

マイクロステップ

この章では、マイクロステップの動作およびマイクロステップによるシステム性能の向上について説明します。マイクロステップ性能を制限する重要な要素、およびその制限を打開する方法について説明します。ここでは、ステッピングモータの駆動やトルク発生 の原理は省略いたします。必要な場合は、「ステッピングモータの基本」「ドライブ回路の基本」をご参照ください。

マイクロステップとは

マイクロステップは、モータの固定子磁束を、フルステップやハーフステップよりも円滑に動かす方法です。これによって振動が減少し、0 Hz までノイズのないステップが可能になります。また、小さなステップ角度と優れた位置決めが可能になります。ステップ長がフルステップの $1/3$ から $1/32$ 、またはそれ以下のさまざまなモードがあります。理論的には、フルステップの分割数は整数でない数を使用できますが、実用的ではありません。ステッピングモータは、同期電動機的一种です。これは、回転子の安定停止位置が固定子磁束と同期しているということです。回転子はその磁束を回転させ、新しい安定停止位置に移動することによって回転します。モータが発生するトルク (T) は、ホールディングトルク (T_H)、および固定子磁束 (f_s) と回転子位置 (f_r) との間の距離の関数です。

$$T = T_H \cdot \sin(f_s - f_r)$$

ここで、 f_s と f_r は電気角で与えられます。電気角と機械角の関係は、次の式で与えられます。

$$f_{el} = (n/4) \cdot f_{mech}$$

ここで、 n は1回転当たりのフルステップ数です。ステッピングモータがフルステップやハーフステップで駆動される時、固定子磁束はそれぞれ、モータの各ステップで電気角 90° または 45° だけ回転します。上記の式から、モータによってパルストルクが発生することがわかります (図1(A)参照。この図は、トルクリップルによる速度リップルも示しています)。これは、 f_s の非連続な動きによって、 $f_s - f_r$ が時間に対して一定ではないためです。

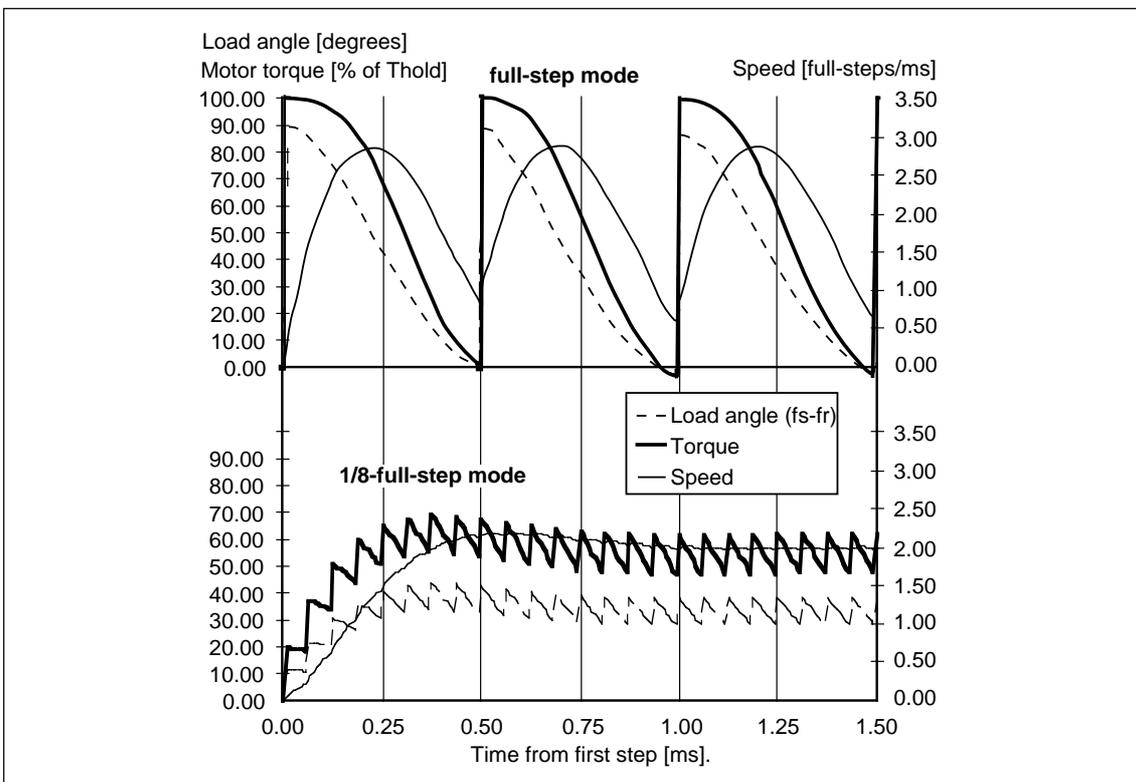


図1 (A) 負荷角度の関数としてのトルクと速度リップル、フルステップモード。(B) 負荷角度の関数としてのトルクと速度リップル、マイクロステップ1/8フルステップモード

