャリッジの位置に影響を与えることです。これら２つの構成要素にて基準位置とキャリッジとの間に強固な関連付けができます。カップリングによって、非常に低い剛性でモータとリードネジとの間の軸方向の動きが可能になるので、リードネジとキャリッジとがモータシャフトの軸方向の動きから切り離されていると合理的に仮定することができます。

ステージベースと送りネジが互いに熱的に絶縁されていると仮定したので、それぞれの構成要素に対する熱膨張の影響を別々に分析することによって先へ進みます。 その後、両方の効果を組み合わせて検討します

リードねじの熱膨張

スタート時の初動通過解析では、わずかな温度変化でもリードスクリューの長さに大きな影響を与える可能性があることがわかりました。 例として Zaber の X-LSQ150B を使用して、リニアステージの再現性に対するこの同じ熱膨張の影響を考えてみましょう。

20℃でステージを基準位置でゼロ調整した後、2 mm の目標位置に移動します。 その後、元の 2 mm の位置に戻る前に一連の動きをします。2 mm の目標位置での実際の測定位置はどの程度再現性があるでしょうか？ 安定した熱的条件下（温度変化なし）での X-LSQ150B の定格再現性は 2.5 µm です。これは、目標位置が同じ方向から何度も近づく場合には、実際の測定位置が互いに 2.5 µm 以内になることを意味します。しかし、その間に 2 mm のターゲットまで移動した場合、親ネジの温度が 25°C に上昇すると、実際の測定位置間の差がはるかに大きくなることが予想されます。

図 2 に示すように、X-LSQ ステージ（および Zaber のほとんどのリニアステージ）では、親ネジはステージのモータと反対側の端にあるスラストベアリングによって軸方向に拘束されています。

送りネジの温度が上昇すると、キャリッジとスラストベアリングとの間の送りネジの長さに比例した距離だけ、キャリッジの位置が基準位置に向かって移動します。この例では、キャリッジはスラストベアリングから 148 mm 離れているため、送りネジの熱膨張によって測定位置が次のように減少します。

$$(17.3 \times 10^{-6})(0.148)(5) = 12.8\ \mu m$$

したがって、2 mm のターゲット位置での再現性は、2.5 µm プラス 12.8 µm、つまり 15.3 µm を加えたものとなるはずです。

温度変化に続いてステージがゼロ調整された場合、キャリッジの位置ずれはゼロになりますが、リードスクリューのピッチはその膨張により大きくなります。ターゲットでのキャリッジの測定位置は、キャリッジとホームポジションの間の送りネジの長さに比例する量だけ増加します。この場合は 2 mm。 位置の変位は、次のようになります。

$$(17.3 \times 10^{-6})(0.002)(5) = 0.2\ \mu m$$

この例示では、再現性は 2.5 µm + 0.2 µm、つまり 2.7 µm になるはずです。

原点センサよりもスラスト軸受に近い目標位置では、ステージが基準位置で再ゼロ調整された場合、送りネジの温度変化後の再現性は実際には悪くなります。目標位置での位置および較正手順の両方が、変化する熱条件下でのステージの再現性にかなりの影響を及ぼすことは明らかです。

ステージベースの熱膨張

ステージベースの熱膨張が再現性に与える影響を実証するために、ベースの温度が 5°C 均一に上昇したとします。X-LSQ150B ステージおよび Zaber のほとんどのリニアステージでは、ステージベースはアルミ材で、線熱膨張係数は約 22.2 x 10 -6 m / m°C です。 X-LSQ150B ベースの長さは 220 mm なので、5°C の温度上昇でベースの長さが長くなります。

$(22.2 \times 10^{-6})(0.220)(5) = 24\ \mu m$

この膨張により、スラストベアリングが基準位置からさらに移動し、キャリッジの測定位置が増加し、位置決めの再現性が 24 µm 低下します。この場合、測定位置の変化はキャリッジの位置には依存せず、ベースの長さと温度の変化にのみ依存します。ステージがゼロ調整されると、ベースの長さの変化はゼロになり、ステージの再現性は指定された 2.5 µm に戻ります。

