

Application Note

最高のシステム角度センシング精度を実現



概要

高精度の角度フィードバックを必要とするモーター制御システムは、多くのアプリケーションで使用されています。たとえば、自律型移動ロボット（掃除機、芝刈り機、倉庫内での搬送など）では、機械を目的の場所に適切に誘導するため、正確なフィードバックが必要となります。さらに、6軸のロボット・アームや協働ロボット（コボット）の製造では、スループットを向上して最高の品質を得るため、精密に制御して正確な組み立てを実現する必要があります。すべてのシステムにおいて、機械的アライメントの許容誤差とシグナル・チェーンの要因が、磁気センサで測定される角度誤差に寄与します。このレポートでは、磁石の選択、センサの配置、電氣的誤差と機械的誤差の発生源が測定にどのような影響を及ぼすかについて説明します。最後に、角度誤差のキャリブレーション・プロセスを紹介し、あらゆるシステムで最適な角度精度を実現する方法を示します。

目次

1 はじめに.....	3
2 磁石の選択.....	4
2.1 配置に関する考慮事項.....	4
2.2 磁石の特性.....	5
3 測定の非線形性.....	8
4 機械的誤差の発生源.....	11
5 シグナル・チェーン誤差.....	18
6 キャリブレーション手法.....	21
7 改訂履歴.....	23

図の一覧

図 1-1. 理想的な正弦 / 余弦 / アークタンジェント入力.....	3
図 2-1. センサの配置オプション.....	4
図 2-2. 径方向磁化磁石の磁界プロファイル.....	4
図 2-3. B-H 曲線の例.....	5
図 2-4. 磁石とセンサのエアギャップ範囲.....	5
図 2-5. さまざまな磁性材料におけるピーク磁界とエアギャップ距離との関係.....	6
図 2-6. 磁石の異なる半径におけるピーク磁界強度とエアギャップ距離との関係.....	6
図 3-1. 振幅の不一致による非線形性.....	8
図 3-2. オフセットによる非線形性.....	9
図 3-3. 位相誤差による非線形性.....	9
図 3-4. 入力の歪みによる非線形性.....	10
図 4-1. 磁石が傾いている軸上アライメント.....	11
図 4-2. 軸上: 磁石が傾いている場合の磁界入力.....	12
図 4-3. 軸上: 磁石が傾いている場合の角度誤差.....	12
図 4-4. 軸外: 磁石が傾いている場合の磁界入力.....	12
図 4-5. 軸外: 磁石が傾いている場合の角度誤差.....	12
図 4-6. 面内: 磁石が傾いている場合の磁界入力.....	12
図 4-7. 面内: 磁石が傾いている場合の角度誤差.....	12
図 4-8. 偏心のある軸上アライメント.....	13
図 4-9. 軸上: 偏心がある場合の磁界入力.....	13
図 4-10. 軸上: 偏心がある場合の角度誤差.....	13
図 4-11. 軸外: 偏心がある場合の磁界入力.....	13
図 4-12. 軸外: 偏心がある場合の角度誤差.....	13
図 4-13. 面内: 偏心がある場合の磁界入力.....	14

図 4-14. 面内:偏心がある場合の角度誤差.....	14
図 4-15. センサが傾いている軸上アライメント.....	14
図 4-16. 軸上:センサが傾いている場合の磁界入力.....	15
図 4-17. 軸上:センサが傾いている場合の角度誤差.....	15
図 4-18. 軸外:センサが傾いている場合の磁界入力.....	15
図 4-19. 軸外:センサが傾いている場合の角度誤差.....	15
図 4-20. 面内:センサが傾いている場合の磁界入力.....	15
図 4-21. 面内:センサが傾いている場合の角度誤差.....	15
図 4-22. 位置オフセットがある軸上アライメント.....	16
図 4-23. 軸上:位置オフセットがある場合の磁界入力.....	16
図 4-24. 軸上:位置オフセットがある場合の角度誤差.....	16
図 4-25. 軸外:位置オフセットがある場合の磁界入力.....	16
図 4-26. 軸外:位置オフセットがある場合の角度誤差.....	16
図 4-27. 面内:位置オフセットがある場合の磁界入力.....	17
図 4-28. 面内:位置オフセットがある場合の角度誤差.....	17
図 5-1. 入力換算ノイズによる角度誤差.....	18
図 5-2. 8 ビットの量子化誤差.....	19
図 5-3. 12 ビットの量子化誤差.....	19
図 5-4. TMAG5170 角度位相誤差と回転速度との関係.....	20
図 6-1. 軸上角度誤差と機械的誤差の組み合わせ.....	21
図 6-2. 8 点の線形化.....	21
図 6-3. 16 点の線形化.....	21
図 6-4. 32 点の線形化.....	22
図 6-5. 高調波近似を使用した線形化.....	22

表の一覧

表 2-1. 磁性材料の温度応答.....	7
-----------------------	---

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

磁気を検出するアプリケーションで最高精度の角度測定を実現するには、可能な誤差発生源をすべて考慮する必要があります。これらのさまざまな発生源には、システムの機械的な欠陥によるものや、センシング・デバイスのシグナル・チェーンに関連するものがあります。これらの要因を考慮して適切な設計手順を実行することにより、最高の精度を実現できます。

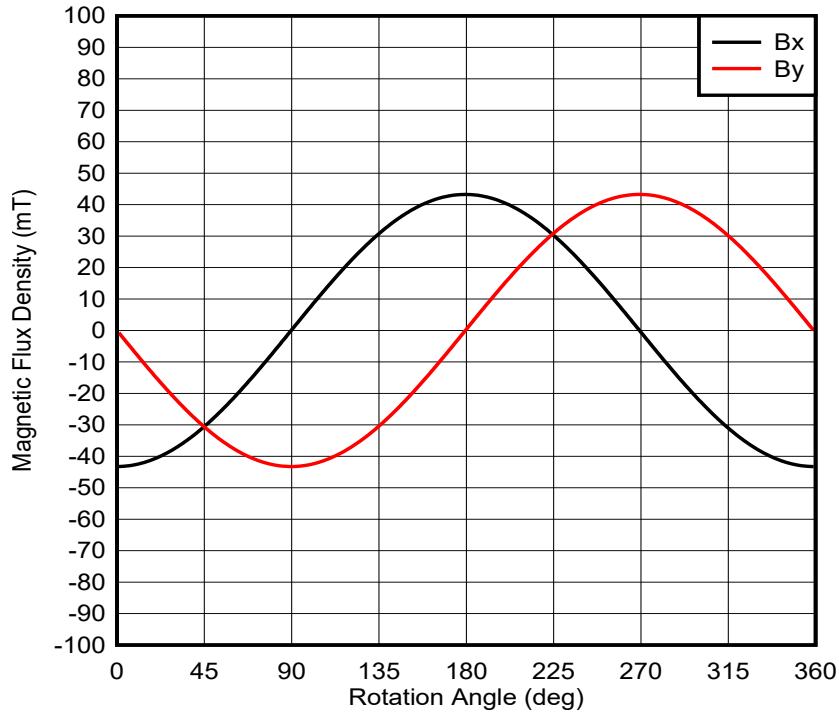


図 1-1. 理想的な正弦 / 余弦 / アークタンジェント入力

角度は通常、位相差が 90 度の正弦波入力を使用して測定します。この正弦 / 余弦の関係により、アークタンジェントを使用して最終的な誤差を計算できます。これは、回転する磁石の周囲に 2 つの 1 次元センサを 90 度の間隔で配置するか、2 次元または 3 次元センサを磁界が十分に強い位置に配置することで実現できます。磁界ベクトルの個別の成分には 90 度の位相差があるので、これらのセンサは角度検出用になります。

2 磁石の選択

磁気入力 (ホール効果、AMR、GMR、TMR) を使用した角度測定を設計する際に最初に重要となるのは、入力源として使用する磁石です。センサの方向感度によっては、センサを正常に動作させるために、十分な磁場入力が存在することを確認することが重要です。

TMAG5170、**TMAG5173-Q1**、**TMAG5273**、または **TMAG5170D-Q1** をご検討ください。これらのデバイスは、リニア 3 次元 (3D) ホール効果センサです。**TMAG5170** と **TMAG5170D-Q1** は SPI を使用し、**TMAG5273** と **TMAG5173-Q1** は I2C を使用して通信します。どちらのセンサも 3 軸すべてで感度が高いため、フレキシブルに配置できます。

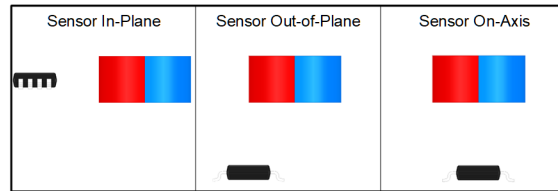


図 2-1. センサの配置オプション

2.1 配置に関する考慮事項

図 2-2 に示す位置には、いくつかの重要な考慮事項があります。軸上の配置は、単一磁気センサを使用する角度センシングに最適です。この配置では、磁界は磁石の表面と平行になり、センサの XY 平面上に存在します。この配置を実現するため、径方向磁化磁石を回転軸を中心に配置し、センサを磁石の回転軸と正確に揃えます。この配置では、非円形プロファイルの磁石を使用している場合でも、この関係は同じです。