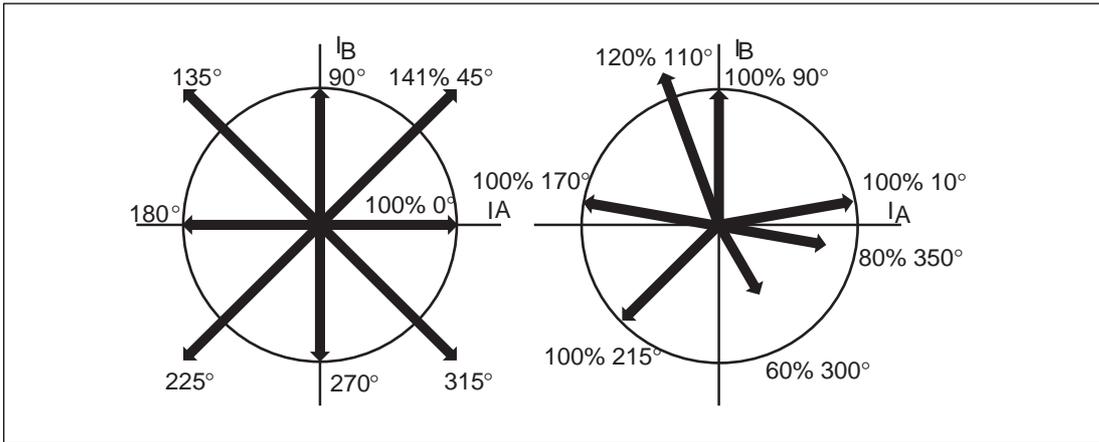


図2 (A) 通常のハーフステップおよびフルステップ停止位置の磁束方向。長さは保持トルクと比例します。(B) マイクロステップ磁束方向。方向と長さは可変です。

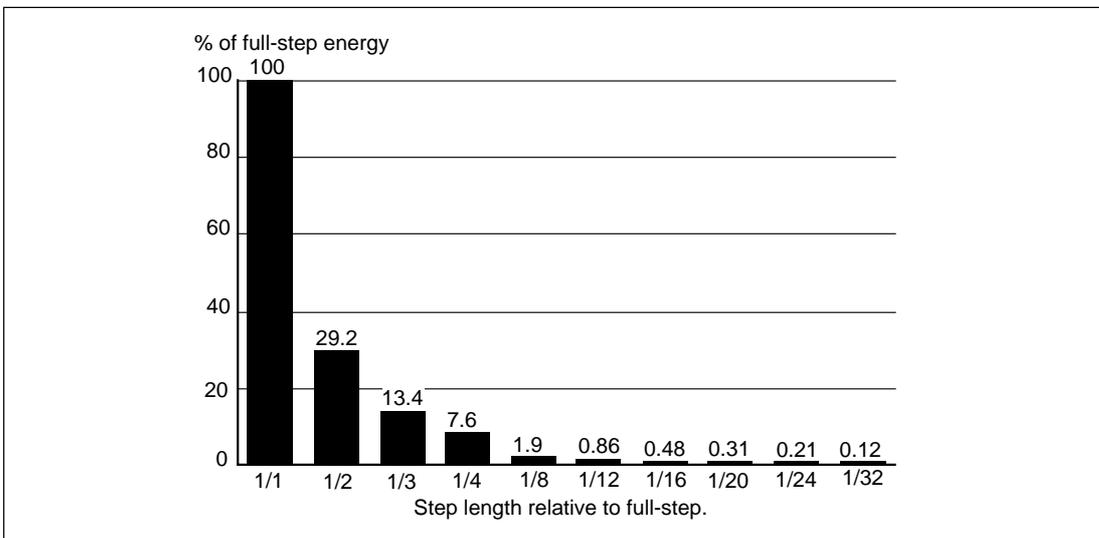


図3 電気ステップ長の関数としての相対的励起エネルギー

マイクロステップ

一度に90°または45°回転する固定子磁束を発生することは簡単です。必要な電流レベルは I_{on} および0の2つのみです。これはどのようなタイプのドライバを使用しても簡単です。固定子磁束の任意の方向に対して、その方向に対応する電流レベルは、次の式で表されます。

$$I_A = I_{peak} \cdot \sin(f s)$$

$$I_B = I_{peak} \cdot \cos(f s)$$

2つの巻線で I_{on} 値および0を組み合わせることで、8つの異なる巻線電流の組合せが得られます。これによって、磁束位置が電気角0°、45°、・・・315°に対応する、8つの通常の1相または2相励磁停止位置が得られます(図2(A)参照)。

モータに対して、0から141%の、2相励磁電流の電流レベルを発生できるドライバがある場合は、所定の電氣的な位置に停止できる回転磁束を生成することができます(図2(B)参照)。したがって、たとえばフルステップの1/4(電気角22.5°)、1/8、1/32(電気角2.8°)など、任意の電気角ステップを選択することも可能です。磁束の方向だけでなく、振幅も変化させることができます。トルク発生から、マイクロステップの効果として次のことがわかります。すなわち、回転子停止位置を安定に制御する固定子磁束が、フルステップおよびハーフステップモードよりも連続的に移動するため、回転子は特に低い周波数で円滑に動作します(図1(B)参照)。システムの固有振動数の2倍から3倍の周波数で、マイクロステップはフルステップと比較して回転子の動きに小さな影響しか与えません。この理由は、回転子と負荷慣性のフィルタ効果です。ステップングモータシステムは、ローパスフィルタとして働きます。

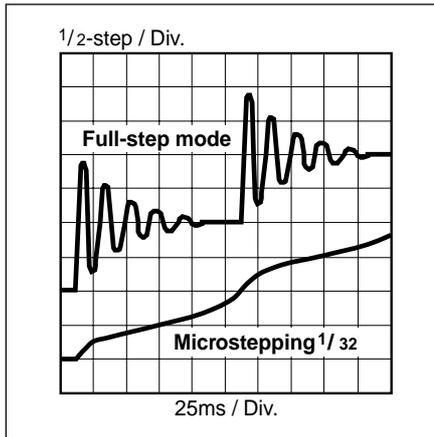


図4 ステッピングモードの関数としての回転子位置

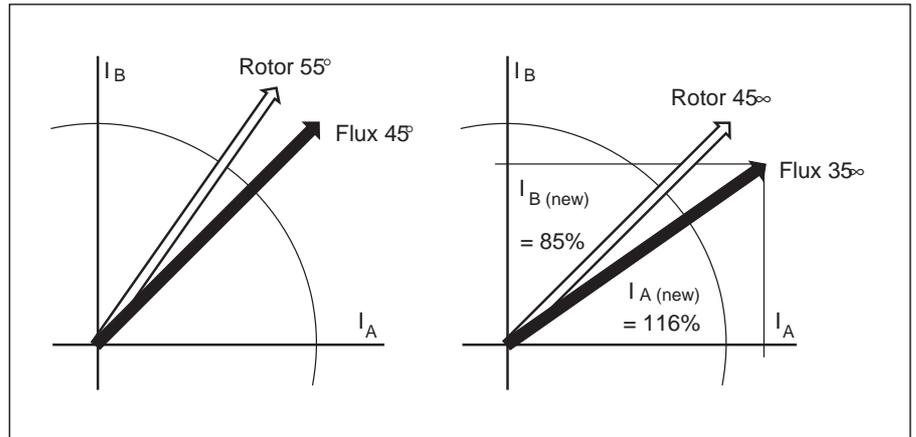


図5 (A)元のフルステップ位置での回転子および磁束方向。(B)調整されたフルステップ位置での回転子および磁束方向。

マイクロステップを使用する理由

多くの用途で、マイクロステップは、フルステップやハーフステップよりもシステム性能を向上させ、システムの複雑さやコストを緩和します。マイクロステップはノイズや共振問題を解決するため、またステップ精度と分解能を向上させるために使用できます。