再現性への複合効果

親ネジとステージベースは熱的に独立していると仮定しているので、2 つの熱膨張を単純に足し合わせることによって、組み合わせた位置ずれを決定できます。この組み合わせ効果は、以下の図 3 に概略的に示されています。この例では、親ネジの拡張により -12.8 µm（A）の位置ずれが発生し、ベースの拡張により + 24 µm（B）の位置ずれが発生しています。複合効果は、基準位置から 11.2 µm の位置ずれです（B-A）。

したがって、送りネジとステージベースの温度を 5° C 上昇させると、ステージの再現性が 11.2 µm 低下します。

熱源

熱膨張がリニアステージの再現性にどのように影響するかを説明して来たので、膨張の原因となる可能性がある熱源に注目しましょう。ここで考えている X-LSQ ステージでは、3 つの重要な熱源があります。モータ巻線のオーム損失。そして外部熱源。滑り軸受けステージを検討している場合は、キャリッジの滑り摩擦も同様に重要な熱源になるでしょう。

Zaber のリニアステージで使用されている送りネジは、ピッチによって 45～85%の効率があります。これは、スクリューに伝達された最大 55%の機械的エネルギーが熱に変換されることを意味します。発生する熱量は、送りネジの効率、ステージ上のスラスト荷重、および移動距離によって決まります。しかし、私たちが本当に関心を持っているのは熱発生率です。親ねじはその温度に比例した速度で熱を放散するので、熱発生速度によって、熱平衡が確立される前に親ねじがどれだけ熱くなるかが決まります。摩擦熱の発生率は、移動距離ではなくステージの平均速度に依存します。

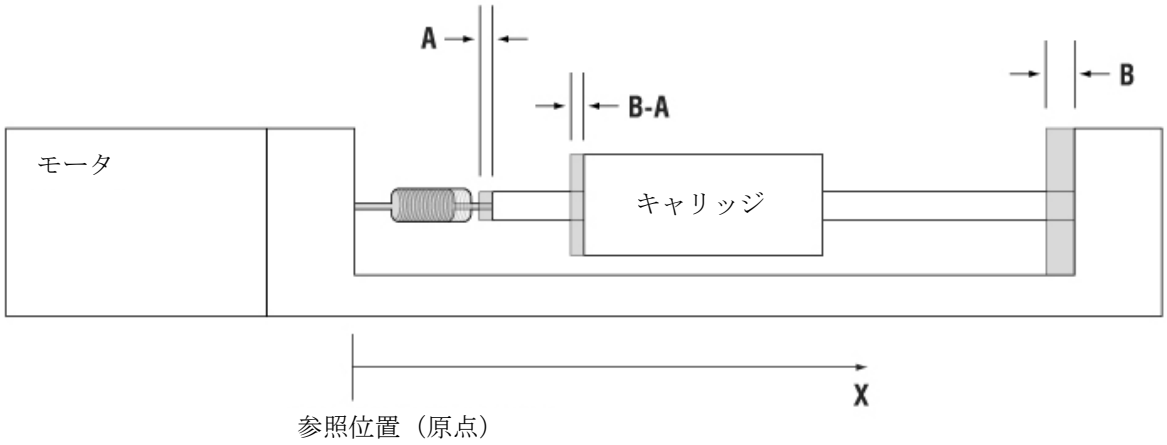


図 3：熱膨張によるキャリッジ位置の変化

モータ巻線は、ステージ自体の中のもう 1 つの主な熱源です。 電流が巻線を通過すると、熱は I^2R の割合で抵抗損失によって発生します。巻線を流れる電流の量は、モータコントローラのホールドおよびラン電流設定、デューティサイクル、負荷、およびステージが動作している速度によって決まります。 熱平衡を確立するために、モータは、それが発生しているのと同じ速度でこの熱を消散しなければなりません。 一部の熱は熱伝導にてステージベースを通って転送されますが、一部の熱は輻射と対流を介してモータから直接転送されます。 この熱がステージベースの膨張を引き起こし、位置決めの再現性を低下させます。