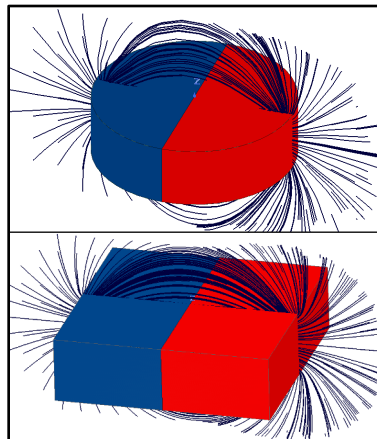


図 2-2. 径方向磁化磁石の磁界プロファイル

この位置では角型磁石も使用できますが、入力磁界が正弦波ではないため推奨しません。角型磁石を使用すると、最終製品の組み立て時に位置合わせが容易になります。いずれの磁石プロファイルでも、軸上アライメントの主な利点は、機械的誤差が最終的な角度測定に及ぼす影響が小さくなる傾向があることです。セクション 4 に、上述の内容を示します。

図 2-1 に示すもう 1 つのオプションは、面内アライメントです。これは非常にコンパクトなアライメント・オプションですが、入力が大きく不一致なものになります。結果として生じる振幅の不一致により、角度計算が非線形になります。**TMAG5170** と **TMAG5273** は、この影響を最小限に抑えるために振幅補正機能を備えています。このアライメントでは、ダイポール・リング磁石を回転軸上のどこにでも取り付けることができるので、シャフトの端部をシステムの他の部分で使用できます。面内アライメントを使用すると、モーター・サイズの増加を最小限に抑えて、角度測定を BLDC モーターに簡単に統合できます。

最後の配置オプションは軸外で、これは他の場所すべてを表します。面内および軸外のアライメント以外に、3 つの直交座標方向すべてに 1 つの成分を持つ測定可能な磁界を生成する位置は多数あります。各成分の振幅は位置によって異なりますが、正弦波であることは変わらず、お互いに 90 度の位相差があります。バランスの取れた均等な入力を生成する配置もありますが、角度計算に使用する 2 つの軸の間で振幅の不一致が発生することを予測しておく必要があります。

2.2 磁石の特性

軸上での測定に径方向磁化の円柱型磁石を使用するか、軸外または面内での測定にリング磁石を使用するかを選択する以外に、その他のさまざまな磁石の特性が測定対象の磁界に影響を及ぼします。

材料グレード

磁石の材料グレードは、その磁石の B - H 関係に直接影響を及ぼします。外部から印加した H 磁界と、その結果磁石に発生する磁束密度 B との関係を理解しておくが便利です。

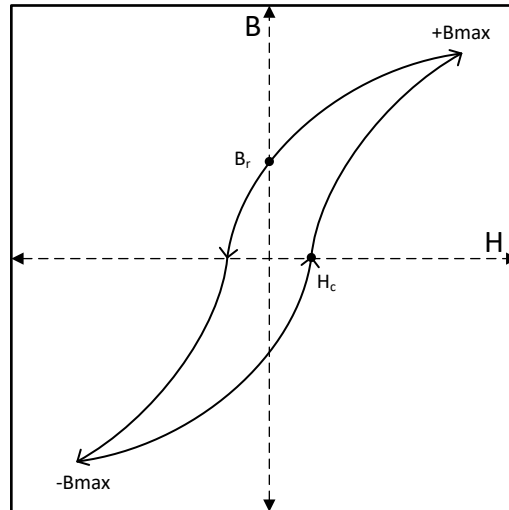


図 2-3. B - H 曲線の例

永久磁石を磁化するために使用される磁界 H の印加を取り除いたときに残留する磁束密度 B の値は、「残留磁気」(B_r) と呼ばれます。この値は閉磁気回路で測定され、磁石の表面磁界とは異なります。表面磁界は磁力計を使用して開磁気回路で測定され、磁石の形状によって異なります。 B_r は同じグレードであれば磁石のサイズにかかわらず一定ですが、磁石によって生成される表面磁界は、その磁石の表面積と極長の関係に依存します。

どの磁性材料でもグレードによって B_r 値は異なり、それによってその磁石の磁界強度が決定されます。図 2-5 に、さまざまなグレードと材料の同じ寸法の磁石における磁束密度 B と距離との関係を示します。磁石の分極軸上にセンサを配置すると、回転中に測定されるピーク磁束密度 B の値を求めるために範囲を調整できます。この場合、およびこれ以降のすべてのグラフでは、直径 6mm、3mm 厚の磁石が使用されています。

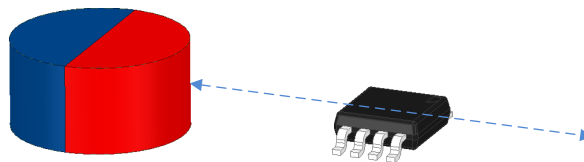


図 2-4. 磁石とセンサのエアギャップ範囲

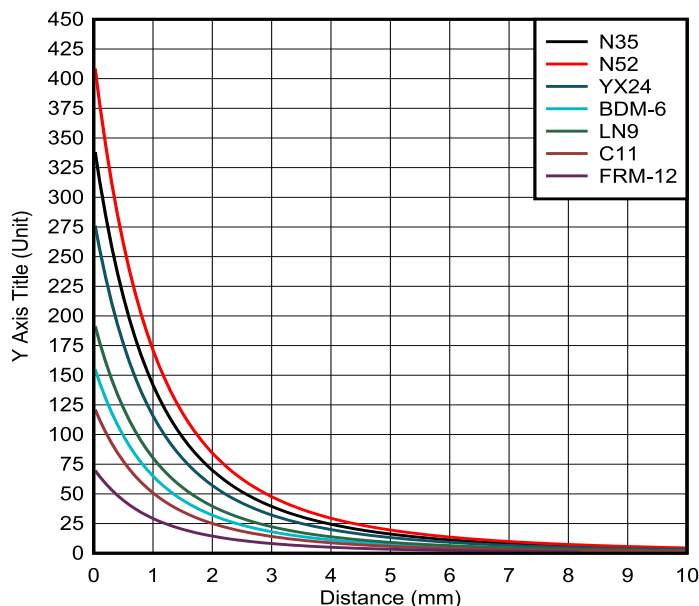


図 2-5. さまざまな磁性材料におけるピーク磁界とエアギャップ距離との関係

サイズ

「材料グレード」で説明したように、磁石のサイズは表面の磁束密度に影響し、それが測定される磁石の磁界にも影響を及ぼします。図 2-6 に、高さと半径が等しいさまざまな N52 グレードのネオジム磁石における磁束密度 B と距離との関係を示します。

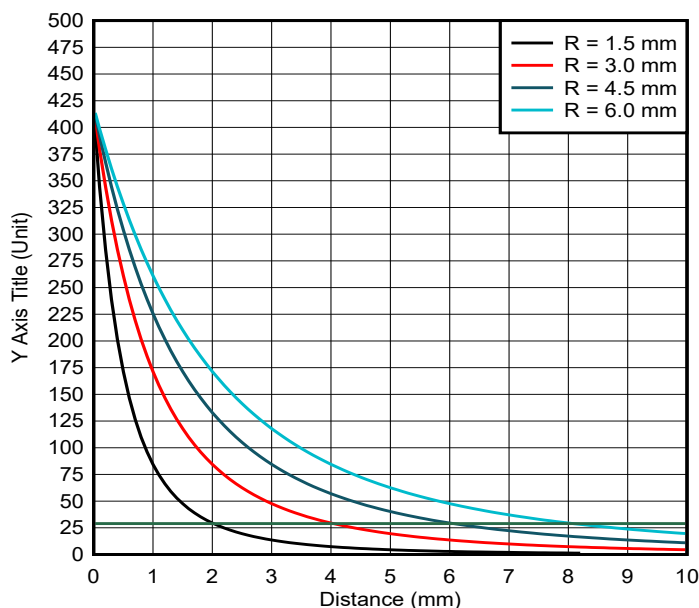


図 2-6. 磁石の異なる半径におけるピーク磁界強度とエアギャップ距離との関係

各磁石の表面磁界は同じであり、任意のエアギャップ距離において、磁石の半径が長いほど測定される磁界は大きくなります。また、任意の距離で測定される磁界と磁石の半径との比は、一定に保たれることにも注意してください。つまり、半径 1.5mm の磁石を使用して 2mm で観測される磁界は、半径 6mm の磁石を使用した 8mm での磁界と同じです。

温度ドリフト

使用可能なさまざまな磁性材料はすべて、温度の変動に対して異なる応答を示します。すべての磁石で、キュリー温度までは磁界強度はある程度低下します。キュリー温度は、磁石内の原子双極子が磁気整列を維持できなくなる温度です。表 2-1 に、各種磁性材料の代表的な値を示します。

表 2-1. 磁性材料の温度応答

材料	温度ドリフト (C)
NdFeB	-0.12%/C
SmCo	-0.04%/C
AlNiCo	-0.02%/C
フェライト	-0.2%/C

動作温度範囲が広いシステムでは、サマリウム・コバルト (SmCo) タイプの磁石が温度ドリフトが低いことからよく選択されますが、磁界はネオジウム磁石で一般的に測定される磁界ほど強くありません。

ほとんどのアプリケーションでは、センサで測定可能な入力を生成可能な最小の磁石を使用することが目標となります。どのようなシステムでも、磁石の選定では、磁石を回転軸に取り付けられるかどうか、コストおよび入手しやすさが主要な要因となります。一般的には、ネオジウム磁石 (NdFeB) を使用すると磁界が最強になり、フェライト磁石を使用するとコストが最低になります。