共振周波数での動作

ステッピングモータシステムの固有振動数 F_0 (Hz) は、回転子および負荷慣性 $J_T = J_R + J_L$ (kg m²)、(選択された駆動モードと電流レベルにおける) ホールディングトルク T_H (Nm)、および回転当たりのフルステップ数 (n) によって決定されます。

$$F_0 = (n \cdot T_H / J_T)^{0.5} / 4$$

システムダンピングが低い場合、明白なリスクとして、モータが共振周波数付近で動作するときに、ミスステップしたりノイズが発生したりする可能性があります。モータのタイプ、総慣性、およびダンピングによって、この問題は F_0 の整数倍または整数分の一、すなわち $F_0 / 4$ 、 $F_0 / 3$ 、 $F_0 / 2$ 、 $2 \cdot F_0$ 、 $3 \cdot F_0$ 、 $4 \cdot F_0$ 、 \dots 、付近でも発生します。通常、 F_0 付近の周波数で最も問題が多く発生します。

マイクロステップでない駆動方法が使用される場合、共振の主な原因は、固定子磁束が一度に電気角 90° または 45° (フルステップおよびハーフステップ・モード) だけ非連続に移動するからです。これによって、パルスエネルギーが回転子に流れます。この振動によって共振が励起されます。1ステップ移動時、回転子に伝達するエネルギーは、最悪の場合(負荷摩擦なし)、次のようになります。

$$(\text{エネルギー}) = (4 T_H / n) \cdot (1 - \cos(fe))$$

T_H と n は上記のとおりです。 fe = ステップ電気角、フルステップで 90° 、ハーフステップで 45° です。これは、フルステップの代わりにハーフステップを使用すると、励起エネルギーがフルステップエネルギーの約 29% まで低減するということです。

マイクロステップを $1/32$ で使用すると、フルステップエネルギーの 0.1% のみが残ります(図 3 参照)。マイクロステップ技術を使用すると、この励起エネルギーは、すべての共振が完全に除去される低いレベルまで低減できることがわかります。

残念ながら、これは理想的なステッピングモータにのみ当てはまります。実際には、システム共振を励起するその他の原因が存在します。しかし、マイクロステップを使用することでほとんどすべての用途で動作が向上します。また、多くの場合、マイクロステップだけで、ノイズと振動を十分に低減させることができます。

ダイナミックレンジの低周波への拡大

低い周波数でステッピングモータをハーフステップやフルステップモードで動作させると動作は不連続になり、大きなリングングが現れてノイズと振動が発生します。このような現象が発生するステップ周波数は、システムの固有振動数より下です。マイクロステップによって、不要振動等のないステップ周波数領域をより低い方向に、簡単かつ安全に拡大できます。通常、 $1/32$ フルステップより小さなステップを使用する必要はありません。このような小さな電氣的ステップ角では、回転子/電気ステップに伝達するエネルギーは、フルステップ時の 0.1% です。また、このエネルギーは非常に小さいため、モータの持つ摩擦によって容易に吸収されます。したがって、ステップによってリングングやオーバーシュートは発生しません(図 4 参照)。マイクロステップ位置の直線からのずれは、マイクロステップの基準に、非補償の正弦/余弦グラフを使用しているためです。これに関しては後述します。

電子の「歯車装置」

小さな相対的動作または高いステップ分解能が必要な用途では、機械的な歯車装置の代わりにマイクロステップを使用できます。そのために大きなモータを使用しなければならないとしても、多くの場合、より良い単純な対策となり得ます。このタイプの用途で最高の結果を得るには、モータの選択、およびカスタム化された正弦/余弦グラフの開発を注意深く行うことを推奨します。

ステップ精度の向上

マイクロステップは、ステッピングモータ位置精度をモータメーカーのスペック以上に向上させるためにも使用できます。これを行う方法は次の通りです。まず、マイクロプロセッサベースのマイクロステップシステムを設計します。二相励磁停止位置、 $|I_a| = |I_b|$ でモータを使用します。これらは通常もっとも正確な回転子停止位置です。製造時に工場の較正プロセス（手動または自動）を使用して、使用するすべてのモータのすべての停止位置の修正値を記録します。修正値は、モータに調整されたフルステップ位置を出力するために使用されます（図5(A)参照）。位置の調整にともなって、元の停止位置での位置のずれを補償するために、巻線の電流レベルがわずかに変化します（図5(B)参照）。この方法は、最適なステップ精度がもっとも重要な設計目標であるときに使用できます。

この方法を使用する場合、システムでは、回転子を補償グラフと同期するために、回転子基準位置指示器（ホームポジションインジケータ）を使用する必要があります。

システムの複雑性

マイクロステップを発生するためのエレクトロニクスは、フルステッピングまたはハーフステッピングのためのエレクトロニクスより複雑ですが、モータ、歯車装置、および変速機を含むシステム全体の複雑性とコストは、多くの用途で緩和できます。マイクロステップは、ノイズや振動の減衰のための歯車装置との構造の代替となるか、あるいはそれらの装置を簡単にします。またモータの選択はより簡単かつ柔軟になります。マイクロプロセッサベースのマイクロステップアプリケーションでは、ソフトウェアとPWMコントローラ、またはマイクロプロセッサ内部のD/A変換器を使用し、外部マイクロステップコントローラの代わりとすることで、マイクロステップのハードウェアコストを最低限に抑えることができます。したがって、類似のモータサイズのフルステップおよびハーフステップシステムと同じレベルのハードウェアコストを実現できます。

マイクロステップ性能に影響する要因

理論的には、マイクロステップは非常に単純です。理論上、この方法はステッピングモータシステムのすべての共振、振動、およびノイズの問題を解決します。実際には、システム性能を抑制する多くの現象が発生します。これらの現象には、ドライバに関連するものとモータに関連するものがあります。NJU39610とNJM3771など高精度コントローラとドライバの組合せが使用される場合、ドライバ関連の性能とばらつきは、入手可能なモータの持つモータ関連の性能とばらつきに対してごくわずかです。

ステップ精度

ステップ精度は、通常モータメーカーが発行するデータシートに載っています。ステップ精度は絶対的（たとえば $\pm 1.0^\circ$ ）または相対的（フルステップ1回の $\pm 5\%$ など）に与えられます。通常ステップ精度は、フルステップ（二相励磁）の停止位置にのみ指定されます。（ここでは、二相励磁停止位置は、両方の巻線で同じ電流レベルになる位置を意味します。巻線で異なる電流レベルの位置、または電流レベルが0の位置は、マイクロステップ位置です。）このことは、モータメーカーがマイクロステップで使用される場合のモータの動作に関しては何も情報がないことになります。モータを高いフルステップ精度やホールディングトルクが得られるように最適化すると、普通マイクロステップ精度が低下します（後述）。次の例では、二相励磁のステップ精度の重要な影響の例を示します。7.5°PM型モータを1/32ステップで使用するマイクロステップ設計について考えてみましょう。理論上は、1つのマイクロステップは $7.5/32 = 0.23^\circ$ に対応します。このタイプのモータでは、 $\pm 1^\circ$ のステップ精度が一般的です。これは、モータの定位置が、適宜に選択された二相励磁位置（理論的に正しい定位置から $\pm 1^\circ$ 以内の任意の点）で較正される場合、他の二相励磁位置での回転子の最大のずれは、その理論的位置から $(1 - (-1)) / 0.23 = 8.5$ マイクロステップになることを意味します。絶対的位置決めが重要なアプリケーションでマイクロステップを使用する場合は、この事実を考慮する必要があります。この問題を解決する方法は、前出「ステップ精度の向上」の項ですでに説明しています。