送りネジの摩擦とモータ巻線のオーミック損失に加えて、ステージの温度は建物の HVAC システムなどの周囲の熱源、近くの電動機器、および伝導経路、対流経路、または リニアステージへの放射経路を持つ熱源の影響を強く受けます。非常に多くの変数が関係しているので、これら 3 つの熱源が送りネジとリニアステージのベースで発生するであろう熱膨張を正確に予測することは非常に難しいでしょう。ただし、熱膨張の原因と影響を理解することで、それを制御して位置決めの再現性を向上させるための戦略をいくつか特定できます。

このホワイトペーパーの次のセクションでは、さまざまな熱条件下での Zaber の X-LSQ150B リニアステージの経験的な再現性測定について説明します。 これらの測定値は、熱膨張が再現性にどの程度影響を与え得るか、およびそれを制御するためのいくつかの戦略の有効性を示します。

PART II - 再現性の測定

実験セットアップ

再現性の測定は、図 4、5、および 6 に示す実験構成を使用して行いました。X-LSQ150B テストステージはアルミ製ブレッドボードに取り付けられ、モーターハウジングとステージベースの温度を監視するために熱電対が装備されています。キャリッジ位置は、Heidenhain MT 1271 測長器を使用し、分解能 0.05 µm で測定されます。