3 測定の非線形性

磁界強度に影響する磁石の材料特性以外では、機械的な位置のずれや許容誤差により、角度計算が非線形になることがあります。

測定される最終的な誤差の結果は、主に 4 つのカテゴリに分類されます。これらはそれぞれ測定の線形性に直接影響し、最終的な角度誤差を最小限に抑えるために適切に制御する必要があります。それらを以下に示します。

- 振幅の不一致
- オフセット
- 位相誤差
- 歪み

振幅の不一致

振幅の不一致は、精度に影響を及ぼす主要な要因です。個別の入力を互いにプロットして、理想的な単位円と比較できます。

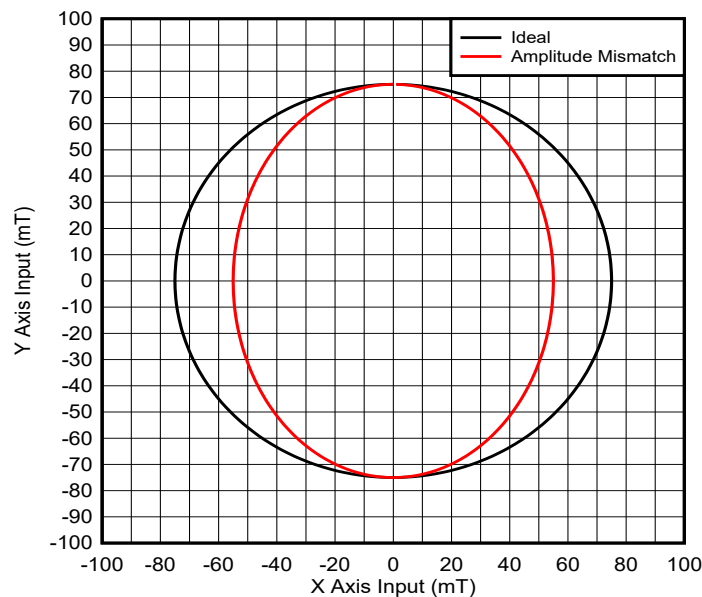


図 3-1. 振幅の不一致による非線形性

軸交差点では、誤差がゼロになることに注意してください。それらの中間点では、かなり大きな誤差が見られることがあります。これは通常、2 つの入力ソースのいずれかに正規化係数を適用することで制御します。大きい方の入力の振幅を減衰させるか、小さい方の入力の振幅を増加させることができます。この機能は [TMAG5170](#) と [TMAG5273](#) の両方に統合されており、システムのキャリブレーションに役立ちます。

デュアル・センサまたは冗長センサが必要な場合は、センサの配置によって振幅を一致させることが特に重要になります。[TMAG5170D-Q1](#) は、各センサを垂直にスタックすることでセンサの配置に関する課題を単純化します。これにより、さまざまな量の振幅の不一致を発生させる機械的な配置の誤差が減少します。

オフセット

入力換算オフセットは、入力がゼロを中心としていないために発生します。この不均衡により、単位円の中心がずれたものになります。

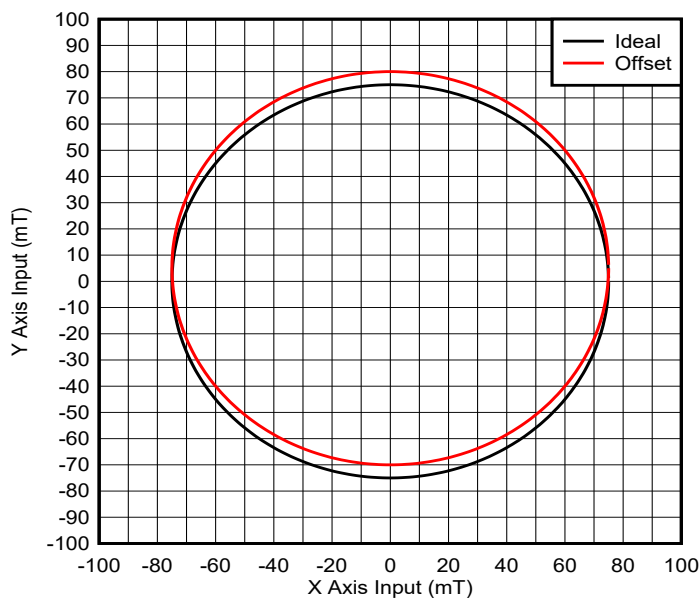


図 3-2. オフセットによる非線形性

位相誤差

アークタンジェントの計算に使用される 2 つの入力の位相誤差は、入力の位相差が 90 度からずれていることによるものです。これらの入力をプロットした結果は、振幅の不一致と似ていますが、いずれかの軸に沿って歪んでいるわけではありません。

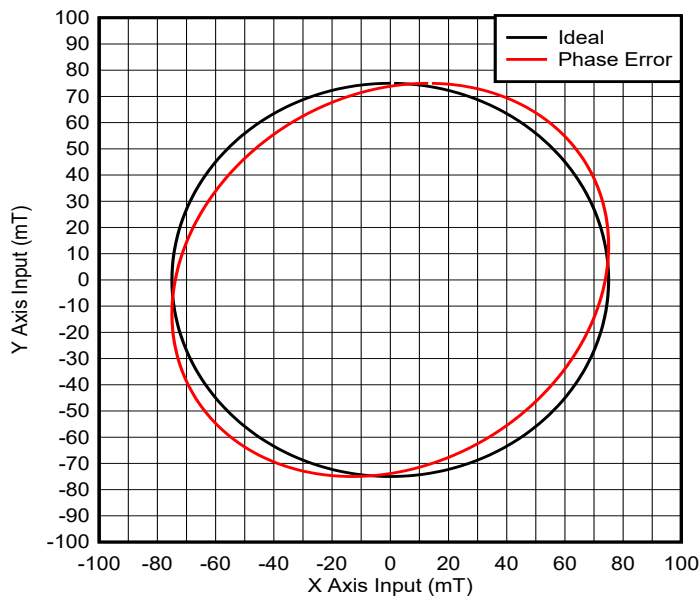


図 3-3. 位相誤差による非線形性

歪み

歪みは、検出される磁気入力 that 純粋な正弦波ではないことにより発生します。これは、磁石との距離が一貫していなかったり、磁石の形状が不規則であったりなど、さまざまな要因が原因で発生します。たとえば、非円形磁石を回転させたり、センサとの距離を変更したりすると、より複雑な非線形性を持つ入力生成される場合があります。

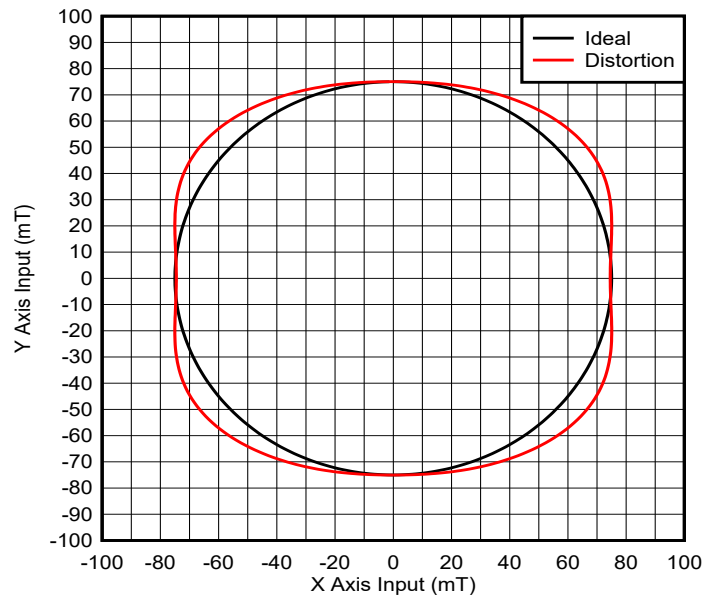


図 3-4. 入力の歪みによる非線形性

4 機械的誤差の発生源

さまざまな非線形性は、システム・レベルの機械的誤差の代表的な副産物です。これらは通常、組み立ての許容誤差が原因で発生し、前述のパターンのさまざまな組み合わせが生成されます。

これらの誤差は、以下のいずれかの条件により発生します。

- 磁石の傾きおよび揺れ
- 磁石の偏心
- センサのアライメント
- センサの配置オフセット

どのような構成でも、すべてのシステムで一貫した性能を達成するため、製造のばらつきを制限するのが有益であることは明らかです。

これらの誤差は、直径 6mm、3mm 厚の磁石を使用して個別にシミュレーションします。センサは、面内または軸上アライメントのどちらでも、最も近い磁石の表面から 4mm の位置に配置します。軸外アライメントの場合は、センサは磁石の外径の 4mm 下に配置されます。磁石のグレードは N52 です。