正弦 / 余弦の一致性

実際のステッピングモータのほとんどは、理想的な正弦 / 余弦動作を行いません（理想的な正弦 / 余弦動作のステッピングモータならば、巻線に正弦 / 余弦電流が加えられると、完全な一定速度で回転します）。主にモータの機械的構造であるギャップ領域、ギャップ距離、および磁気ヒステリシスによって、磁束ベクトルの方向と振幅、すなわちマイクロステップによる停止位置とホールディングトルクは、理想的な正弦 / 余弦動作から逸脱します。この逸脱レベルは、回転子と固定子の歯の形状と、使用された材料の種類に依存します。

二相励磁停止位置で、高いホールディングトルクまたは高いステップ精度が得られるように最適化されているモータもあります。このモータでは、二相励磁位置で高い磁束が得られるような歯の形状を使用しています。このように最適化したモータは、正弦 / 余弦動作からの逸脱が大きいため、マイクロステップ用としては避ける必要があります。モータが正弦 / 余弦動作に近づくほど、マイクロステップでの性能が向上します。この逸脱は、磁束ベクトルの振幅（マイクロステップのホールディングトルクに影響）および磁束ベクトルの方向（マイクロステップの停止位置に影響）の2つに分けられます。

マイクロステップの位置リップル

ステッピングモータがマイクロステップで使用されるとき、マイクロステップの停止位置は正弦 / 余弦の一致性によって影響されます。理論上と実際の停止位置の差は、マイクロステップの位置リップルと呼ばれます。これは、2相励磁で1回転した場合と、モータ巻線に正弦 / 余弦電流波形が加えられたときの実際のマイクロステップ停止位置との、平均逸脱量として定義されます。（図6参照）。マイクロステップ位置リップルは、1回転全体での中心値です。これはマイクロステップ位置リップルが、通常の二相励磁ステップ精度の関数ではないことを意味します。総マイクロステップ精度を計算するには、二相励磁での精度にマイクロステップ位置リップルを加える必要があります。

マイクロステップ位置リップルの影響とは、モータが非補償の正弦 / 余弦グラフで駆動されるとき、回転子の運動はフルステップサイクルで速度変動を示すことです。すなわち、マイクロステップの長さが変動します。1 / 3 2のマイクロステップ長が使用される場合は、名目上の1 / 2から3倍のマイクロステップ長も珍しくありません（図7参照）。

これはマイクロステップのアプリケーションでシステムに共振を起こさせる、最も一般的な現象です。

マイクロステップのホールディングトルクリップル

ステッピングモータにマイクロステップが加えられるとき、磁束の大きさも理論値から逸脱します。これは、マイクロステップのホールディングトルクリップルに当てはまります。モータが正弦 / 余弦電流波形で駆動される場合、名目上のホールディングトルクは、理論上は磁束の方向から独立しています。理論的なホールディングトルクは、次の式で計算されます。

$$T_H = k \cdot (I_A^2 + I_B^2)^{0.5}$$

I_A と I_B が正弦 / 余弦ペアである場合は、 T_H は磁束の方向から独立しています。

マイクロステップのホールディングトルクリップルの大きさは、名目上の固定子および回転子の歯の形状の関数です。これは通常、名目上の2相励磁ホールディングトルクの10から30%の範囲に入ります。ほとんどのモータは、2相励磁位置で最大ホールディングトルクを得られるように最適化されています（図8参照）。マイクロステップのホールディングトルクリップルは、1回転をすべてフルステップで駆動した場合における平均値です。モータの寸法上の公差に依存する、2相励磁のホールディングトルクリップルと混同しないようにしてください。モータが異なる2相励磁位置で停止すると、ホールディングトルクは名目上のホールディングトルクより最大±10%異なります。これらの変動は、モータの回転子 / 固定子の形状の機械的公差によって発生するため、形状が適切なモータではゼロになります。

ヒステリシス

ステッピングモータの停止位置ヒステリシスは、主に磁気ヒステリシスによって影響されますが、回転子ペアリングの摩擦にも影響されます。最初にモータを時計回りに回転させ、次に反時計回りに回転させてマイクロステップ停止位置を測定する場合、ヒステリシスが明確に現れます（図6参照）。

ギャップ内の磁束は、理論上は巻線の巻数（ n ）と巻線電流（ I ）に比例します。

$$F_A = k_f \cdot n \cdot I$$

回転子の磁気材料によるヒステリシスと、固定子磁束経路によって、これは完全には当てはまらなくなりません。ヒステリシスが関連すると、磁束は、ある時点の巻線電流と磁束軌跡との関数になります（図9参照）。 H 値は巻線電流と正比例しますが、磁束を決定するには前の H 値（磁束軌跡）を知る必要があります。位置決め精度が重要なアプリケーションではオーバーショット動作を使用する必要がある場合がありますが、そのためにはヒステリシスを常に同じ側に保ち、追加の位置決め誤差が発生しないようにします。高分解能のマイクロステップでは、ヒステリシスは名目上のマイクロステップ長の数倍になることがあります。ステッピングモータシステムの総位置決め精度を計算するとき、モータのデータシートで与えられたステップ精度にヒステリシスが含まれているかどうか知ることが重要です。