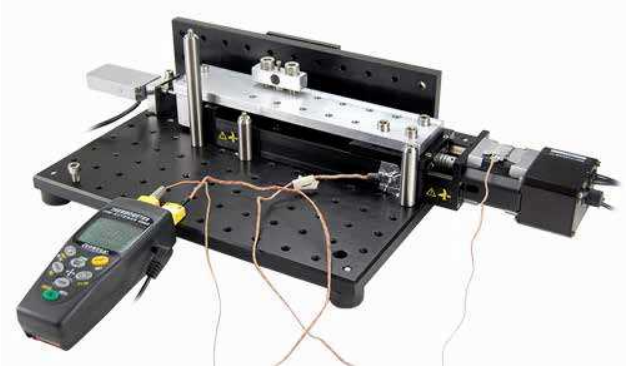


図 4：実験のセットアップ

図 5：ステージ上部のクローズアップ。

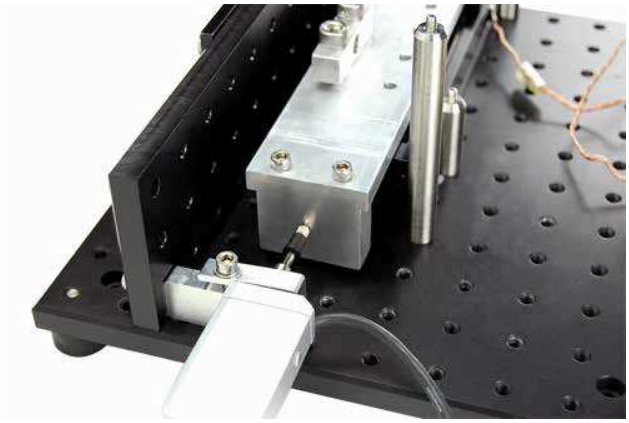


図 6：のクローズアップ

テスト手順

基本的なテスト手順は次のようにまとめることができます。

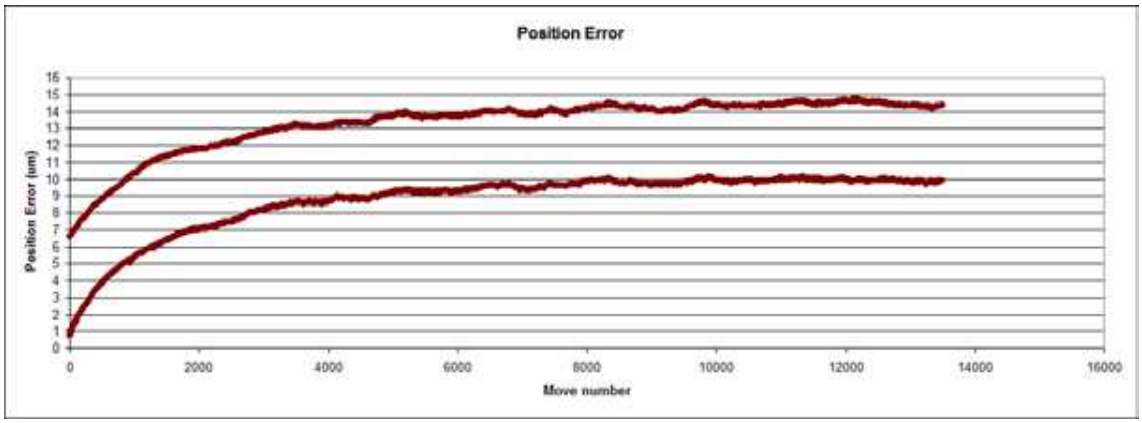
1.長さゲージのプローブに接触するまでステージキャリッジを前方に動かします。
2.ステージと測長器の両方の位置を 0 に設定します。
3.ステージを 10 mm の目標位置に移動します。
4.測長器の測定位置を記録します。
5.ステージを 0 の目標位置に戻します。*
6. 長さゲージの測定位置を記録します。
7. 測定された位置誤差が安定するまで、3 から 6 を繰り返します。

** 24mm / s の速度で実行される移動。*

結果

テスト 1-55%のデューティサイクル、開始時の周囲温度でのステージ

このテストは、熱膨張がチェックされていない場合、再現性に与える影響を示しています。 55%のデューティサイクルで2つのターゲット位置の間を移動すると、長さゲージで測定された実際の位置を確認できます。