磁石の傾き

モーター・シャフトに取り付けられた磁石の直交性に関する誤差は、静止時の傾きにより発生します。

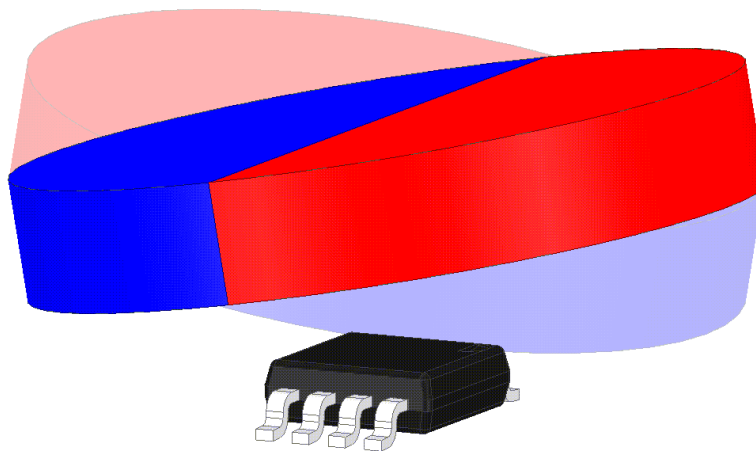


図 4-1. 磁石が傾いている軸上アライメント

この傾きは回転中にモーターのシャフトに追従し、揺れを発生させます。その結果生じる非線形性は、傾きの程度とセンサの位置によって異なります。比較のため、[図 4-2](#)～[図 4-7](#) にこの影響と、各アライメント位置において、磁石が 2 度傾いた場合に生じる角度誤差を示します。どの場合も、振幅の不一致またはオフセットによる表示角度誤差はすでに補正されており、残留誤差は理想的ではない位相または入力歪みによるものです。

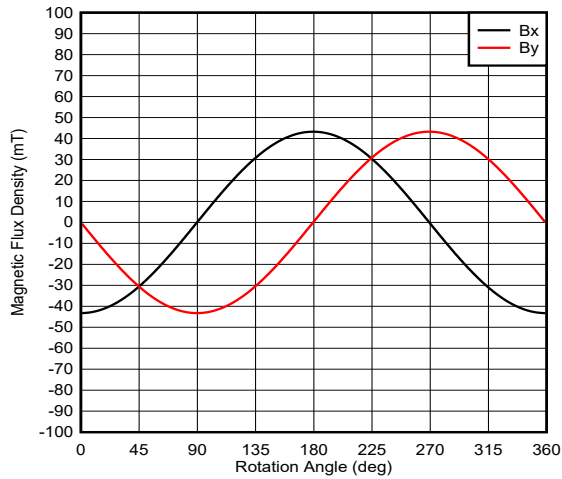


図 4-2. 軸上:磁石が傾いている場合の磁界入力

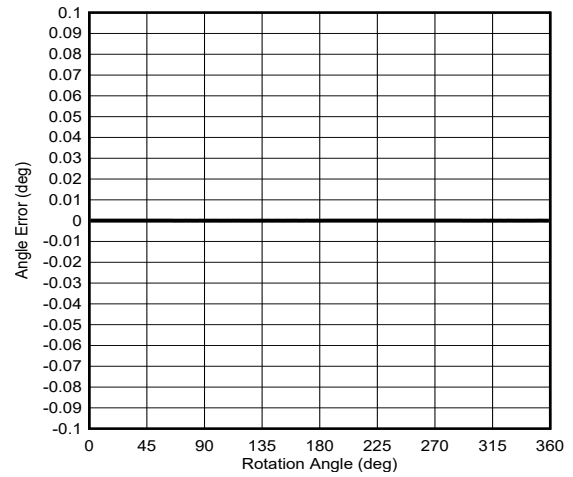


図 4-3. 軸上:磁石が傾いている場合の角度誤差

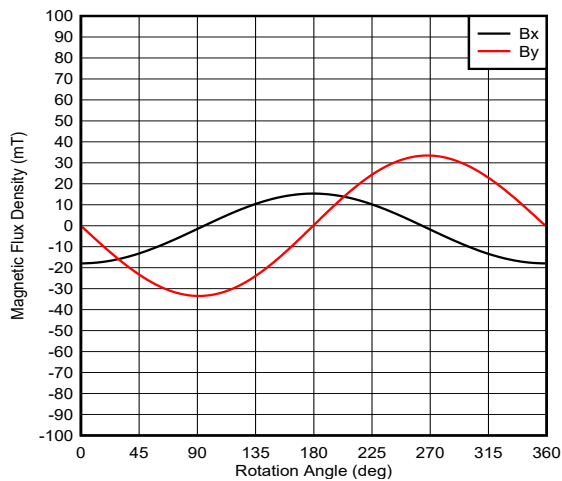


図 4-4. 軸外:磁石が傾いている場合の磁界入力

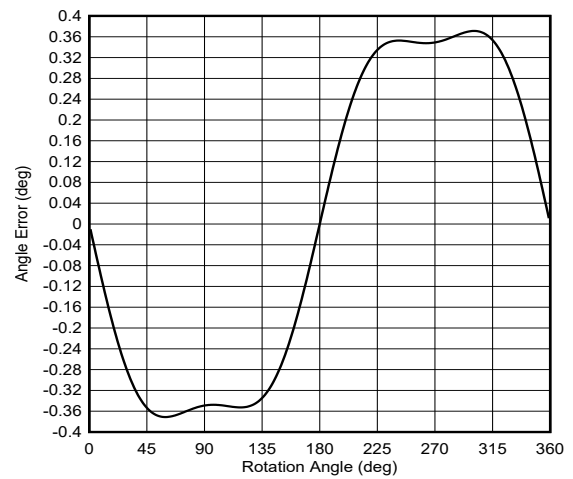


図 4-5. 軸外:磁石が傾いている場合の角度誤差

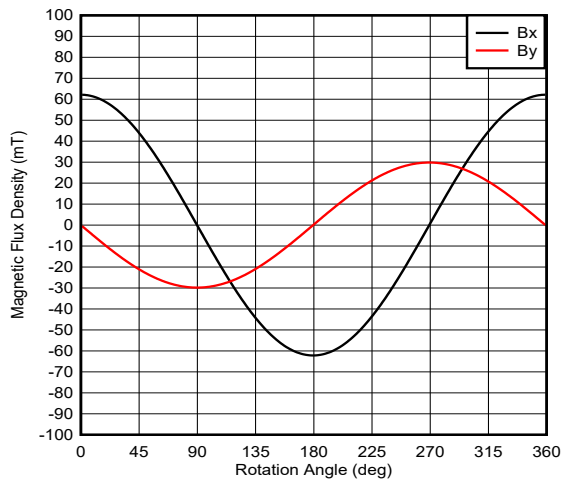


図 4-6. 面内:磁石が傾いている場合の磁界入力

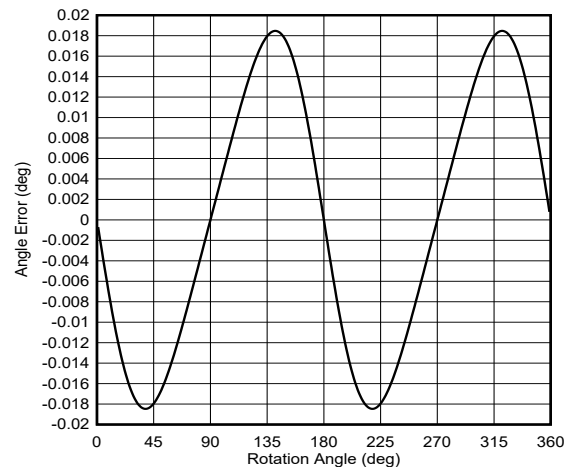


図 4-7. 面内:磁石が傾いている場合の角度誤差

磁石の偏心

磁石がシャフトの回転軸を中心として配置されていない場合、異なる種類の揺れが発生します。

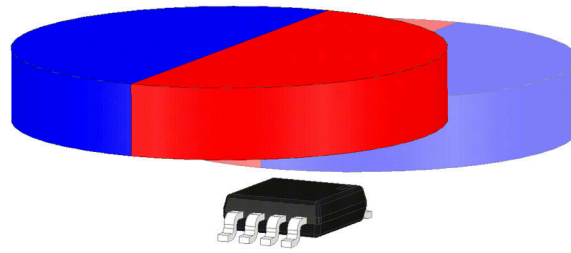


図 4-8. 偏心のある軸上アライメント

偏心のグラフ

この場合、磁石は自身の面内で振動します。その結果、磁石の位置が角度に依存したものになります。この誤差は、大きな角度誤差を引き起こす可能性があります。中心からのオフセットが **0.1mm** である場合、以下の誤差が発生します。どの場合も、振幅の不一致またはオフセットによる表示角度誤差はすでに補正されており、残留誤差は理想的ではない位相または入力歪みによるものです。