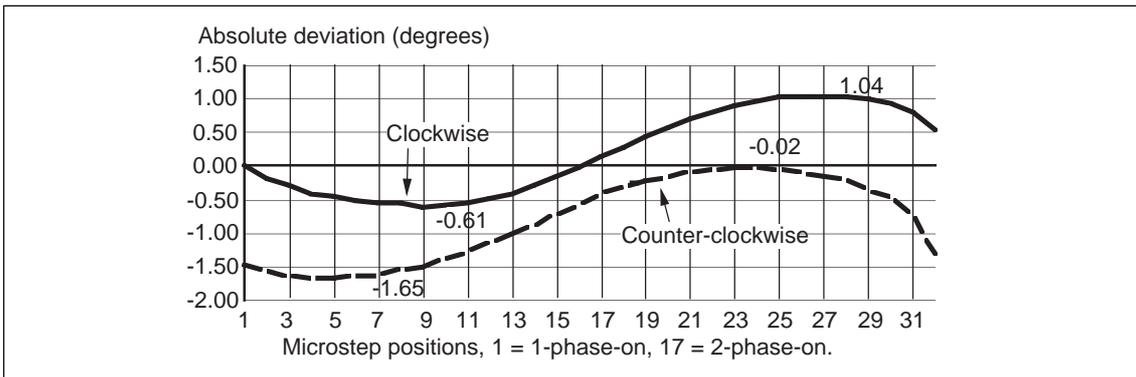


図6 57mm7.5度PMステッパのマイクロステッピング位置リップル
時計回りリップル = 1.04 - (-0.61) = 1.65度 = 22%

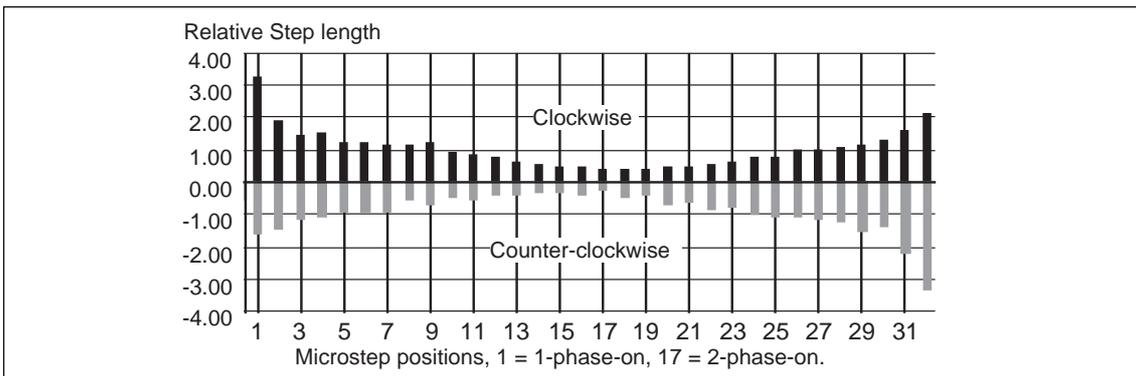


図7 57mm PMステッパの停止位置の関数としての相対的マイクロステップ長、1/32フルステップモード

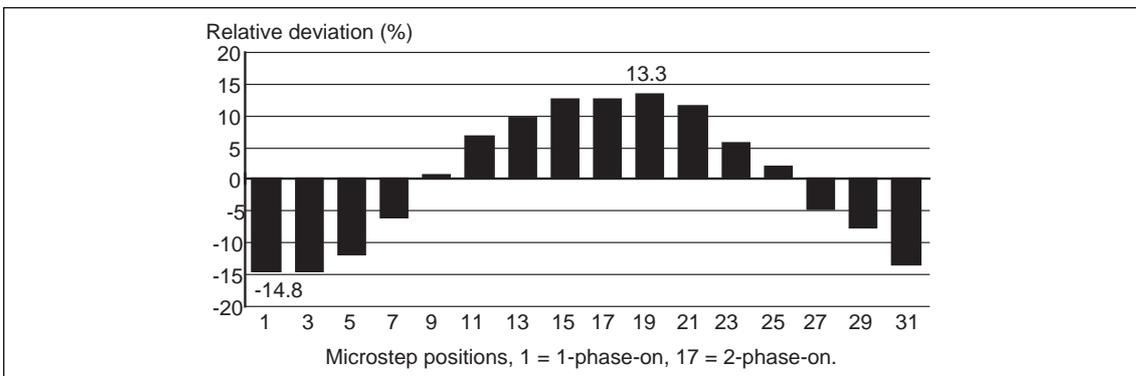


図8 57mm PMステッパのマイクロステッピング保持トルクリップル
リップル = 13.3 - (-14.8) = 28.1%

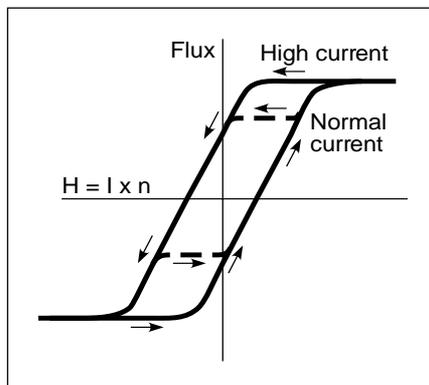


図9 巻線に2つの異なる電流レベルが加えられたときの、磁束履歴とH値の関数としての磁束

トルクリップル

ステッピングモータがフルステップやハーフステップモードで動作する場合は、モータによってパルストルクが発生します。このパルストルクは負荷摩擦トルクと同じ平均値をもちますが、平均値の20倍以上のピーク値になる場合もあります。これは、ステッピングモータシステムのノイズと共振の主要因です。この現象はトルクリップルとして知られています。理想的なステッピングモータでは、トルクリップルはホールディングトルク、ステッピング方法、および負荷角 (f_l) と関係があります。負荷角 (回転子の遅れ) は、固定子の磁束と回転子位置とのずれを、電気角で測定した値の中心値として定義されます。実際のアプリケーションでは、トルクリップルは使用されるモータおよびドライバの正弦/余弦一致性にも影響されます。ステッピングモータのノイズを低減するためにマイクロステップでドライブする場合、共振を起こす主要因を知ることが重要です。以下の式は、NJU39610とNJM3771などの高精度コントローラとドライバの組合せによって、モータの誤差に比べコントローラ/ドライバに関連する誤差が無視できるレベルまで低減することを示しています。

マイクロステップ長に関するトルクリップル

理想的なステッピングモータを理想的で連続な正弦/余弦電流波形で駆動すれば、トルクリップルはゼロになります。正弦/余弦マイクロステップを使用する場合は、トルクリップルはホールディングトルク (T_H)、マイクロステップ長 (f_e)、および平均負荷角度 (f_l) の関数になります。ここでは、一定の回転子速度を仮定しています。これは簡単なモデルでは優れた近似になります。マイクロステップ長に関連するトルクリップルは、次のように計算できます。

$$T_{Rfe} = T_H \cdot \left[\left(f_e \cdot \right) / 180 \right] \cdot \cos(f_l)$$