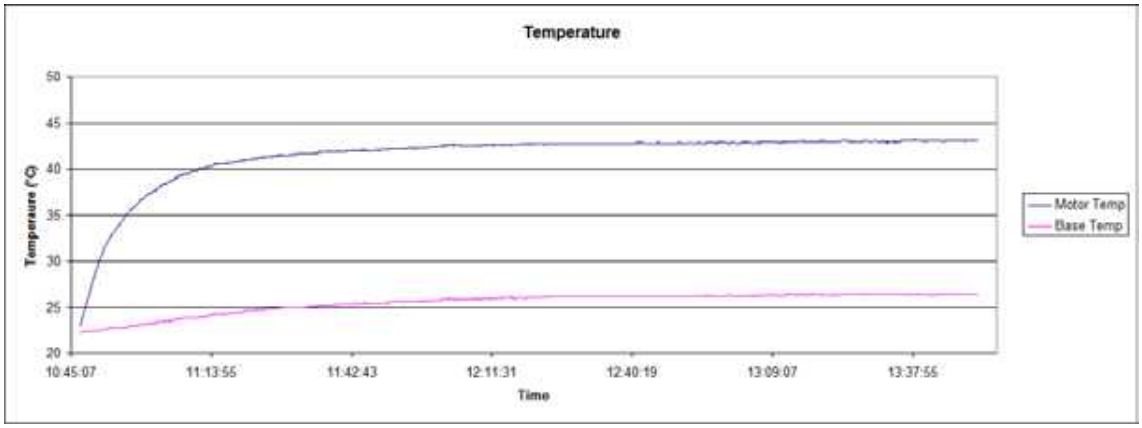


図 7：テスト 1 の位置エラーチャート。

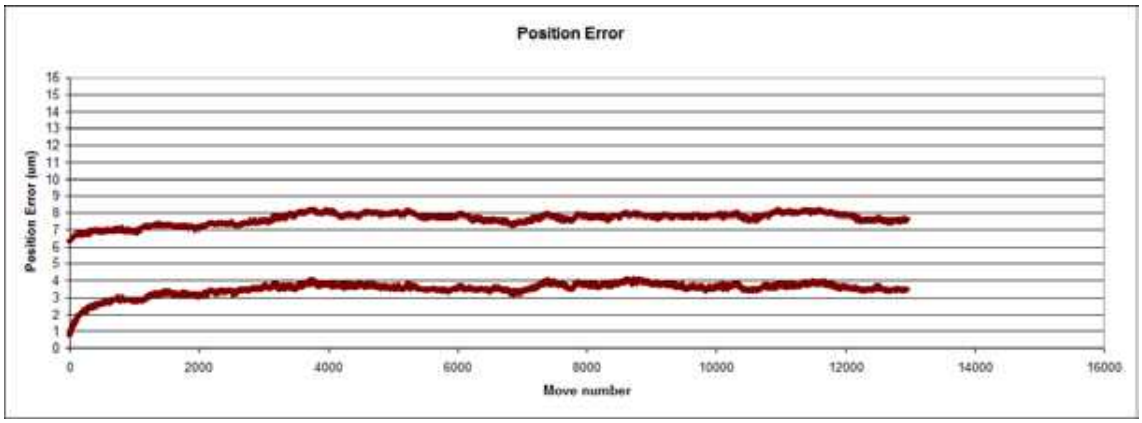
安定する前に、テストの最初の 90 分間で約 11 µm ドリフトします。図 7 の位置エラーチャートの下の曲線は 10mm のターゲット位置に対応し、上の曲線は 0mm のターゲットに対応します。 2 つの曲線の違いは、ステージ内のバックラッシュやその他のエラーの原因によるものです。

テスト 2-55 %のデューティサイクル、始動前にモータ電流を使用してステージを予熱

この試験を開始する前に、モータ保持電流を運転電流に等しい値に設定し、約 2 時間予熱したままにしました。 モータとベースの温度が安定したら、テスト 1 と同じ手順を実行しました。

今回は、図 8 の位置誤差チャートの上の曲線に示されているように、0mm のターゲットで測定された位置は約 2µm しか変化しませんでした。 10mm ターゲットでの測定位置は約 3µm 変化しました。

2 つの場所で位置のずれが異なる理由は、ステージベースがモータ電流によってかなり効果的に予熱されているのに対し、親ねじはそうではないためです。 テストが開始され、ステージが動き始めると、2 つのことが起こります。1 つは、リードナットからの摩擦によってリードスクリューが加熱され始め、リードスクリューが長くなり、有効ピッチが増加することです。 第二に、モータにかかる負荷が増えると、モータの消費電流とオーム損失によって発生する熱の割合が増加します。