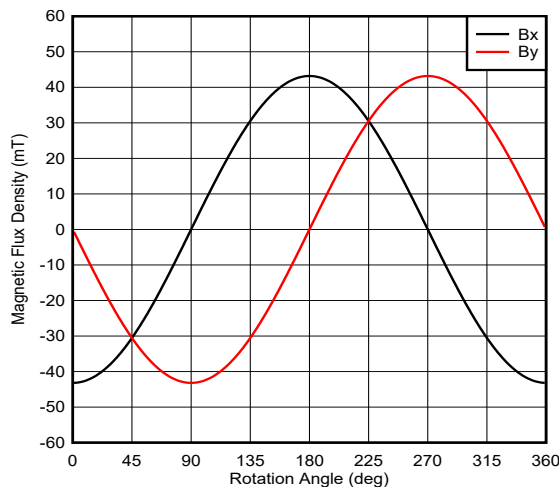


図 4-9. 軸上: 偏心がある場合の磁界入力

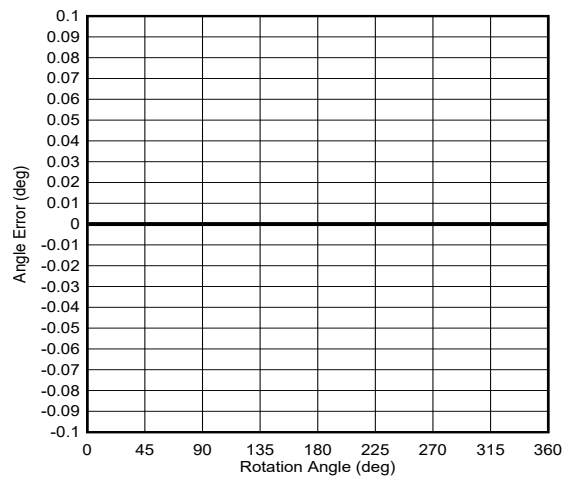


図 4-10. 軸上: 偏心がある場合の角度誤差

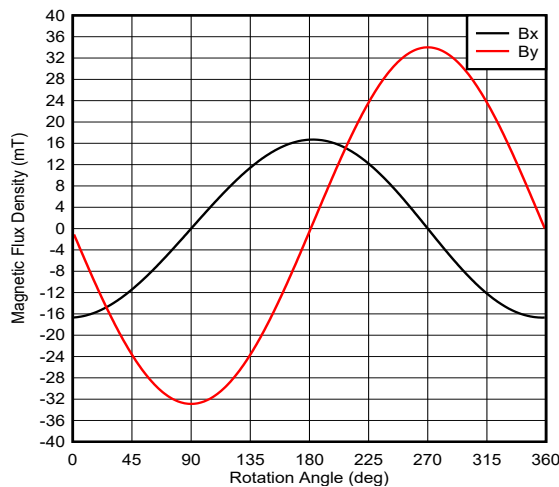


図 4-11. 軸外: 偏心がある場合の磁界入力

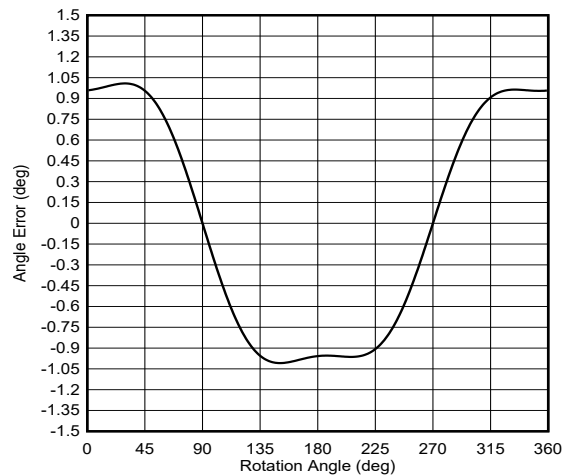


図 4-12. 軸外: 偏心がある場合の角度誤差

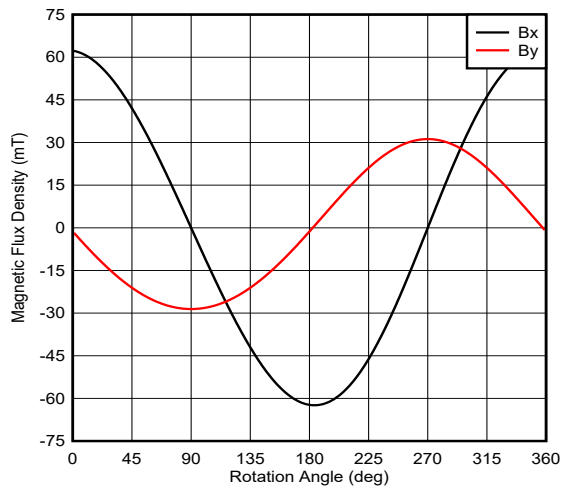


図 4-13. 面内: 偏心がある場合の磁界入力

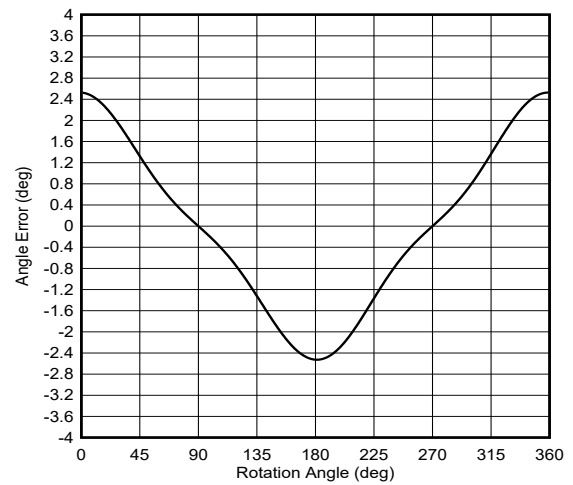


図 4-14. 面内: 偏心がある場合の角度誤差

センサのアライメント

通常、システムに対して適切なアライメントを実行するには、回転する磁石に対してセンサを垂直に配置する必要があります。

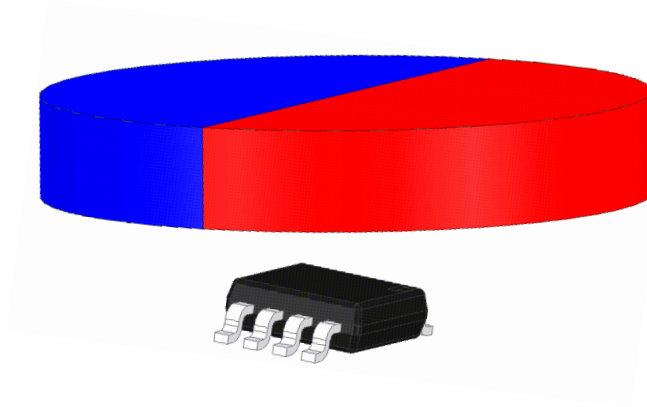


図 4-15. センサが傾いている軸上アライメント

このアライメントは、回転軸の傾き、または実際のセンサの傾きに影響されることがあります。ハンダ・リフロー中、多くの表面実装デバイスは PCB のフットプリントに対して自己整合を実行し、ハンダの硬化による多少の変動が存在する可能性があります。各軸をわずかに数度回転させるだけで、以下の誤差が生じます。どの場合も、振幅の不一致またはオフセットによる表示角度誤差はすでに補正されており、残留誤差は理想的ではない位相または入力の歪みによるものです。