ここで、 f_e と f_l は電気角で与えられます。

正弦/余弦一致性に関するトルクリップル

実在のモータは理想的ではありません。上記のように、正弦/余弦動作からは2種類のずれが存在します。ここでは、ずれに関連するトルクリップルを計算します。近似のため、一定の回転子速度を想定します。

まず、マイクロステップ位置リップルがゼロと仮定して、モータを理想的な正弦/余弦電流曲線で駆動します (駆動モード関連のトルクリップルはなくなる)。マイクロステップホールディングトルクリップル (T_{mhtr}) に関連するトルクリップルは、次のようになります。

$$T_{Rmhtr} = T_{mhtr} \cdot \sin(f_l)$$

次に、マイクロステップのホールディングトルクリップルが0と仮定して、理想的な正弦/余弦電流波形を使用し、マイクロステップ位置リップル (f_{mpr}) と関連するトルクリップルを計算します。

$$T_{Rmpr} = T_H \cdot \left[\left(f_{mpr} \cdot \right) / 180 \right] \cos(f_l)$$

ここで、 f_{mpr} と f_l は電気角で与えられます。

モータ公差に関するトルクリップル

モータの2相励磁ステップ精度とホールディングトルクの変動も、トルクリップルを発生します。しかし通常、これらの誤差は周期的でなくランダムなのでこれらの影響は無視できますが、あるいはフルステップのサイクルのなかでは断続的でないこともあります。この場合、これらの誤差がシステムの共振を低レベルから盛り上げるリスクがあります。もし必要であれば、これらの誤差に関するトルクリップルは、モータに関連するマイクロステップ誤差と同様に計算できます。この誤差を最小にするには、内部形状公差の小さい高品質モータを使用します。

ドライバ関連のトルクリップル

理想的でないドライバを使用するため、ドライバもトルクリップルに影響します。この影響はモータの場合と同様に、マイクロステップの位置リップルとホールディングトルクリップルに分けられます。使用するモータとドライバのタイプによって、ドライバかモータのどちらかが優位になります。新日本無線の高精度マイクロステップコントローラとドライバを使用すれば、ドライバに関連する誤差は通常無視できます (ドライバのマイクロステップ位置とホールディングトルクリップルの誤差は両方とも1%未満です)。他のタイプのドライバや、高精度のマイクロステップ用モータが使用される場合、総システム誤差 (ドライバとモータ) を推定する最高の方法は、モータとドライバの組合せ全体でマイクロステップホールディングトルクリップルとマイクロステップ位置リップルを測定することです。ドライバに関連する誤差を無視できない場合は、モータに関連する誤差と同じ方法で計算できます。磁束ベクトル位置に関するものと、磁束の大きさに関するものがあります。

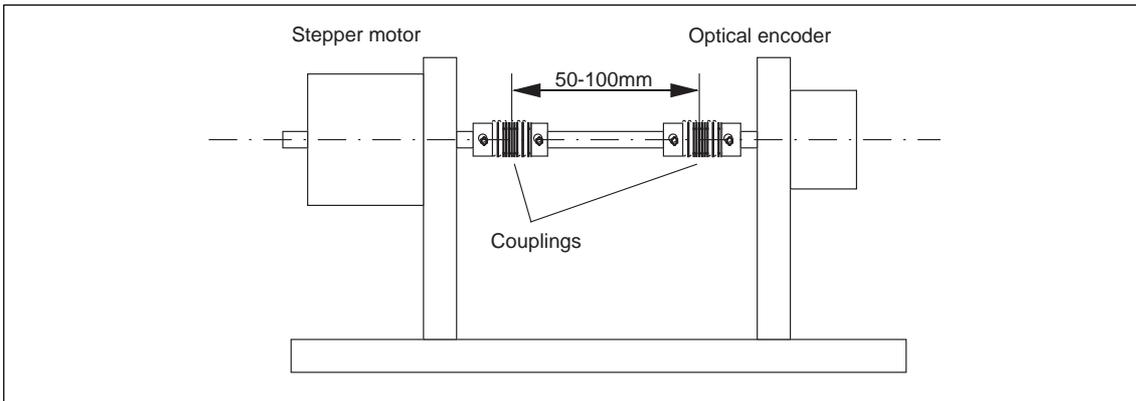


図10 マイクロステッピング位置リップルの測定用推奨セットアップ

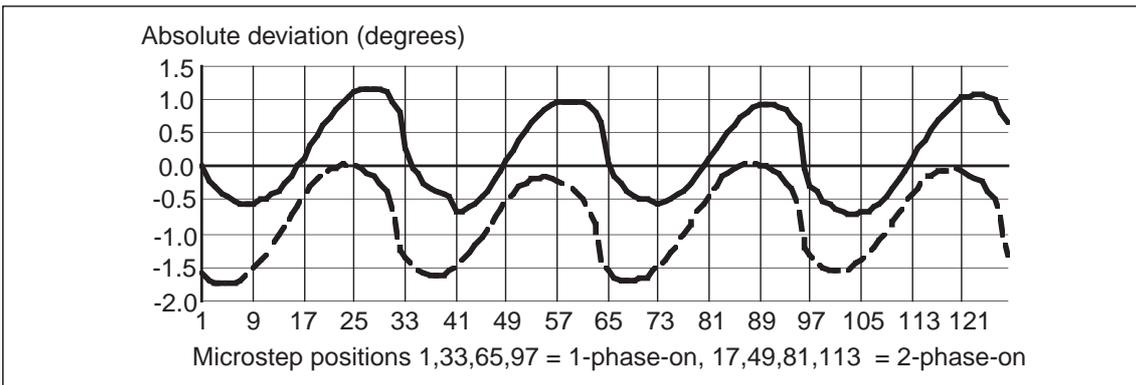


図11 57mm7.5度PMステッパの4フルステップ周期のマイクロステッピング位置リップル

さまざまなトルクリップル要因の比較

異なる要因から生成されたトルクリップルの大きさを比較できます。上記の式からわかるように、平均負荷角 (f_l) も考慮する必要があります。これは、システムの摩擦負荷の高低に依存することから、異なる誤差発生要因は違った量のトルクリップルを発生する、ということです。ここでは、3つのケースを調べてみます。最初は、負荷角 0° の場合です。このシステムは、多くの低摩擦負荷システムに良く近似します。次に、中程度の性能のシステムの標準値である、負荷角 12° (利用可能なトルクの 21%) の場合です。3番目に、最高の駆動条件下で実際に利用可能なトルクの最大値に近く、高性能モータドライブに使用できる、負荷角 49° (利用可能なトルクの 75%) の場合です。表1は、異なる条件下での異なる原因からのトルクリップル、および負荷角 6° と 30° で計算されたトルクリップルの比較を表しています。