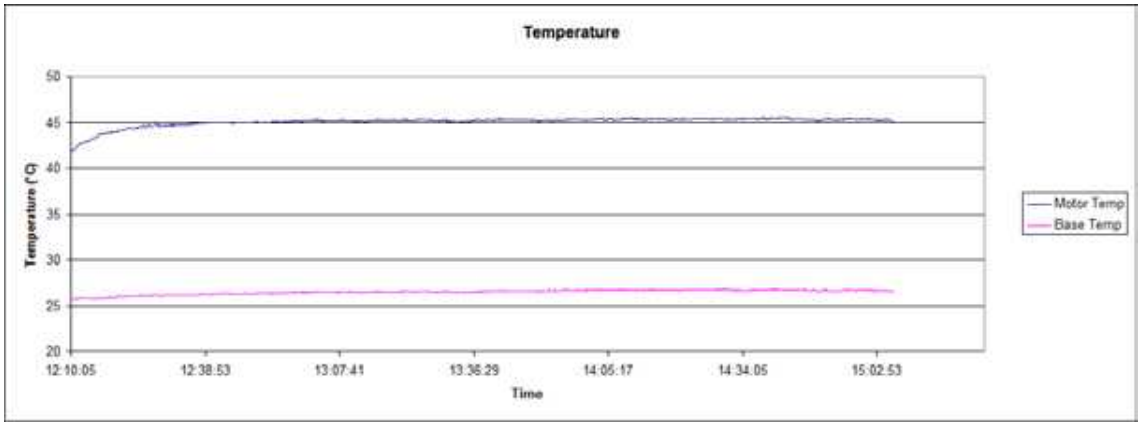


図 8 : テスト 2 の位置エラーチャート。

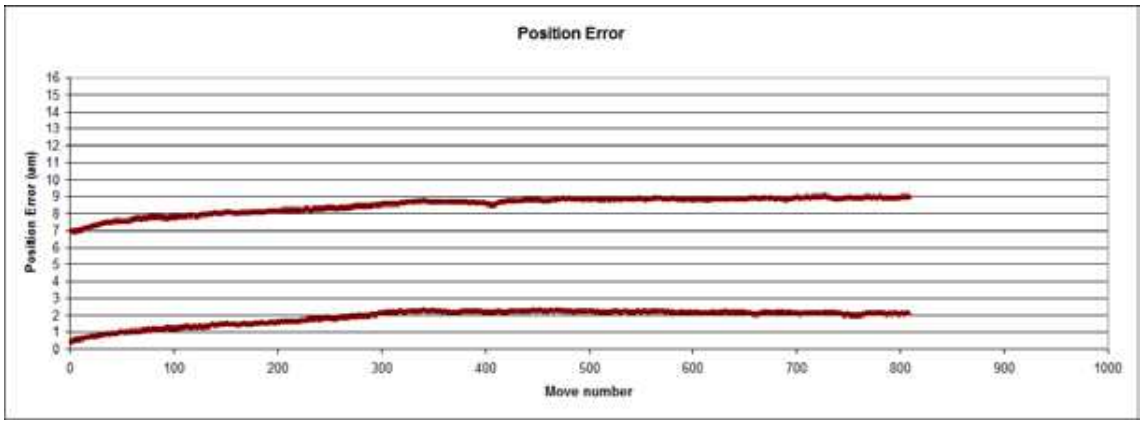
0 mm のターゲットでは、測定位置はステージベースと親ねじの膨張の両方の影響を受けます。これらはキャリッジ位置を反対方向にシフトします。位置誤差チャートに見られる正の正味位置変化により、正の位置シフトをもたらすベース拡張の方が大きいと推測できます。

10 mm のターゲットで測定された位置は、ベースと親ねじの長さの影響も受けますが、親ねじのピッチの増加の影響も受けます。この変化は正の位置シフトももたらすため、10 mm のターゲットでは、測定された位置の正味の変化が大きくなります。リニアゲージの基準位置として使用された 0mm のターゲットは、最初から親ねじのピッチの変更による影響を受けません。

0～10 mm の移動は、2 回目の移動（10～0 mm）で逆になり、最初の移動でピッチによって発生したエラーは、2 回目の移動でキャンセルされます。

テスト 3-4.5％のデューティサイクル、ホールド電流なし、開始時の周囲温度でのステージ

このテストでは、熱膨張を最小限に抑えるための別のアプローチを検討しました。この手順では、ステージを通常の動作温度に予熱する代わりに、動作温度を周囲温度にできるだけ近づけるために、動作中に発生する熱を減らすことに重点を置きました。