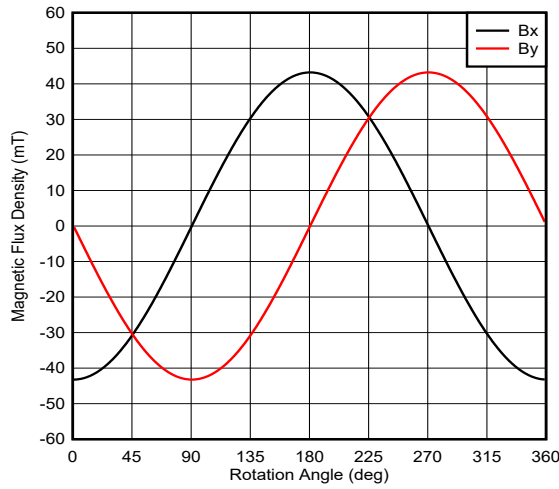


図 4-16. 軸上: センサが傾いている場合の磁界入力

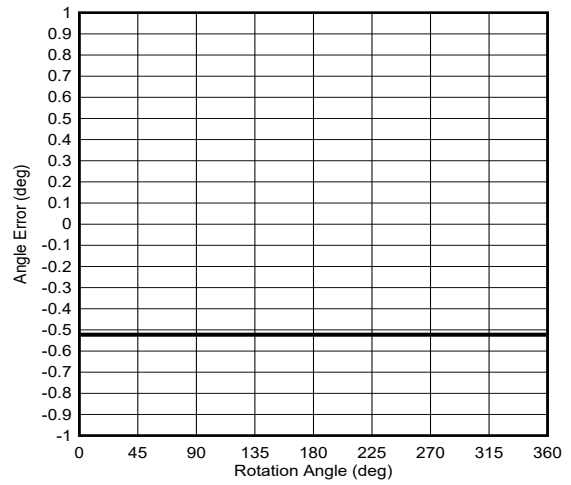


図 4-17. 軸上: センサが傾いている場合の角度誤差

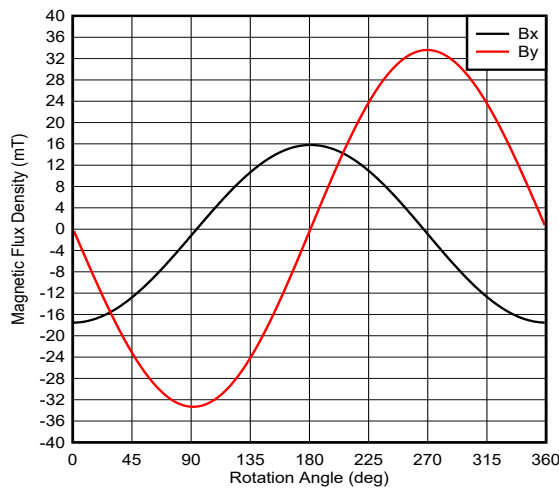


図 4-18. 軸外: センサが傾いている場合の磁界入力

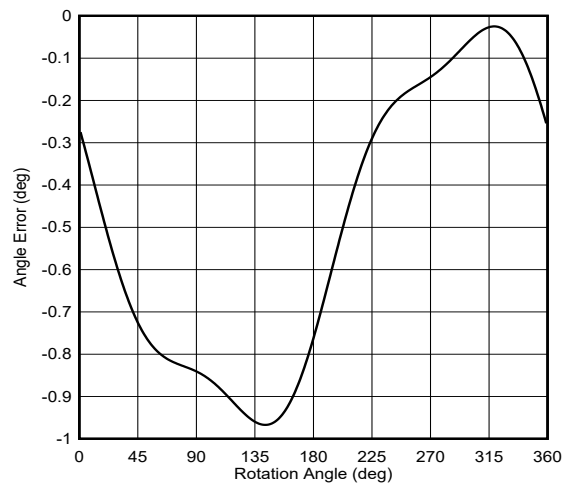


図 4-19. 軸外: センサが傾いている場合の角度誤差

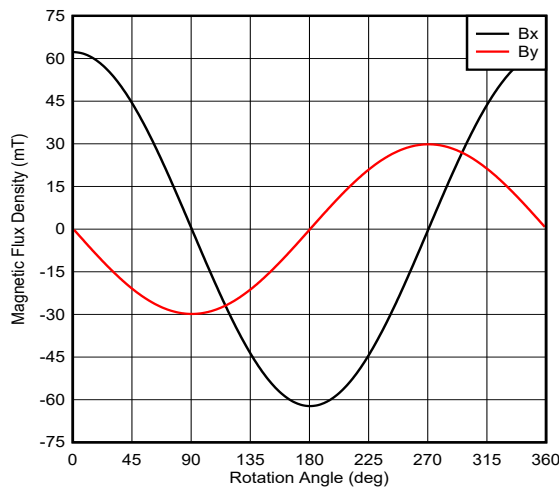


図 4-20. 面内: センサが傾いている場合の磁界入力

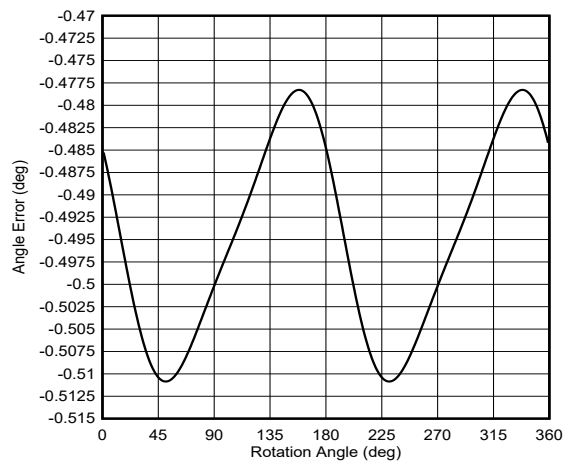


図 4-21. 面内: センサが傾いている場合の角度誤差

センサの配置オフセット

センサの配置オフセットは、最終的なセンサの位置が目的の設計と一致していないために発生します。

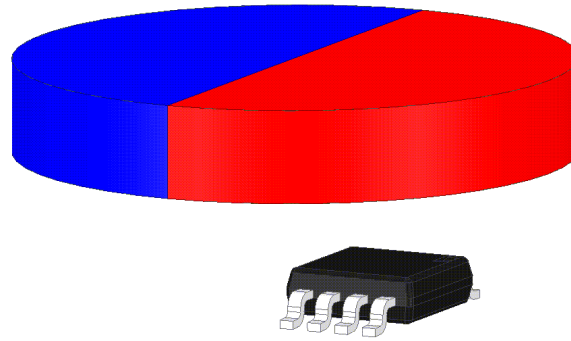


図 4-22. 位置オフセットがある軸上アライメント

これは、ハンダ・リフロー時にデバイスがアライメントを実行する位置から、より大きなシステム内のシステム部品の位置の許容誤差に至るまで、組み立て時の課題によって発生する可能性があります。X 方向と Y 方向のオフセットが 0.5mm である場合、以下の誤差が発生します。どの場合も、振幅の不一致またはオフセットによる表示角度誤差はすでに補正されており、残留誤差は理想的ではない位相または入力歪みによるものです。

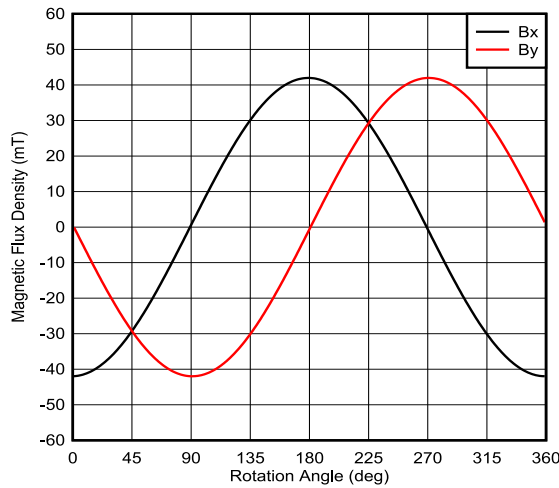


図 4-23. 軸上: 位置オフセットがある場合の磁界入力

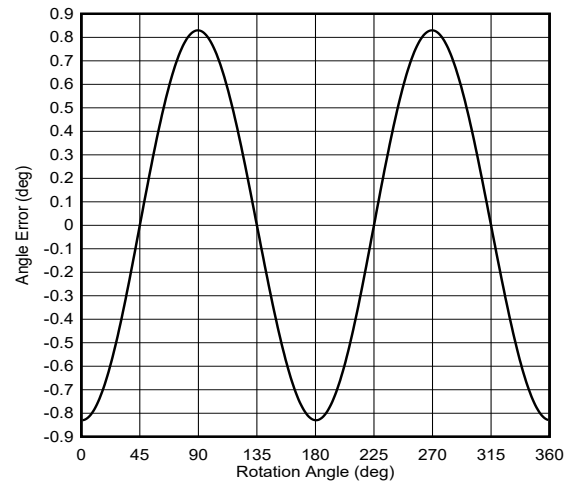


図 4-24. 軸上: 位置オフセットがある場合の角度誤差

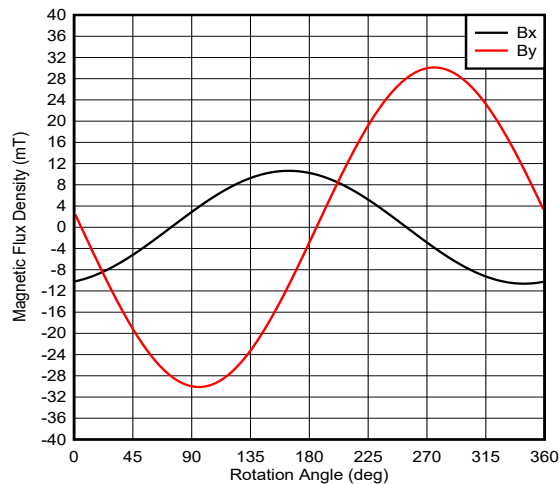


図 4-25. 軸外: 位置オフセットがある場合の磁界入力

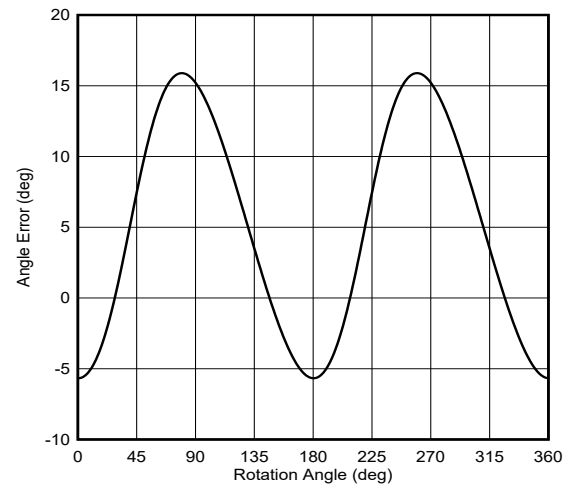


図 4-26. 軸外: 位置オフセットがある場合の角度誤差

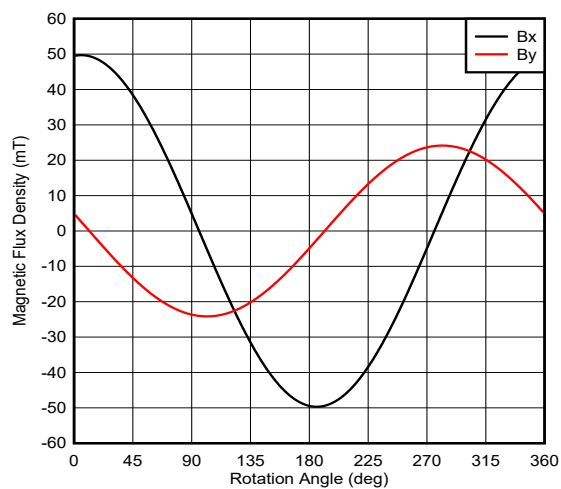


図 4-27. 面内:位置オフセットがある場合の磁界入力

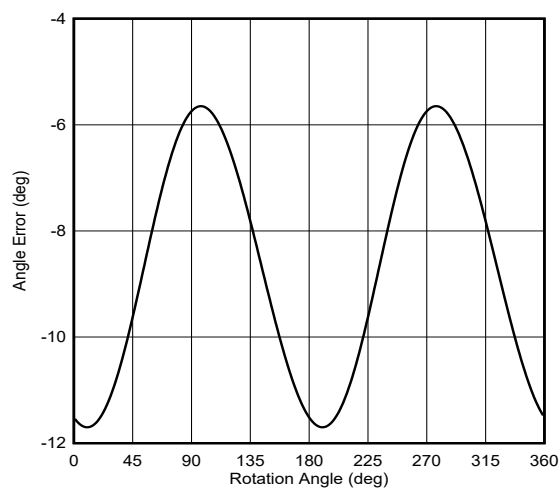


図 4-28. 面内:位置オフセットがある場合の角度誤差

5 シグナル・チェーン誤差

さまざまな機械的誤差に加えて、シグナル・チェーンの誤差が存在し、角度測定がさらに複雑になることがあります。これらの要因は、測定値の質とデータの使用方法に直接影響する可能性があります。[TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#)、[TMAG5273](#)、[TMAG5170D-Q1](#) などのリニア・ホール効果センサの場合、角度測定を設計する際に以下のパラメータを理解することをお勧めします。