マイクロステップ性能の測定

補償された正弦/余弦電流グラフをシステムティックに開発するには、マイクロステップ位置リップル、および必要ならマイクロステップホールディングトルクリップルを測定する必要があります。

マイクロステップ位置リップルの測定

停止位置リップルを測定するには、マイクロステップコントローラ/ドライバ (たとえば NJM3771) を使用します。最終用途と同じチョッピング電圧、電流レベル、電流減衰モード、および発振周波数が使用されていることを確認してください。高精度小型カップリングを使用して、高精度、低摩擦の光エンコーダをステッピングモータ軸に固定して、回転子停止位置を測定します。可能ならば、 $50 \sim 100 \text{ mm}$ の軸で分離された、直列の2つのカップリングを使用してください (図10参照)。

メカのセットアップは注意して行ってください。モータとエンコーダの軸のずれは測定精度に影響します。

表1 駆動条件と異なるトルク・リップル源の関数としての絶対トルク・リップル

条件	トルク・リップル[mNm]					
平均負荷角度 [度]	0	6	12	30	49	
摩擦トルク [% of T_{Hold}]	0	10	21	50	75	
駆動モード	マイクロステッピング長					
1/1-stepping	90.0	157	156	154	136	103
1/2-stepping	45.0	79	78	77	68	52
1/8-stepping	11.3	20	20	19	17	13
1/16-stepping	5.6	10	10	10	9	6
1/32-stepping	2.9	5	5	5	4	3
モータ・マイクロステッピング保持トルク・リップル						
5% (5mNm)	0.05	0	1	1	3	4
10% (10mNm)	0.10	0	1	2	5	8
20% (20mNm)	0.20	0	2	4	10	15
30% (30mNm)	0.30	0	3	6	15	23
40% (40mNm)	0.40	0	4	8	20	30
モータ・マイクロステッピング位置リップル						
5% (0.38 deg.)	0.05	8	8	8	7	5
10% (0.75 deg.)	0.10	16	16	15	14	10
20% (1.5 deg.)	0.20	31	31	31	27	21
30% (2.25 deg.)	0.30	47	47	46	41	31
40% (3.9 deg.)	0.40	63	62	61	54	41
ドライバ・マイクロステッピング保持トルク・リップル						
1% (1mNm)	0.01	0	0	0	1	1
2% (2mNm)	0.02	0	0	0	1	2
5% (5mNm)	0.05	0	1	1	3	4
10% (10mNm)	0.10	0	1	2	5	8
ドライバ・マイクロステッピング位置リップル						
1% (0.9 el. deg.)	0.01	2	2	2	1	1
2% (1.8 el. deg.)	0.02	3	3	3	3	2
5% (4.5 el. deg.)	0.05	8	8	8	7	5

これらの値は、100mNm保持トルクで、7.5度57mm PMモータ用に計算されています。代表値は太字で示されています。

まずモータを少なくとも1フルステップ分だけ時計回り(CW)にマイクロステップさせます。次の1相励磁停止位置まで時計回りの回転を続けます。回転子位置測定をリセットします。回転子を1マイクロステップだけ時計回りに動かします。新しい安定停止位置を記録します。固定子磁束が時計回りに4フルステップ位置(電気角360°)だけ移動するまでこれを続けます。次に、停止位置を記録せずに、磁束をもう1フルステップ距離だけ回転させます(これは、測定されていない位置で磁束ヒステリシスを蓄積させるためです)。方向を反時計回り(CCW)に変更して、最後に測定した磁束停止位置まで磁束をマイクロステップさせ、反時計回りでの停止位置を記録します。モータを反時計回りにマイクロステップし続けて、すべての反時計回り停止位置を記録します。

理論的停止位置から時計回りおよび反時計回りのずれを計算し、ずれをグラフにプロットします。グラフから、ヒステリシスおよび時計回りと反時計回りのマイクロステップ位置リップルは、マイクロステップ位置の磁束方向の関数として読み取れます(図11参照)。周期性に注目してください。ずれは、電気角90°ごとに繰り返されます。これは、正弦/余弦の90°対称性の結果です。4つの周期のずれの平均を計算して、より正確な測定結果を得ます。図6の曲線は、この方法で図11から計算されたものです。

このデータは、補償正弦/余弦グラフを計算する場合の入力になります。さらに正確なデータを得るには、4フルステップ周期の整数倍でずれを測定してください。最高の結果を得るには、1回転全体のフルステップサイクルで使用してください。

マイクロステップホールディングトルクリップルの測定

マイクロステップ停止位置の関数として、ホールディングトルクリップルを測定するには、マイクロステップ用ドライバとトルクウォッチ、トルクセンサーが必要です。ホールディングトルクを磁束方向の関数として測定してください(図12参照)。平均値を引き算することで、測定値からトルクリップルを計算します。図8は、この方法で図12から計算されたものです。マイクロステップ位置リップルは、フルステップ周期の関数です。最高の精度を得るには、できるだけ多くの周期を測定してください。3.6度のステップでは、同じ磁束方向に25の安定な停止位置があります。磁束の方向を変化させずに、これらすべてを測定することができます。すべての停止位置で、同じ機械的方向でホールディングトルクを測定してください。また、2、3の位置のみを測定する場合は、最高の測定精度を得るために、すべての磁束停止位置で同じ機械的停止位置を測定してください。

これらの測定の結果は、マイクロステップホールディングトルク補償正弦/余弦電流グラフの計算で入力データになります。

補償正弦/余弦グラフの設計

上記の説明から、任意の用途でマイクロステップ性能に影響するモータ固有のパラメータが数多く存在することがわかります。実際に何も対策を行わないと、モータは性能が抑制されてしまいます。理論的にはマイクロステップは正弦/余弦電流波形で行われますが、NJU39610は柔軟性があり、電流グラフを簡単に修正することができます。制御にマイクロプロセッサを追加することでも、ヒステリシスや時計回り/反時計回りでの非対称性をソフトウェアで処理できるようになります。正弦/余弦の一致性は、主に回転子/固定子の形状と、構造で使用される材料に依存します。ほとんどのモータでは、個体間のずれは、理論値からの平均のずれと比較して小さなものです。これによって、補償正弦/余弦電流グラフを設計することによって、特定の設計でのマイクロステップ性能を効果的に向上させることができます。