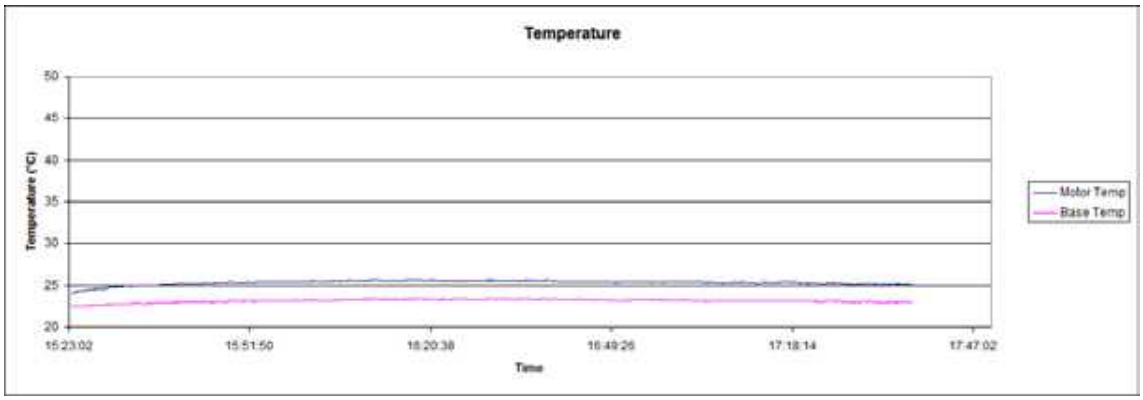


図 9：テスト 3 の位置エラーチャート。

これを達成するために、移動の間に一時停止を追加し、保持電流をオフにすることにより、テストのデューティサイクルを短縮しました。

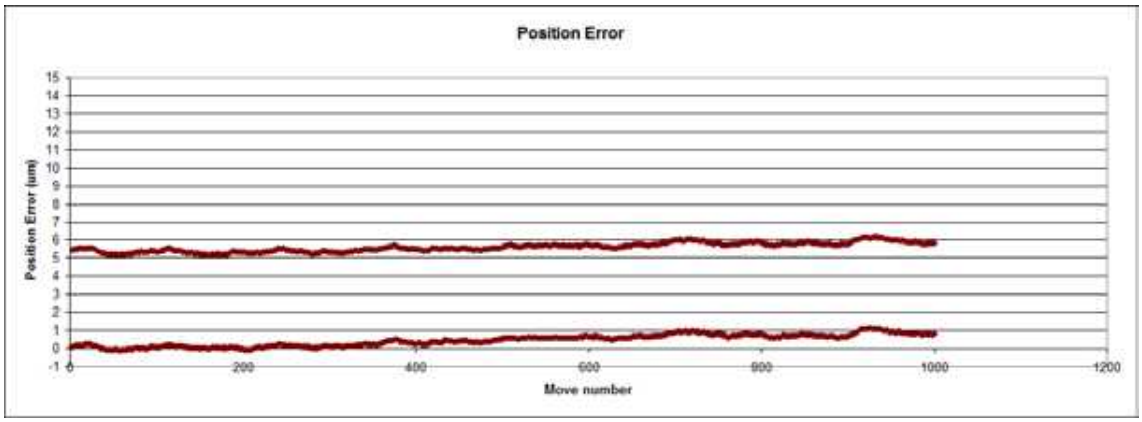
この戦略により、図 9 に示すように、両方のターゲット位置での測定位置の変化が約 2 µm に減少しました。両方のターゲットでの再現性が同じであるという事実は、親ねじの膨張とピッチの変化がわずかであることを示しています。

テスト 4-4.5％のデューティサイクル、始動前にモータ電流を使用してステージを予熱

この最終テストでは、テスト 2 と 3 の戦略を組み合わせました。まず、モータの温度を可能な限り一定に保ちました。

テスト 2 と同様に、これは、実行電流と保持電流を同じ値に設定し、テストの前にモータを予熱することによって達成されました。 次に、テスト 3 のように、デューティサイクルを減らすことにより、摩擦熱の発生率を最小限に抑えました。