感度の不均等

すでに説明したように、振幅の不一致により、出力角度が非線形になる可能性があります。適切な入力を持つセンサが配置されている場合でも、各チャンネルの感度ゲイン誤差が多少異なる可能性があります。各チャンネル間の小さな誤差は、入力振幅の不一致を補正するのと同じ方法で補正できます。つまり、スカラー感度ゲイン調整を適用し、2つの出力チャンネルを同じ振幅に正規化できます。

オフセット

入力換算オフセットは、デバイス出力に対する固定 DC オフセットとして現れます。これは、「オフセット」に示すように、角度誤差を直接発生させることがあります。この誤差を補正するには、回転する磁石に対して初期スイープを実行します。ピーク測定値を使用すると、あらゆるシステムで感度ゲイン誤差と入力換算オフセットの両方を最小化できます。

ノイズ

角度精度に影響を及ぼす可能性のあるもう1つの重要なパラメータはノイズです。RMS 入力換算ノイズ・パラメータは、1シグマ値を表します。測定システムを検討する場合、信号対雑音比 (SNR) が可能な最良ケースの分解能に影響を及ぼします。SNR 対ピーク角度誤差をプロットする場合、最終的な精度は一般に [図 5-1](#) に示す傾向に沿ったものになります。

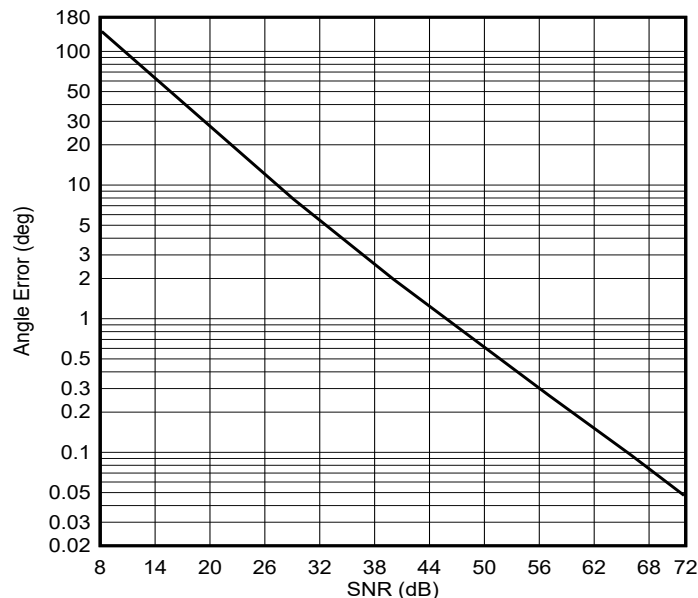


図 5-1. 入力換算ノイズによる角度誤差

SNR がこのプロットの値以上でない場合、角度計算の結果として生じる誤差が不確定なものとなり、キャリブレーションによって補正できない可能性があります。

SNR の制限を克服するため、いくつかのオプションを利用できます。まず、サンプル平均化を使用して、入力ノイズをサンプル数の平方根分の 1 に減らすことができます。[TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#)、[TMAG5273](#)、および [TMAG5170D-Q1](#) は、いずれも最大 32 倍の平均化を実現しており、ノイズを大幅に低減するために使用できます。これにはサンプリング時間が長くなるという欠点があり、これによって望ましくない遅延が発生し、最大サンプル・レートが制限される可能性があります。

もう 1 つのオプションは、磁石の強度またはセンサの位置を調整することです。これらのオプションにより、利用可能な磁界が増加し、測定の SNR が向上します。

量子化誤差

量子化誤差は、ADC を使用してアナログ・ホール電圧をデジタルに変換すると発生します。ADC で使用可能なビット数により、マイクロコントローラで利用可能な最小測定分解能が設定されます。任意のサンプルにおいて、標準的な最大誤差は $1/2$ LSB 以下になります。例として、[図 5-2](#) および [図 5-3](#) に 8 ビット ADC へのフルスケール入力を使用した角度誤差と、12 ビット ADC の角度量子化誤差を示します。

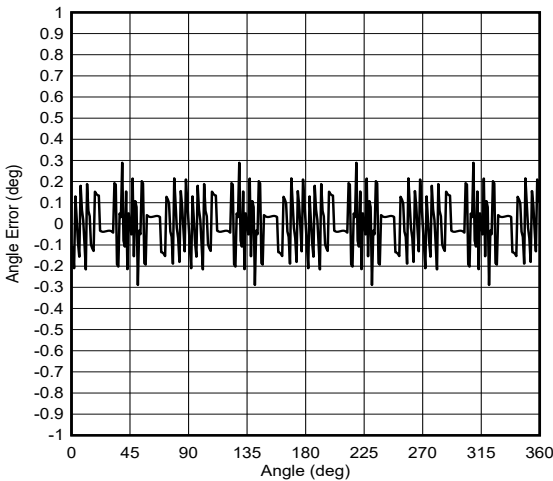


図 5-2. 8 ビットの量子化誤差

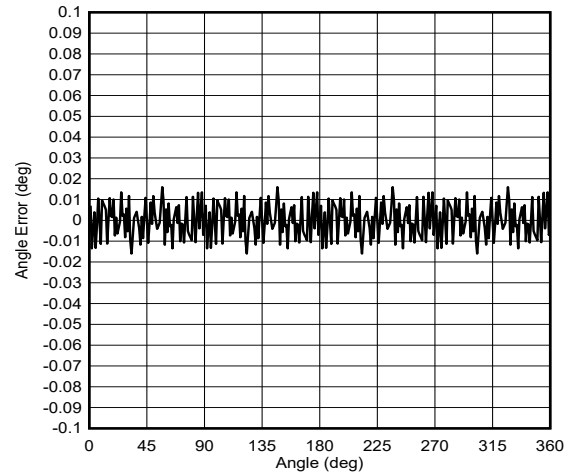


図 5-3. 12 ビットの量子化誤差

[TMAG5170](#) には 12 ビット ADC が内蔵されており、16 ビットの入力ワード長を使用して平均化された結果を返すことができます。

伝搬遅延

磁気センシング・アプリケーションで移動ターゲットの位置を判定するには、センサの伝搬遅延を考慮することが重要です。マイクロコントローラへのフィードバックは、ある程度の時間が経過した後にマイクロコントローラで受信でき、その間も動作は中断されずに継続されます。このため、回転する磁石の測定角度には、センサの変換時間に応じて変化する固定位相遅延が生じます。

モーターの速度がわかっている場合、この情報とセンサのサンプル・レートを組み合わせて使用し、変換中の磁石の位置変化を計算できます。

[TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#)、[TMAG5273](#)、および [TMAG5170D-Q1](#) では、それぞれカスタマイズ可能なサンプリング・パターンと平均化を実現できます。これにより、伝搬遅延が可変になります。タイミングの詳細については、データシートを参照してください。例として、[XYX](#) サンプル・パターンを使用した各種平均化モードで予測される遅延を [図 5-4](#) に示します。

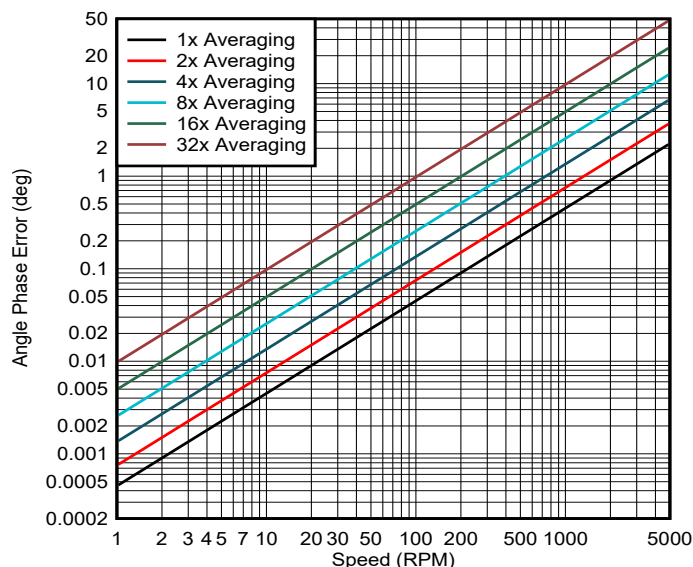


図 5-4. TMAG5170 角度位相誤差と回転速度との関係

質の高い測定を確立するための重要なステップは、確定的な測定方法を使用することです。これは、内蔵されたトリガ・モードを使用して実現できます。既知の時間で変換を開始するようトリガすると、出力結果と実際の磁石の位置を最も正確に関連付けることができます。