マイクロステップ位置リップルの補償

補償正弦/余弦グラフは、測定されたマイクロステップ位置リップルのグラフから計算されます。異なる磁束方向で測定されたずれを使用して、ずれが0の新しい磁束方向を補間します。これらの新しい磁束方向を使用して、補償正弦/余弦グラフを作成します。ここで、補償正弦/余弦電流グラフでモータを駆動してマイクロステップ位置リップルを測定します。必要ならば、電流グラフにさらに修正を行います。許容可能な結果が得られるまで測定を繰り返します。図13は、モータに補償正弦/余弦電流を加えた後の、図11と6で測定したモータのマイクロステップ位置リップルを示しています。図14では、フルステップ周期平均値がプロットされています。補償された曲線は、「初期値」です。より優れた結果を得るには、この条件で測定し直した新しいデータを入力して、この手順を繰り返してください。

アプリケーションで双方向回転が必要な場合は、時計回りおよび反時計回り方向で別々の補償グラフを計算します。特定の用途では、時計回りと反時計回りの平均ずれ曲線を使用できることがあります。しかしモータのヒステリシスレベルによっては、補償は多少不正確になります。

上記の方法では、回転子速度が低い場合に最高の結果が得られます。速度が増大するとモータの磁束軌跡は回転子のEMFに影響されるため、測定された停止位置は正しくなくなります。これらの場合は、非補償正弦/余弦グラフと位置リップル補償グラフを実験的に確認して、最良のポイントを探します。

ホールディングトルクリップルの補償

通常、モータのホールディングトルクと比較して摩擦負荷トルクが低い用途では、マイクロステップホールディングトルクリップルの補償は必要ありません(表1参照)。共振の主な原因は、マイクロステップ位置リップルです。ホールディングトルクの補償が必要な場合、単独で、あるいは停止位置補償を共に適用することができます。

新しい電流レベルを計算するため、測定されたマイクロステップ依存のホールディングトルクを使用します。

$$I_{new} = I_{old} \cdot (T_{Hnom}) / (T_{Hmeasured})$$

これは、両方の巻線電流に当てはまります。

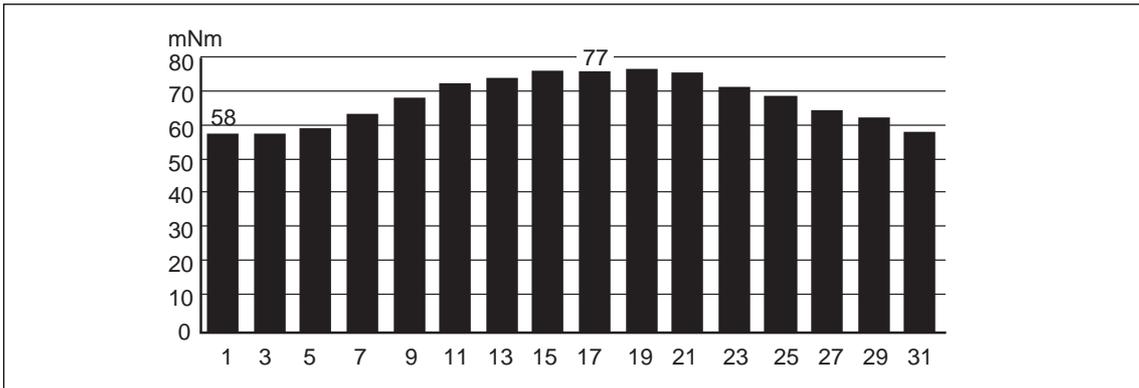


図12 57mm PMステッパのマイクロステッピング保持トルク

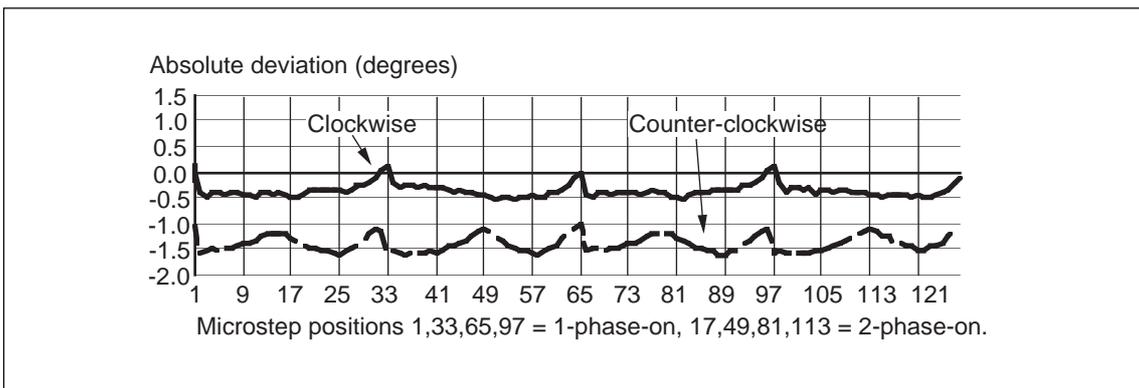


図13 57mm7.5度PMステッパの4フルステップ周期の正弦/余弦時計回り補償マイクロステッピング位置リップル

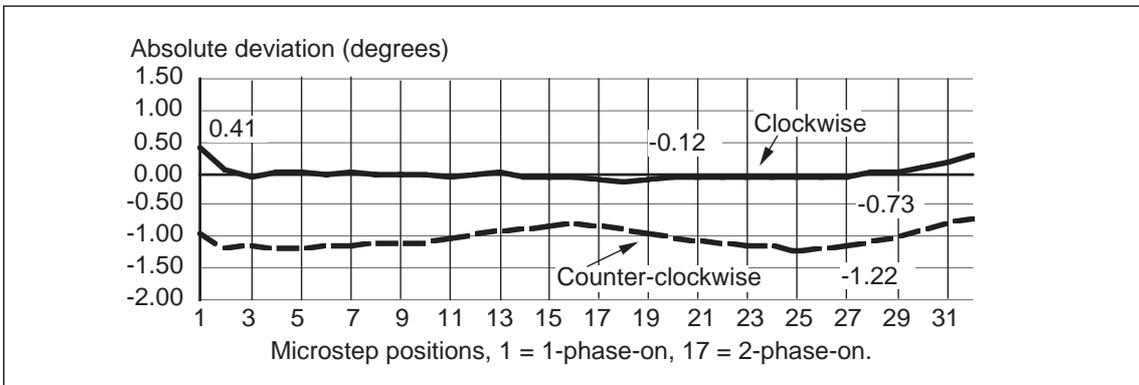


図14 57mm7.5度PMステッパの正弦/余弦補償マイクロステッピング位置リップル。時計回りリップル = $0.41 - 0.12 = 0.53$ 度 = 7%、非補償の場合は22%