図 10 は、このアプローチを使用して、両方のターゲット位置での測定位置の変化が約 1 µm に減少したことを示しています。



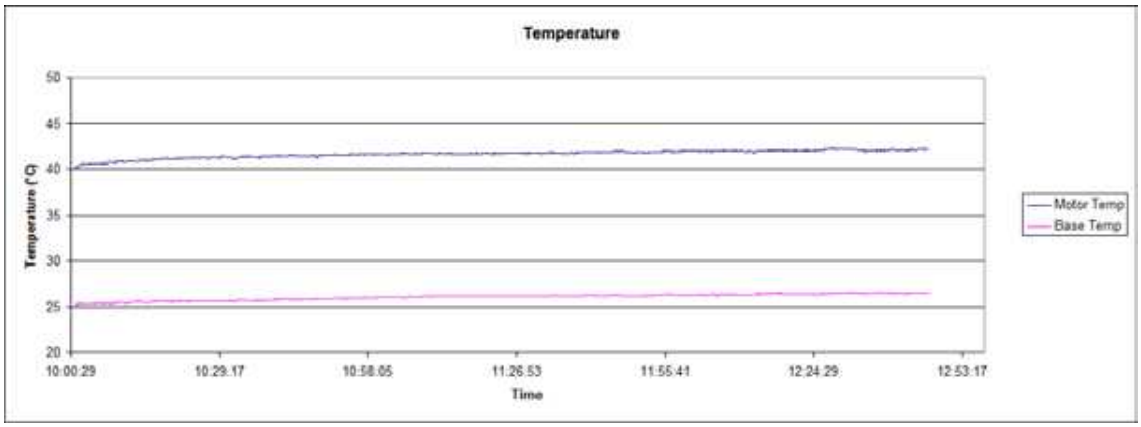


図 10：テスト 4 の位置エラーチャート

結論

この論文のパート I では、特定の線形ステージコンポーネントの熱膨張がどのように位置決めの再現性を大幅に低下させる可能性があるかについての理論について説明しました。
また、熱膨張を引き起こす可能性のある主な熱源についても説明しました。

パート II では、典型的な Zaber リニアステージである X-LSQ150B で実施された 4 つの再現性テストの結果を示しました。 最初のテストの結果は、同じ目標位置に複数のアプローチを行うと、測定位置がステージベースと親ねじがウォームアップして拡張するのと同じくらい 11 µm シフトする可能性があることを示しました。
すべて後続の 3 つのテストは、テスト中の熱膨張を最小限に抑えるための 3 つの異なる戦略の有効性を示しました。 3 つのテストすべてで、大幅な再現性の向上が示され、最も成功した戦略では 1 µm の再現性が実現しました。

3 つの戦略の共通の目標は、熱を確立することでした 実験開始前の平衡状態と、試験中の温度変化を最小限に抑えるため。 一定の周囲条件下では、位置決め装置の温度変化は、ステージ内の発熱率の変化のみに起因します。 したがって、3 つの戦略は、2 つの主要なものを制御することに焦点を当てています。
テスト段階内の熱源：親ねじの摩擦とモータのオーミック損失。 これは、モータ電流を可能な限り一定に保ち、ステージのデューティサイクルを減らすことによって達成されました。 ただし、テスト 1 では、これらの方法を使用しなくても、約 90 分後に測定位置が安定することがシンプルに示されました。

繰り返し可能な移動が必要になる前にステージを 2 時間実行することは、熱膨張を制御するための追加の戦略と見なすことができます。 ただし、この戦略は、ウォームアップフェーズと測定フェーズ全体で一定のデューティサイクルを維持することに依存しているため、すべてのアプリケーションに適しているわけではありません。

この論文では、特に親ねじ駆動のリニアステージでの熱膨張に焦点を当てましたが、説明した原理はすべてのタイプの位置決め装置に適用されます。 リニアアクチュエータ、ベルト駆動ステージ、回転ステージはすべて熱膨張の影響を受け、これらのデバイスの再現性は、動作中の発熱率の変化を最小限に抑えることで改善できます。

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

David Goosen は、Zaber Technologies Inc.の機械設計エンジニアです。Zaber は、ステッピング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、および光学やフォトニクス、産業オートメーション、生物医学、その他多くのアプリケーションに使用されるその他のモーションコントロール製品を設計および製造しています。 詳細については、www.zaber.com をご覧ください。

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.