温度ドリフト

「温度ドリフト」で説明したように、磁石の磁界は温度によって変化します。これにより、測定に関する特定の課題が発生する可能性があります。TMAG5170、TMAG5173-Q1、TMAG5273、および TMAG5170D-Q1 は、いずれもプログラマブルな温度補正機能を備えており、磁界強度のこれらの変化に合わせてセンサを調整できます。0.12%/C、0.2%/C、0 の設定が利用できるため、ほとんどの磁石構成に対応できます。

その他のシグナル・チェーン誤差

他の磁気オプションを検討する際には、磁気ヒステリシスやクロス軸感度など、TMAG5170、TMAG5173-Q1、TMAG5273、TMAG5170D-Q1 には大きな影響を及ぼさない他の誤差発生源の影響も評価することが重要です。これらの要因は、統合型の磁気コンセンレータや、GMR や TMR などの磁気抵抗性センサを使用するデバイスによく見られます。

磁気ヒステリシスは、強磁性物質に磁界を印加した結果です。図 2-3 に示す動作と同様に、永久磁石からの磁界の以前の状態に応じて、コンセンレータの残留磁化が発生します。その結果、角度の測定値は磁石の以前の位置に依存し、磁石が時計回りの場合と反時計回りの場合で測定される入力には違いがあります。

クロス軸感度は、ある磁界チャンネルの一部が別の軸の測定値に結合された結果です。この結果、他のチャンネルの状態に依存する非線形性が生じます。この誤差を測定から除去するには、複雑なキャリブレーション・ルーチンが必要です。

6 キャリブレーション手法

システム固有の非線形性に対処するため、多くの場合、最高精度の結果を確実に得られるようにキャリブレーションを実装する必要があります。アークタンジェント計算を実行する前に機械的誤差または電氣的誤差に対処すると、最も線形性の高い結果が得られますが、多くの場合、各誤差発生源に個別に対処するのは現実的ではありません。代わりに、既知の角度を基準に測定を行い、最終的なプロファイルを作成できます。マイクロコントローラで使用される最終的な位置誤差を最小にするため、測定された角度から誤差が減算されます。さまざまな機械的誤差モードのそれぞれの影響が組み合わさることで生じる可能性のある角度誤差を考慮します。通常、軸上の場合には誤差はほとんど発生しませんが、これらの要因が組み合わさると、複雑な誤差パターンが発生します。図 6-1 では、1 回のフル回転中に周期的振幅が変動しています。

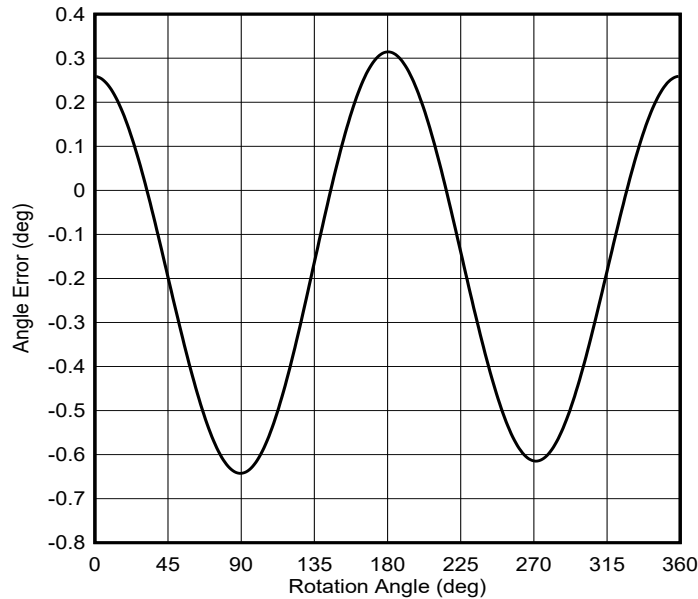


図 6-1. 軸上角度誤差と機械的誤差の組み合わせ

このような角度測定誤差のキャリブレーションには、2 つの手法が一般的です。1 つは、多点ルックアップ・テーブルを使用して、誤差曲線の区分近似を生成する方法です。データ点の数を増加すると、結果として得られるプロットは実際のシステム誤差に急速に近づきます。以下に、8、16、32 点キャリブレーションの誤差曲線の例を比較します。

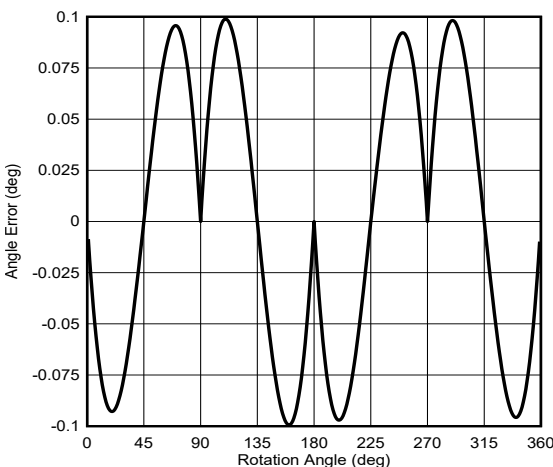


図 6-2. 8 点の線形化

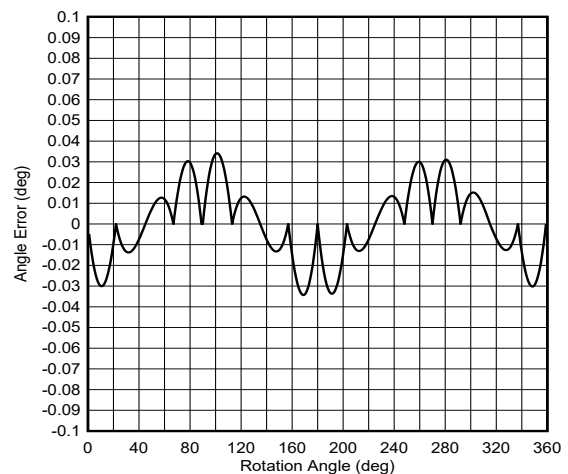


図 6-3. 16 点の線形化

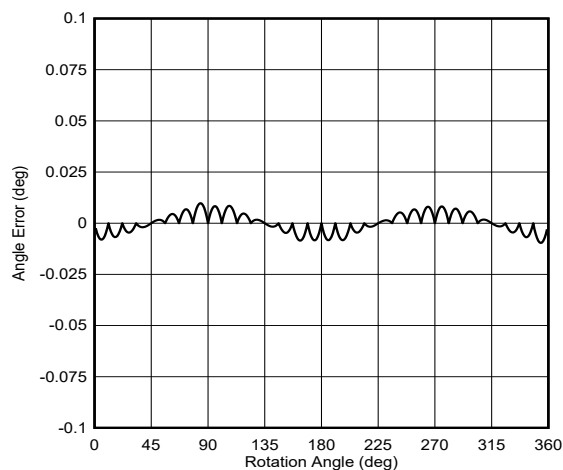


図 6-4. 32 点の線形化

この方法を使用するには、ルックアップ・テーブルが必要です。このルックアップ・テーブルを使用して、これらの既知の値間では誤差が直線的に変化すると想定し、最も近いデータ点間の誤差を近似します。

もう 1 つの方法では、方程式に基づくソリューションを使用して、すべての位置の誤差を近似します。誤差は本質的に周期的であるため、各高調波の正弦値と余弦値の組み合わせを使用して近似することができます。ここでも、データ点の数が増加するにつれて、精度も向上します。図 6-5 と同じ誤差プロファイルを使用すると、最初の 4 つの高調波を補正した後、より精度の高い結果を得ることができます。

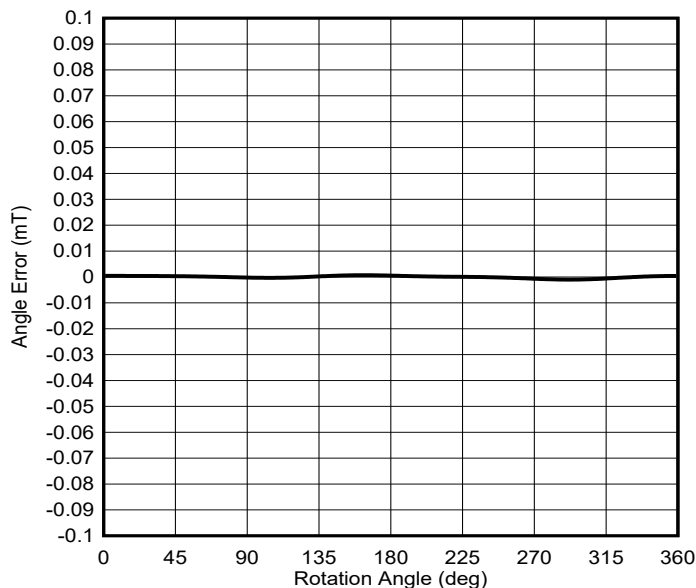


図 6-5. 高調波近似を使用した線形化

TMAG5170 を使用した角度符号化の詳細と、ラボ環境でキャプチャしたキャリブレーション例については、『[精密なモーター位置制御のためのホール効果センサ搭載絶対角度エンコーダのリファレンス・デザイン](#)』を参照してください。

7 改訂履歴

資料番号末尾の英字は改訂を表しています。その改訂履歴は英語版に準じています。

Changes from MARCH 29, 2022 to MAY 9, 2023 (from Revision * (March 2022) to Revision A (May 2023))

	Page
• ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新.....	3
• TMAG5170D-Q1 を追加.....	4
• TMAG5170D-Q1 を追加.....	8
• TMAG5170D-Q1 を追加.....	18

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated