

Design Guide: TIDA-010947

AMR センサ搭載、高分解能、低レイテンシ、小型、アブソリュート
角度エンコーダのリファレンス デザイン

概要

このリファレンス デザインは、正弦波と余弦波の差動比レシオメトリック アナログ出力と、ホール センサを使用した内蔵象限検出機能を搭載した高精度アナログ AMR 360° 角度センサを使用する、小型フォーム ファクタのアブソリュート単回転磁気回転角度エンコーダ回路の設計を示します。Cortex M0 MCU は、4MSPS のデュアル サンプリング 12 ビット ADC、250ksps で最大 14 ビットの有効分解能、低ノイズと低レイテンシの絶対角度計算用ハードウェア平均化機能、高速データ転送用の 4M ボーレート UART を備えています。このアブソリュート エンコーダは、許容誤差が $\pm 10\%$ の 5V 入力電源電圧を必要とし、1 個の半二重 RS-485 トランシーバを使用する双方向通信インターフェイスを実現します。

リソース

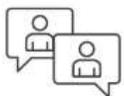
TIDA-010947	デザインフォルダ
TMAG6180	プロダクトフォルダ
MSPM0G3507	プロダクトフォルダ
THVD1454	プロダクトフォルダ
REF3533 、 TPS7A0533	プロダクトフォルダ

特長

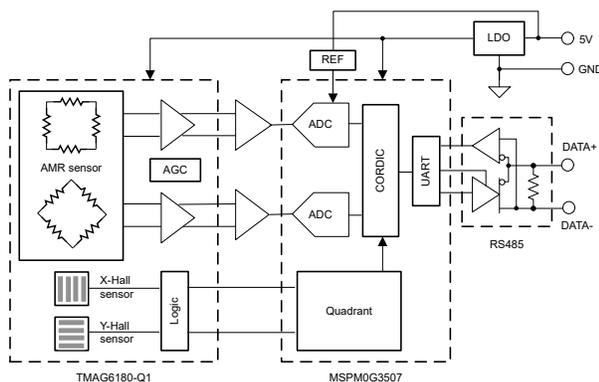
- 15 ENOB 超の低ノイズ絶対回転角度、25°C で 0.05° 未満の角度精度誤差、16 μ s の低レイテンシ
- 小型の IC パッケージにより、直径 30mm のコンパクトな円形 PCB を実現可能
- 象限検出に AMR センサと内蔵ホール センサを使用することにより、全 360° の測定が可能、BOM (部品表) 点数を削減
- 20mT ~ 1T の広い動作磁界範囲により柔軟な機械的配置が可能
- デュアル 12 ビット ADC、最大 128 倍のオーバーサンプリング、演算アクセラレータを内蔵した MCU により、効率を向上し、システムコストを削減
- 120 Ω の切り替え可能な終端機能を内蔵した RS485 トランシーバを VSON-10 パッケージに組み込むことで BOM とスペースを削減

アプリケーション

- サーボドライブ位置センサ
- 位置センサ
- トラクション インバータ位置センサ



テキサス・インスツルメンツの™ E2E サポート エキスパートにお問い合わせください。



1 システムの説明

単回転または多回転のアブソリュート回転角度エンコーダは、サーボドライブやロボットなどの機械的絶対角度位置が必要な多くのアプリケーションで使用されています。アブソリュートエンコーダでは通常、ベンダ固有またはオープンエンコーダプロトコルを使用する、シリアル単方向または双方向の半二重または全二重 RS485 インターフェイスが提供されます。

このリファレンスデザインは、軸上センシングを使用した、小型フォームファクタのアブソリュート単回転磁気回転角度エンコーダ回路の設計を示します (図 1-1 を参照)。エンコーダの回転軸の端に円形のディスク磁石が取り付けられています。TMAG6180-Q1 高精度アナログ AMR 360° 角度センサを搭載した静的 PCB は、AMR センサパッケージの上面から円形ディスク磁石までのエアギャップを設定できるように、軸上に取り付けられています。実効エアギャップには、IC パッケージ内の AMR とホールセンサの位置までが含まれます。X 軸と Y 軸に 2 つの独立したホールセンサ出力も備えており、センサの角度範囲を機械的に 360° まで拡大するために使用されます。

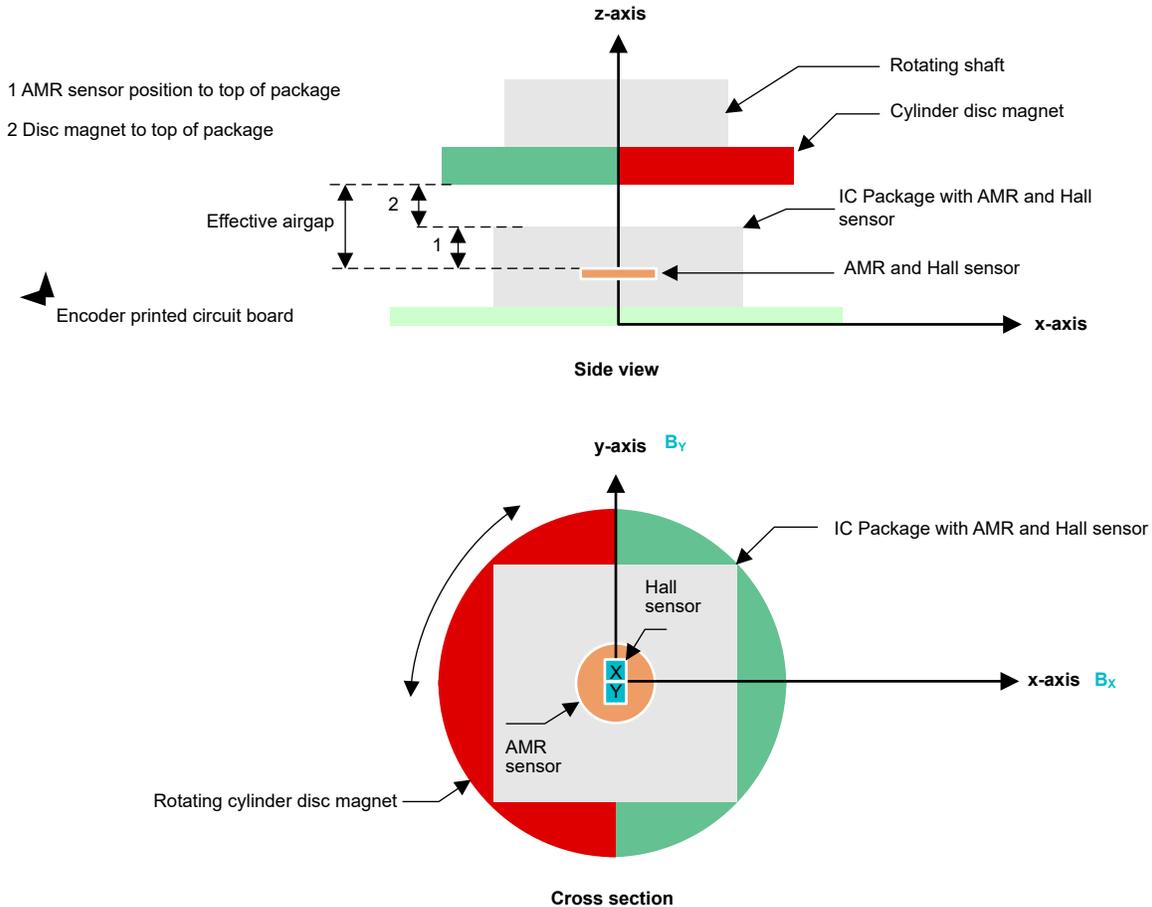


図 1-1. 軸上の磁気角度センシングの原理

TMAG6180-Q1 には信号コンディショニングアンプが内蔵されており、印加される面内磁界の方向に関連する、正弦波と余弦の差動アナログ出力を提供します。

4MSPS のデュアル サンプリング 12 ビット ADC、最大 128 倍のハードウェア平均化機能を内蔵した Cortex M0 MCU MSPM0G3507 は、低ノイズで低レイテンシの絶対角度計算を可能にし、高速な回転角度データ送信用に 4M ボーレートの UART を備えています。アブソリュートエンコーダ回路のデザインは、小型の 10-VSON パッケージで、120Ω の切り替え可能終端を内蔵した半二重 RS-485 トランシーバを使用して双方向インターフェイスを実現します。アブソリュートエンコーダ回路に電力を供給するには、許容誤差 ±10% の 5V 電源が必要です。

1.1 主なシステム仕様

表 1-1 に、AMR センサを搭載した TIDA-010947 高分解能、低レイテンシの小型アブソリュート角度エンコーダ リファレンス デザインの主な仕様を示します。

表 1-1. 主な設計仕様

パラメータ	値 (標準値)	コメント
機能	単回転磁気アブソリュート角度エンコーダ	
センサの種類	TMAG6180-Q1 高精度アナログ AMR 360° 角度センサ	軸上センシング
磁石	直径 13mm、厚さ 1mm、ネオジム N52、Br = 1455	軸上センシング用にシャフト端に取り付け
磁石とセンサの配置	シャフト端	
エアギャップ	0.8mm	構成可能
25°Cでの角度精度誤差	≤ 0.05°	25°Cで較正されたオフセットとゲイン誤差
角度標準偏差	≤ 0.0033°	
角度分解能 (標準偏差)	有効ビット数 (ENOB): 15.4	
角度分解能 (値)	32 ビット (IQ21)	MSPM0G3507 に固有のカスタム
64 倍オーバーサンプリングでの角度伝搬遅延 (レイテンシ)	16μs	磁界強度 (x 方向および y 方向) の実効サンプリング点から角度が計算されるまでの時間
実効角度サンプリング レート	32kHz	
動作速度	≤ 100000rpm	未テスト
A/D コンバータ	デュアル 12 ビット ADC、64 倍のハードウェア平均化機能付き	MSPM0G3507 に内蔵、ADC オーバーサンプリングを最大 128 倍に構成可能
A/D コンバータのオーバーサンプリング レート	2.85MSPS (サンプリング時間 250ns、変換時間 100ns)	サンプル時間を設定可能、最小 150ns
コネクタ	5 ピン、1mm コネクタ	表 4-1 を参照
インターフェイス	RS485	THVD1454 半二重トランシーバ、120Ω の切り替え可能な終端抵抗を内蔵
電源電圧	5V ±10%	
消費電流	54mA	16kHz T フォーマットのコマンド周波数での平均電流
動作温度範囲	-40°C~125°C	リファレンス デザインを 25°Cの周囲温度でテスト
PCB の直径	30mm	
PCB の層数	4	

2 システム概要

2.1 ブロック図

図 2-1 に、このリファレンス デザインのブロック図を示します。

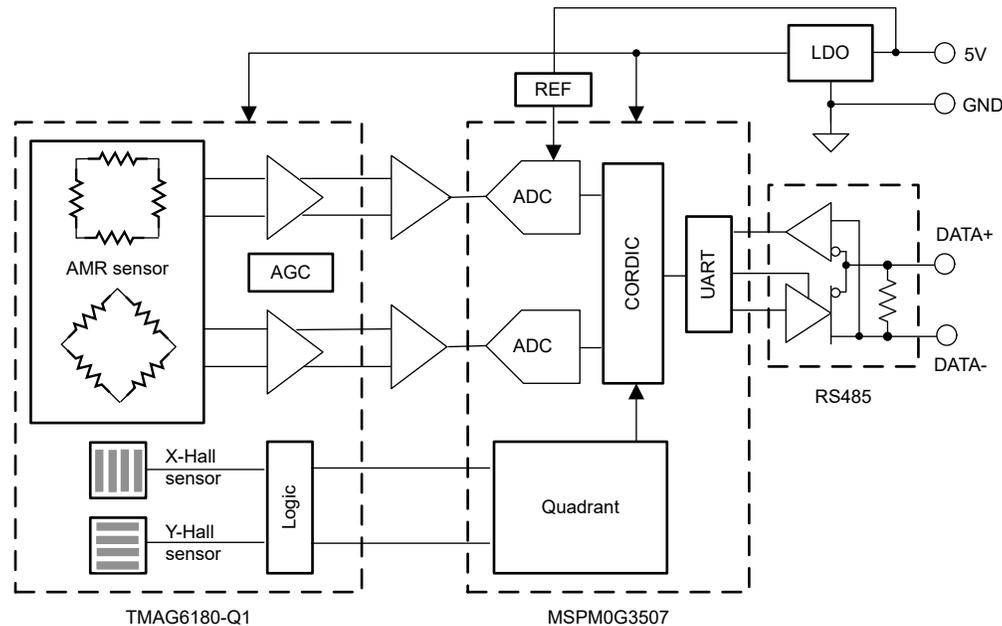


図 2-1. システム ブロック図

2.2 設計上の考慮事項

磁気エンコーダは、動作温度範囲が周囲温度 **125°C**までと広く、衝撃や振動に対する堅牢性が高いことから、過酷な産業用アプリケーションで広く使用されています。

磁気センサには、ホール効果センサ、または一般にホール効果センサよりもノイズが低い **Anisotropic Magneto Resistive (AMR)** センサなどの磁気抵抗センサを使用できます。ただし、磁気抵抗センサは磁界の大きさを測定しますが、方向を検出することはできません。そのため、測定範囲を **360°** に拡大するには、デジタル ホール スイッチなどの追加センサが必要になります。

磁石がシャフト端に取り付けられたモータ統合型エンコーダ アプリケーションでは、**2 つの ARM** センサをお互いに **45°** の角度で配置した軸上センシングが適切な設計です。

電気的シグナル チェーンのオフセットおよびゲインの不一致と、**A/D** コンバータのサンプルレート、速度、分解能は、測定される絶対角度精度に影響を及ぼすため、温度ドリフトが非常に小さい部品を使用すると角度誤差を低減するのに役立ちます。正弦および余弦センサ信号からの角度のデコードには、除算、積和演算、アークタンジェントなどの数学関数が必要です。

高集積かつ低消費電力の小型フットプリント回路は、直径 **30mm** 未満の最小フォームファクタ円形 **PCB** の設計に重要です。エンコーダはモーターに内蔵できるため、通常は動作周囲温度は少なくとも最大 **125°C**である必要があります。

データ送信中のビット誤差を最小限に抑えるため、アブソリュートエンコーダの **RS485** 通信インターフェイスは、高い **EMC** 耐性が得られるように設計する必要があります。

2.3 主な使用製品

2.3.1 TMAG6180-Q1

TMAG6180-Q1 は、Anisotropic Magneto Resistive (AMR) テクノロジーをベースとする高精度角度センサです。このデバイスには、信号コンディショニング アンプが内蔵されており、印加される面内磁界の方向に関連する、正弦波と余弦波の差動アナログ出力を提供します。このデバイスは X 軸と Y 軸に 2 つの独立したホール センサ出力も備えており、センサの角度範囲を 360° まで拡大するために使用できます。このデザインでの主な特長は次のとおりです。

- 2 μ s 未満の超低レイテンシ高速 AMR 角度センサ
- 角度ドリフトが小さいため、温度範囲全体にわたるキャリブレーションが不要
- 正弦波と余弦波の差動比レシオメトリック アナログ出力で、差動エンドまたはシングルエンドのアプリケーションをサポート
- 広い動作磁界範囲: 20mT~1T
- ホール センサを使用した内蔵象限検出
- 温度範囲: -40°C~150°C

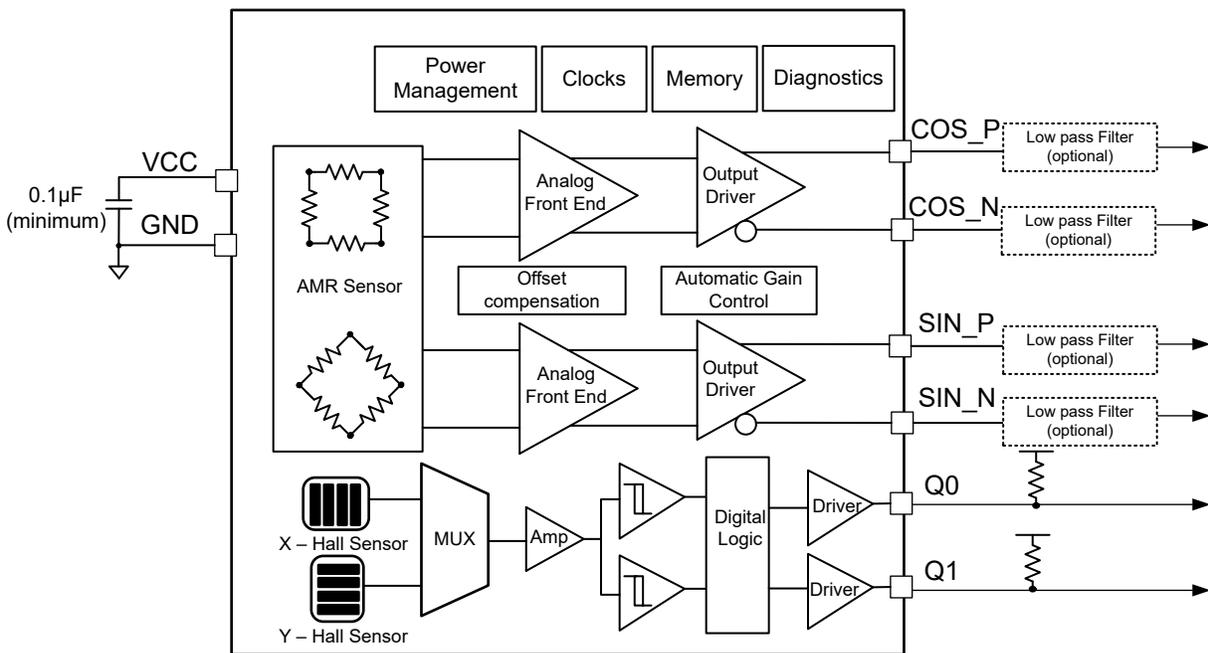


図 2-2. TMAG6180 の機能ブロック図

2.3.2 MSPM0G3507

MSPM0G350x マイクロコントローラ (MCU) は、最大 80MHz の周波数で動作する拡張 Arm™ Cortex®-M0+ 32 ビット コア プラットフォームをベースとした MSP 高集積超低消費電力 32 ビット MCU ファミリの一部です。コスト最適化されたこれらの MCU は高性能アナログ パリフェラルを統合しており、-40°C~125°Cの拡張温度範囲をサポートし、1.62V~3.6V の電源電圧で動作します。このデザインでの MSPM0G350x MCU の主な特長は以下のとおりです。

- 最大 17 の外部チャネルを持つ 2 つの同時サンプリング 12 ビット 4Msps A/D コンバータ (ADC)
- 250ksps で 14 ビットの実効分解能、ハードウェア平均化付き
- 最適化された低消費電力モード
 - RUN: 96 μ A/MHz (CoreMark)
 - STANDBY: 1.5 μ A (RTC および SRAM 保持)
- DIV、SQRT、MAC、TRIG 計算をサポートする演算アクセラレータ

2.3.3 THVD1454

THVD1454 は、産業用アプリケーション向けの半二重 RS-485 トランシーバです。このデバイスには、120Ω 終端抵抗のオンチップ終端や、ドライバ出力スルーレート制御などの機能があります。このデザインでの主な特長は次のとおりです。

- ピンで制御されるオンチップ 120Ω 終端抵抗をバスのピン間に配置
- 最大データレートを構成可能 – SLR = High: 500kbps – SLR = Low またはフローティング: 20Mbps
- バス I/O 保護
 - ±16kV HBM ESD
 - ±8kV IEC 61000-4-2 接触放電、±15kV IEC 61000-4-2 気中放電
 - ±4kV IEC 61000-4-4 高速過渡バースト
 - ±16V のバスフォルト保護 (バスピンの絶対最大電圧)
- 拡張産業用温度範囲に対応: -40°C ~ 125°C

3 システム設計理論

3.1 ハードウェア設計

3.1.1 角度センサの回路図設計

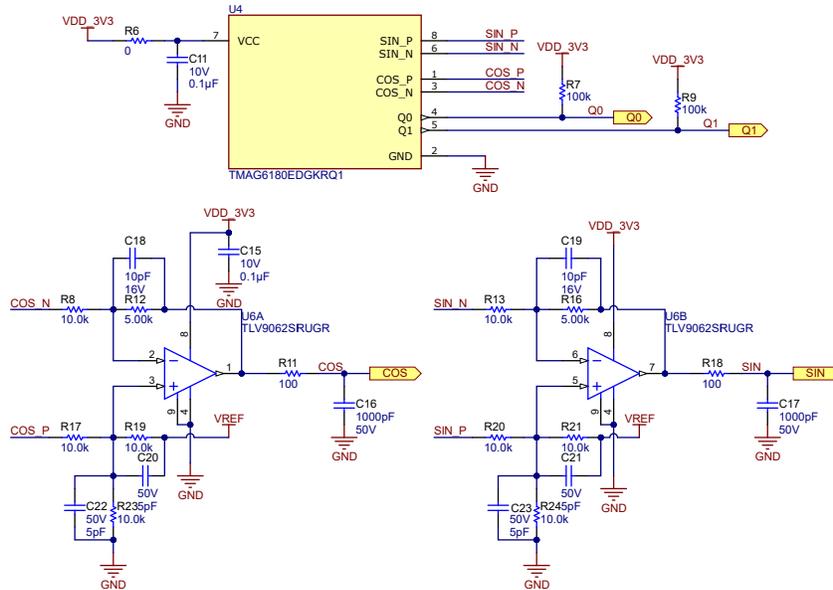


図 3-1. AMR センサ TMAG6180 の回路図

100nF のデカップリング コンデンサ C11 を TMAG6180 の VCC および GND ピンの近くに追加します。Q0 と Q1 はオープンドレイン出力であり、100k のプルアップ抵抗 R7 と R9 は 3.3V 電源レールに接続されています。

TLV9062 はオプションであり、TMAG6180-Q1 の差動アナログ出力 SIN_P、SIN_N、COS_P、COS_N をシングルエンド信号に変換して MSPM0G3507 ADC に接続するために使用されます。R8、R11、R12、R13、R16、R18 を 0Ω 抵抗として実装することで、TLV9062 をバイパスできます。VCC で安定した電源電圧を確保するため、VCC と GND の間に C15 (100nF) を配置します。

TLV9062 の差動ゲインは、式 1 で計算できます。

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R_{12}}{R_8} = \frac{R_{19} \parallel R_{23}}{R_{17}} = \frac{1}{2} \quad (1)$$

ユニットゲインを選択し、R8 を 10kΩ にした場合、R17 と R20 を 10kΩ、R12 を 5kΩ にする必要があります。

高周波ノイズをフィルタして除去するため、C18 を追加します。帯域幅 (BW) は、式 2 で計算できます。

$$BW = \frac{1}{2\pi C_{18} R_{12}} = \frac{1}{2\pi (C_{20} \parallel C_{22}) (R_{19} \parallel R_{23})} \quad (2)$$

3MHz の帯域幅を選択した場合、C18 と C19 は 10pF にする必要があります。C20 ~ C23 は、C18 の半分 (5pF) にする必要があります。

3.1.2 MSPM0G3507 の回路設計

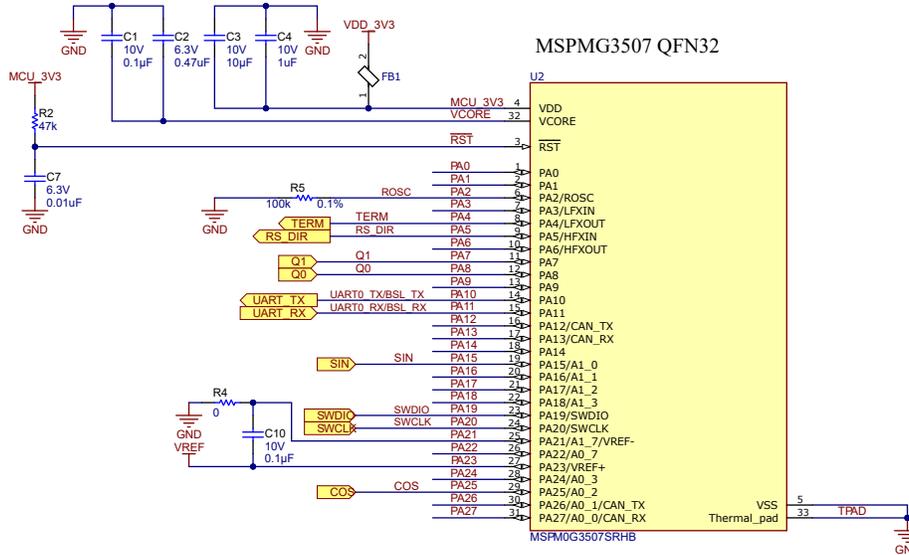


図 3-2. MSPM0G3507 の回路図

セラミック デカップリング コンデンサ C3 (10 μ F) と C4 (1 μ F) を VDD ピンと VSS ピンの間に配置し、C1 (100nF)、C2 (0.47 μ F) を VDD ピンと VSS ピンの間に配置します。高周波デジタル電流がアナログ信号チェーンに影響を及ぼすのを防止するため、VDD と 3.3V 電源レール間にフェライトビーズ FB1 を追加します。

nRST リセットピンは、47k Ω 抵抗 R2 と 10nF のプルダウン コンデンサ C7 を使用して VDD にプルアップします。SYSOSC 周波数補正ループ (FCL) 回路では、許容誤差が 0.1% の外付け 100k Ω 抵抗 R5 を ROSC ピンと VSS の間に取り付けます。

MSPM0G3507 は、外部基準電圧を使用して内蔵 ADC の精度をさらに向上させます。このデザインでは、外部 3.3V 基準電圧 REF3533 を使用し、MSPM0G3507 の VREF+ と VREF- ピンに接続します。VREF+ と VREF- の間には 100nF のデカップリング コンデンサ (C10) を配置します。

3.1.3 RS485 トランシーバの回路図設計

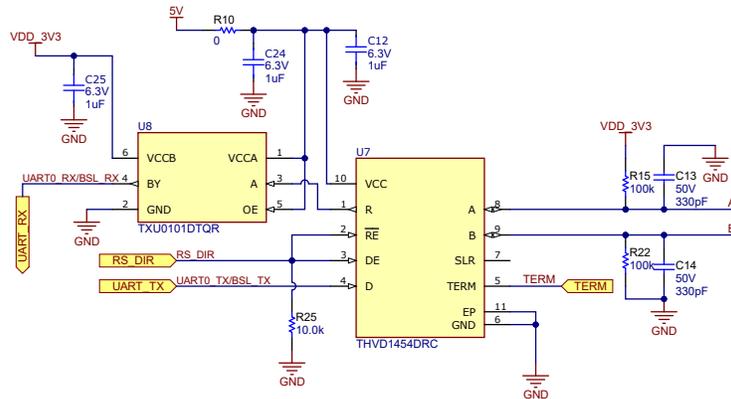


図 3-3. THVD1454 の回路図

TMAG6180 に電力を供給する 3.3V 電源レールに RS485 トランシーバのスイッチングノイズが影響を及ぼすのを回避するため、THVD1454 への電力供給には別の 5V 電源を使用します。すべてのデータレートと電源電圧で信頼性の高い動作を確保するため、電源ピンのできるだけ近くに 1 μ F のセラミック コンデンサ (C12) を配置して、VCC 電源をデカップリングする必要があります。このリファレンス デザインでは、レベル シフタ TXU0101 も使用して、THVD1454 の R ピンの 5V 信号を 3.3V 信号に変換し、MSPM0 の GPIO 入力電圧範囲と互換性を持つようにします。

THVD1454 は半二重モードで動作するため、DE ピンと /RE ピンは THVD1454 の方向制御ピンです。DE ピンと RE ピンは互いに接続されています。THVD1454 がデフォルトで受信モードで動作するように、プルダウン抵抗 R25 (10kΩ) を追加しています。

THVD1454 には、TERM ピンで制御される 120Ω の終端抵抗が内蔵されています。TERM ピンは MSPM0 GPIO PA4 に接続されており、MSPM0 ソフトウェアを使用して内部終端抵抗をイネーブルにします。

100kΩ のプルアップ抵抗 R15 とプルダウン抵抗 R22 は、それぞれ A と B に接続します。これらの抵抗は、トランシーバへの残留クランプ電流を制限し、トランシーバのラッチアップを防止します。

3.1.4 電源および基準電圧

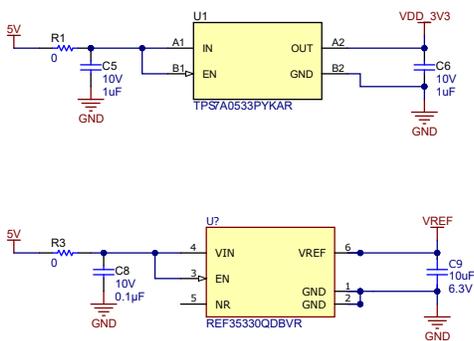


図 3-4. 電源回路図

このデザインでは、TPS7A0533 および REF3533 を使用して、基板上のデバイスに電力を供給しています。

TPS7A0533 は、最大 5.5V の入力電圧を受け入れて、TMAG6180、TLV9062、MSPM0G3507、THVD1454 の電源用に 3.3V レールを生成します。ノイズ デカップリング用に 2 つの並列コンデンサ C5 (1μF) を使用し、出力コンデンサ C6 (10μF) を使用して出力電圧リップルを最小限に抑えます。

REF3533 は、外部 5V 電源から電力を供給され、MSPM0 ADC の基準電圧として高精度の 3.3V 出力を生成します。TPS7A0533 と同様に、デカップリングに C8 (100nF) を使用します。C9 (1uF) は、出力電圧リップルを最小限に抑えるために使用します。

3.2 ソフトウェア設計

このリファレンス デザインを検証するために、M0 MCU 用 MSPM0 ソフトウェア開発キットを使用し、MSPM0G3507 でテキサス・インスツルメンツの社内テスト ソフトウェアを開発しました。

3.2.1 角度計算のタイミング

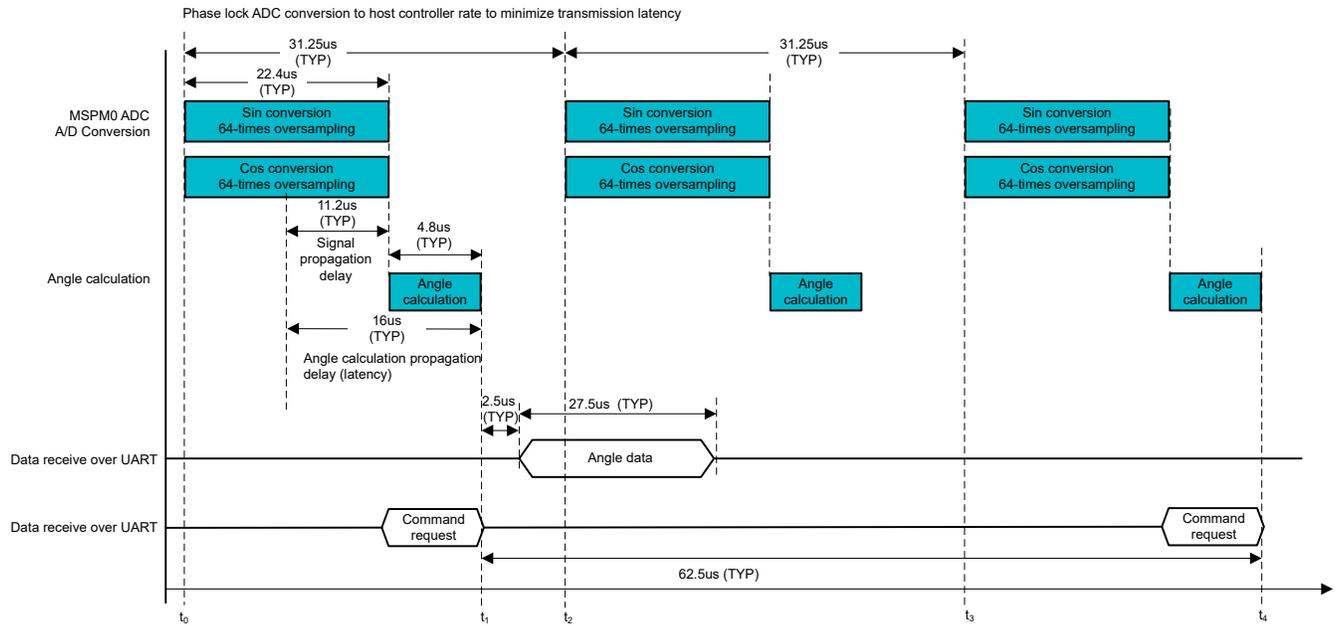


図 3-5. MSPM0G3507 タイミング図

このリファレンス デザインでは、デュアル ADC を内蔵した MSPM0G3507 が、TMAG6180 の正弦および余弦出力信号を変換します。MSPM0G3507 ADC は、64 倍のハードウェア平均化用に構成されており、内部 32kHz の Timer0 によって同時に周期的にトリガされます。ADC 変換終了によって割り込みがトリガされ、2 つの ADC 変換結果とホール ラッチ Q0 および Q1 のステータスが読み取られ、絶対角度が計算されます。

ホスト コントローラが位置データを取得するためのコマンド要求を送信すると、コントローラが MSPM0 で UART 割り込みをトリガします。その後、送信データがアレイに格納され、DMA コントローラがホスト コントローラに対して UART 送信を開始します。

Timer0 割り込みは、角度送信レイテンシとジッタを最小限に抑えるため、ホスト コントローラからのエンコーダ読み取りコマンド周波数にフェーズ ロックされます。

3.2.2 回転角度の計算

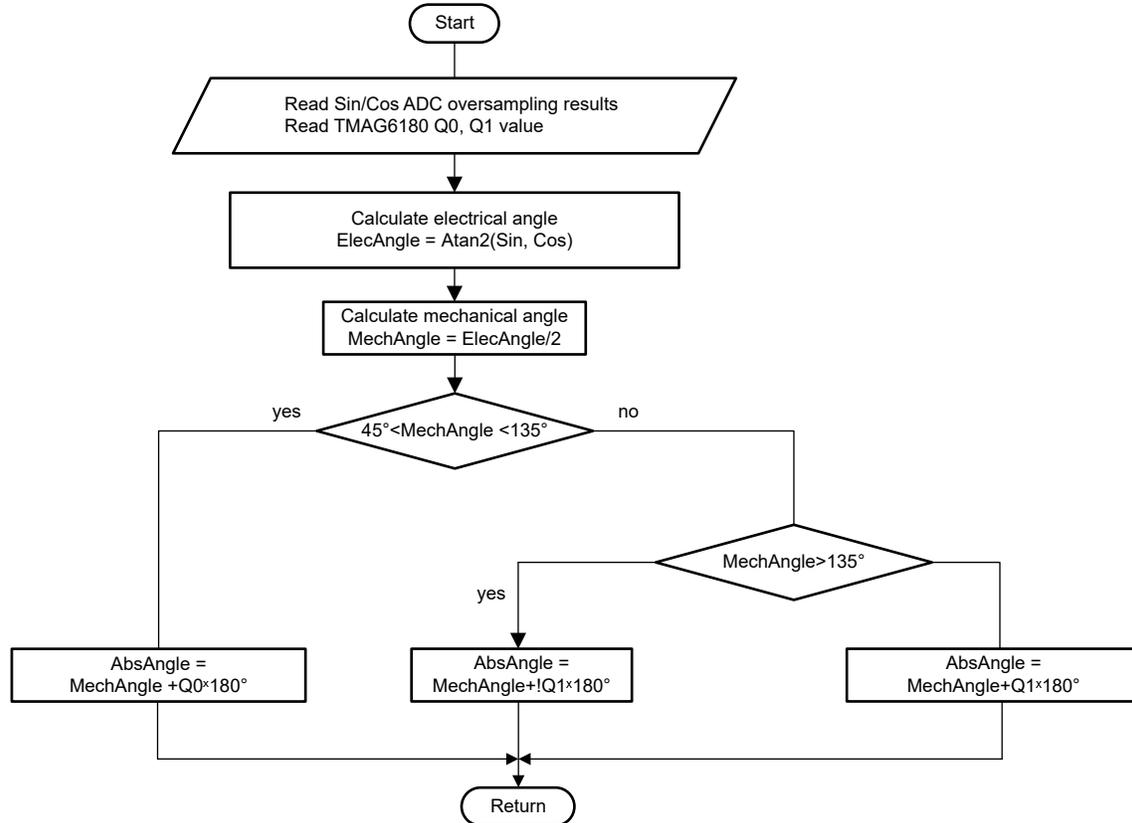


図 3-6. 角度計算のフローチャート

AMR センサは、機械的 1 回転に対して 2 つの正弦周期と余弦周期を生成するため、 $0^\circ \sim 180^\circ$ と $180^\circ \sim 360^\circ$ を区別するために追加センシングが必要です。そのため、TMAG6180 には 2 つの X、Y ホールスイッチが内蔵されており、Q0 と Q1 出力を使用して角度範囲を 180° から 360° に拡張できます。図 3-6 に角度計算のフローチャートを示し、その後にコード例を示します。

```

//-----
//Angle calculation
//-----
//comp0[0] = _IQ(0)
//comp0[1] = _IQ(1)
//comp1[0] = _IQ(1)
//comp1[1] = _IQ(0)
//-----
SinCosInput.SinCos.Sin = SinCosInput.SinCos.Sin - Adc16bitOffset;
SinCosInput.SinCos.Cos = SinCosInput.SinCos.Cos - Adc16bitOffset;
//ATAN2 calculation
DL_MathACL_startArcTan2Operation(MATHACL, &gAtanOpConfig, SinCosInput.SinCos.Sin,
SinCosInput.SinCos.Cos);
DL_MathACL_waitForOperation(MATHACL);
SinCosOutput.PhasePU = DL_MathACL_getResultOne(MATHACL);
angle = _IQ(0.25) - (SinCosOutput.PhasePU >> 1);
// Extend to 360 deg. 90 degree ~ 0.25, 45 degree ~ 0.125, 135 ~ 0.375
if((angle <= _IQ(0.375)) && (angle > _IQ(0.125)))
    absangle=comp0[TMAG_Q0]+angle;
else
{
    if (angle > _IQ(0.375))
        absangle=comp1[TMAG_Q1]+angle;
    else
        absangle=_IQ(0.5)-comp1[TMAG_Q1]+angle;
}
  
```

3.2.3 回転角度誤差の発生源と補償

角度を正確に測定するには、磁石の中心をセンサの中心に許容誤差内で揃える必要があります。最高の精度を得るためにセンサを校正するには、次の手順に従います。

- センサに対する磁石のアライメントに基づいて基準角度を設定します。この誤差は、実行時の絶対位置計算用にマイクロコントローラに保存できます。この誤差は、システムの角度オフセットとも呼ばれます。
- 電気的オフセットの校正手順については、『[AMR 角度センサの校正](#)』を参照してください。センサを全範囲で回転できない場合、電気オフセットは校正できません。
- 振幅の不一致の校正手順については、『[AMR 角度センサの校正](#)』を参照してください。センサを全範囲で回転できない場合、振幅の不一致を校正できません。

その他の誤差発生源には、3次高調波などのセンサ シグナル チェーンの非線形性と、基準角度エンコーダをアブソリュート磁気エンコーダのシャフトにカップリングすることによる機械的誤差が含まれます。この種の誤差を理解して補償できるようにするため、[図 3-7](#)～[図 3-10](#) に誤差の発生源と角度誤差への影響の概要を示します。

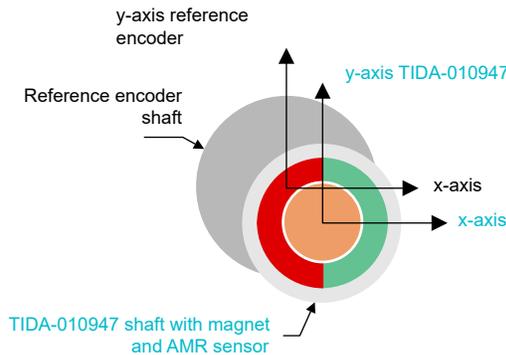


図 3-7. シャフト カップリングの機械的変位

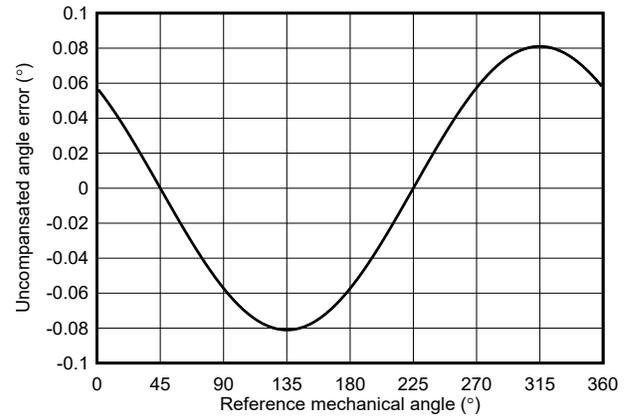


図 3-8. シャフトカップリングの変位による角度誤差の例

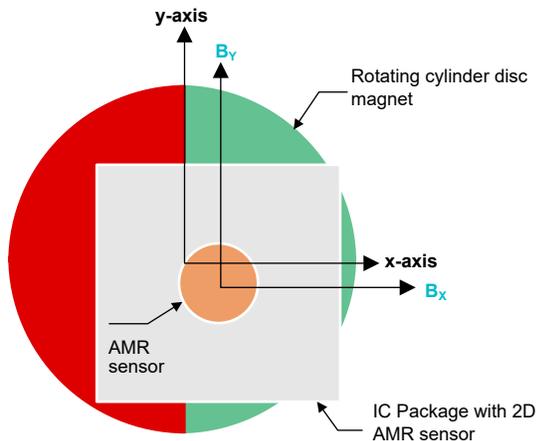


図 3-9. AMR センサの変位

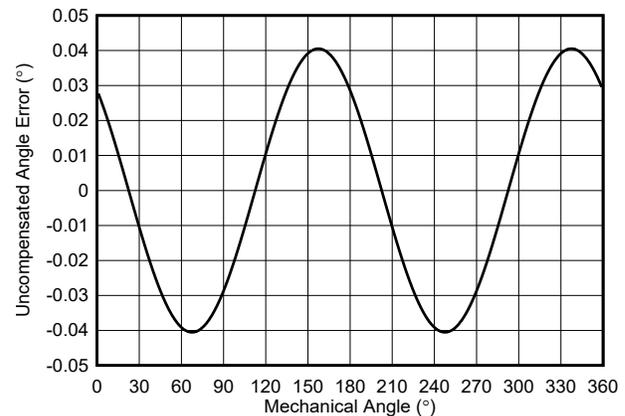


図 3-10. AMR センサの変位による角度誤差の例

センサ シグナル チェーンの電気的オフセット、ゲインの不一致、および非直線性 (3次高調波) は、角度誤差に影響を及ぼします。その例を[図 3-11](#)～[図 3-13](#) に示します。

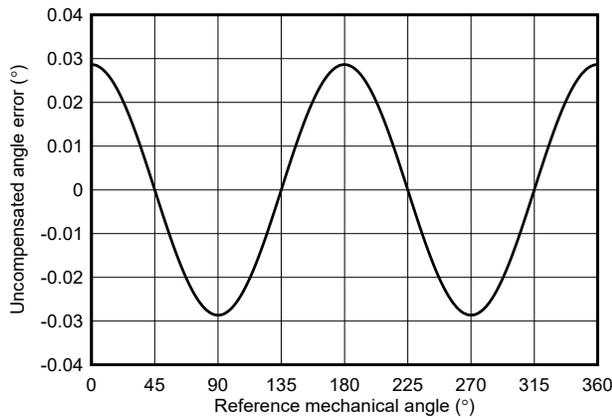


図 3-11. AMR 正弦 / 余弦シグナル チェーンのエラー (0.1%) による角度誤差の例

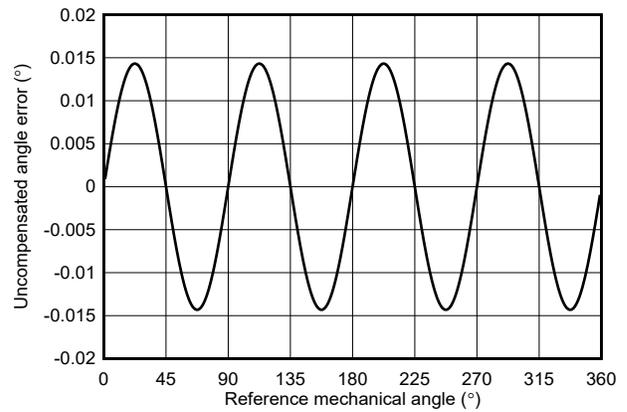


図 3-12. AMR 正弦 / 余弦シグナルゲインの不一致 (0.1%) による角度誤差の例

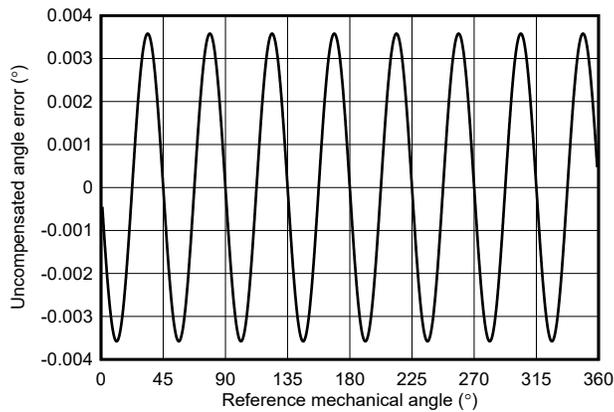


図 3-13. AMR 正弦 / 余弦シグナル チェーンのエラー (-0.1%) による角度誤差の例

表 3-1 に、角度誤差パターンへの影響をまとめます。

表 3-1. 誤差発生源と角度誤差高調波への影響

誤差発生源	シャフトカップリングの変位	AMR センサの変位	AMR センサシグナルチェーンのエラー	AMR センサシグナルチェーンのゲインの不一致	AMR センサシグナルチェーンの非直線性 (3 次高調波)
360 度を超える角度誤差高調波	1 次	2 次	2 次	4 次	8 次

角度位置計算アルゴリズムの詳細については、『[最高のシステム角度センシング精度を達成する方法](#)』アプリケーションノートを参照してください。

3.2.4 エンコーダ通信インターフェイス

この絶対エンコーダのリファレンス デザインは、RS485 インターフェイスを介してホストコントローラと通信し、角度データを送信します。この通信は、4M ボーレートの UART プロトコルで動作します。ホストコントローラは異なる T フォーマットコマンド要求を送信し、エンコーダは T フォーマットのプロトコルで規定された対応するフィールドで応答します。図 3-14 に通信例を示します。T フォーマットプロトコルの詳細については、[Tamagawa \(多摩川精機\) のエンコーダカタログ](#)を参照してください。

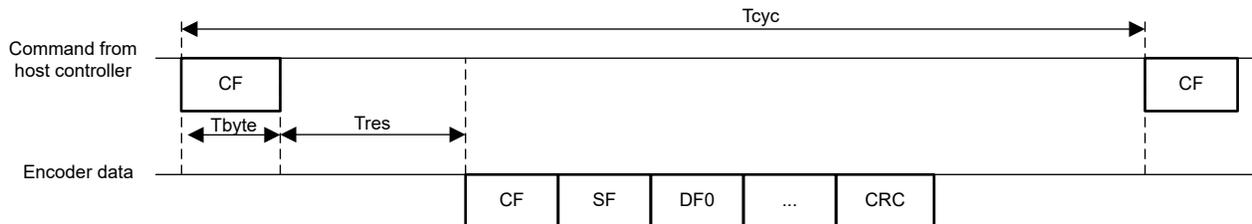


図 3-14. コマンド要求

ソフトウェアは ID3 コマンドに応答するように構成されています。このコマンドは、コマンド フィールド、ステータス フィールド、単回転データ フィールド、エンコーダ ID、多回転フィールド、アラーム フィールド、CRC フィールドを含む、合計 11 バイトのエンコーダ データをすべて返す必要があります。表 3-2 にフィールド形式を示します。角度は MCU で IQ21 フォーマットで計算されるため、角度データの送信には 3 バイトのデータフィールドが必要です。

表 3-2. フィールド形式

	Bit1	Bit2	Bit3	Bit4	Bit5	Bit6	Bit7	Bit8	Bit9	Bit10
コンテンツ	スタートビット、常に 0	この内容はフィールドによって異なります。これら 8 ビットのデータは CRC の計算に含まれます。								スタートビット、常に 1

4 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

4.1 ハードウェア要件

4.1.1 PCB の概要

図 4-1 と図 4-2 に PCB の上面図と底面図を示します。

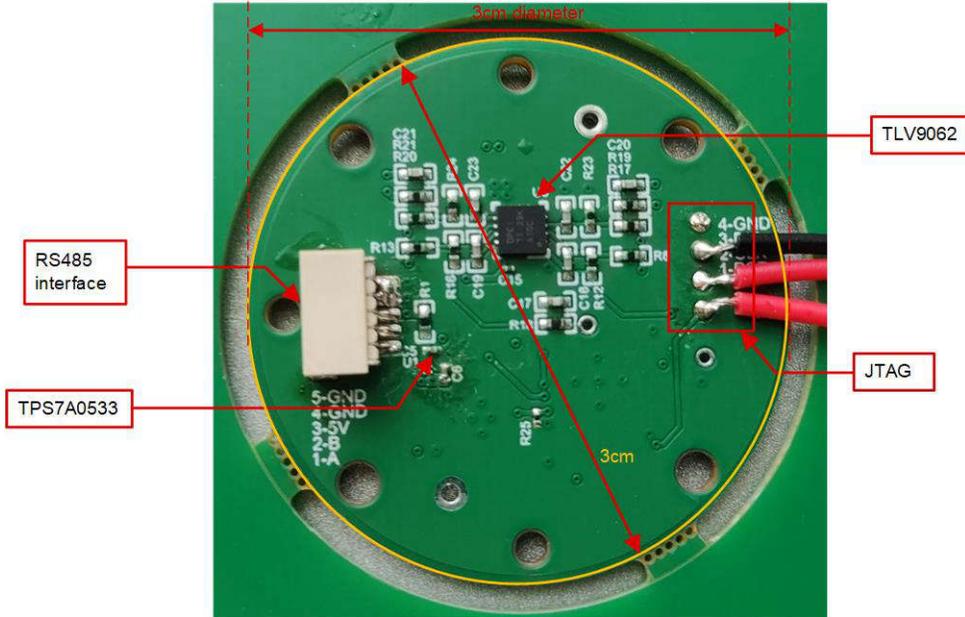


図 4-1. PCB の上面図

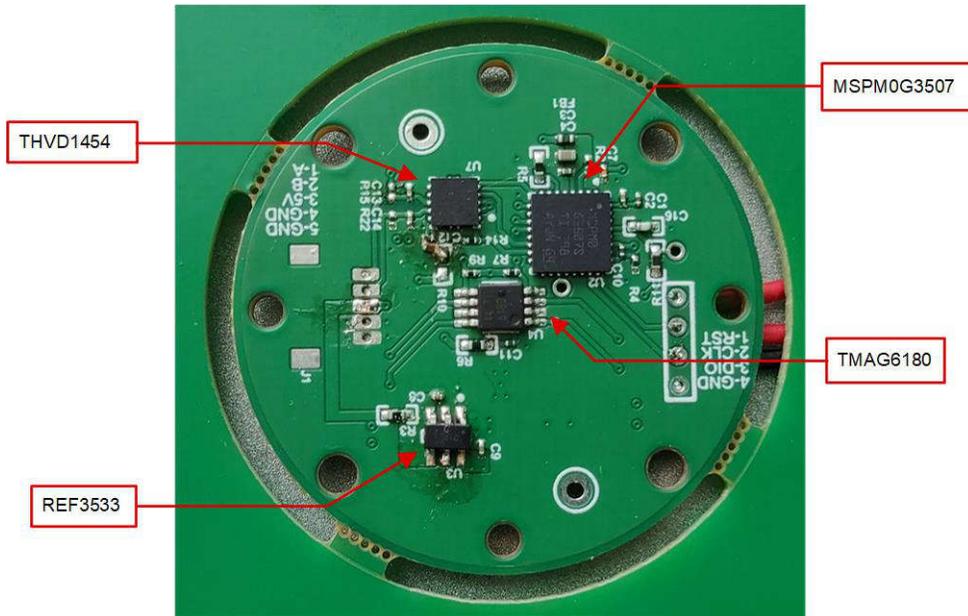


図 4-2. PCB の底面図

4.1.2 エンコーダと JTAG インターフェイス

表 4-1 と表 4-2 に TIDA-010947 のインターフェイスを示します。J1 は RS485 データ通信インターフェイスです。ホスト MCU との通信用に、このインターフェイスで T フォーマットが実装されます。J2 は MSPM0 MCU への JTAG インターフェイスで、ソフトウェアのダウンロードとデバッグに使用されます。

表 4-1. エンコーダのインターフェイス

ピン	信号	コメント
J1-1	DATA+	RS485 の DATA+ 信号
J1-2	DATA-	RS485 の DATA- 信号
J1-3	5V 電源	外部電源
J1-4	GND	-
J1-5	GND	-

表 4-2. JTAG インターフェイス

ピン	信号	コメント
J2-1	RST	入力
J2-2	CLK	入力
J2-3	DIO	入力 / 出力
J2-4	GND	-

4.1.3 ソフトウェア要件

このリファレンス デザインを検証するために、M0 MCU 用 M0 ソフトウェア開発キットを使用し、MSPM0G3507 でテキサス・インスツルメンツの社内テスト ソフトウェアを開発しました。

表 4-3. 主なソフトウェア構成

サブシステム	パラメータ	値
ADC0、ADC1	サンプリング時間	250ns
	変換時間	100ns
	ハードウェア平均化	64 倍
UART	ボーレート	4M
	ワード長	8bit
割り込み	ADC トリガ周波数 (Timer0)	32kHz
	位置計算周波数	32kHz

4.2 テスト構成

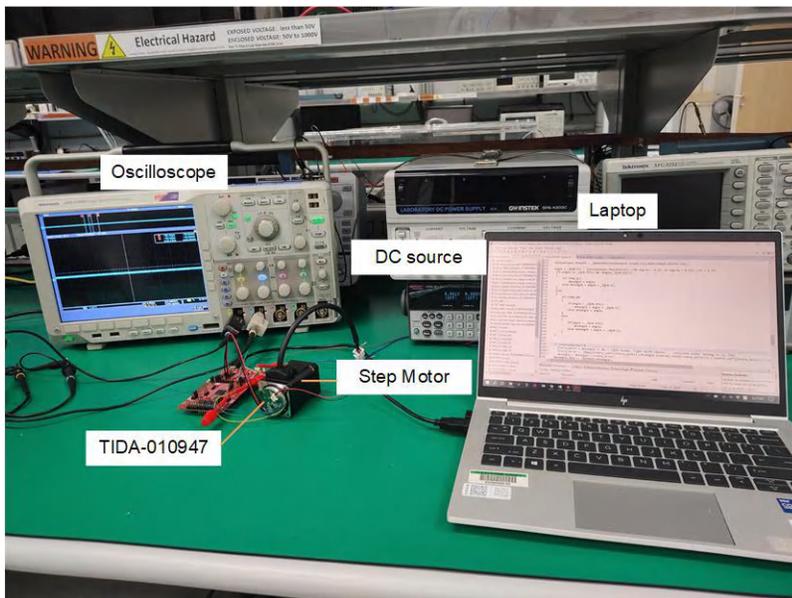


図 4-3. テスト構成

図 4-3 に、ラボでの静的ノイズのテスト構成を示します。回転角度精度テストは外部のラボで行われたため、写真はありません。

4.3 テスト結果

4.3.1 AMR センサの正弦出力および余弦出力の測定

図 4-4 と図 4-5 に、MSPM0G3507 ADC の入力でシングルエンドに変換される AMR センサの正弦および余弦信号を機械的な半回転 (0~180 度) の範囲で示します。信号は 1.65V にバイアスされ、ピークツーピークの振幅は約 2V です。最大電圧は約 2.65V で、最小電圧は約 0.65V です。MSPM0 の内部 ADC の全入力範囲は、外部 REF3533 基準を使用して 3.3V です。つまり、AMR センサはフルスケールレンジの 62% を使用しており、シグナルチェーンのゲインやオフセットの変化に十分なヘッドルームを確保できます。

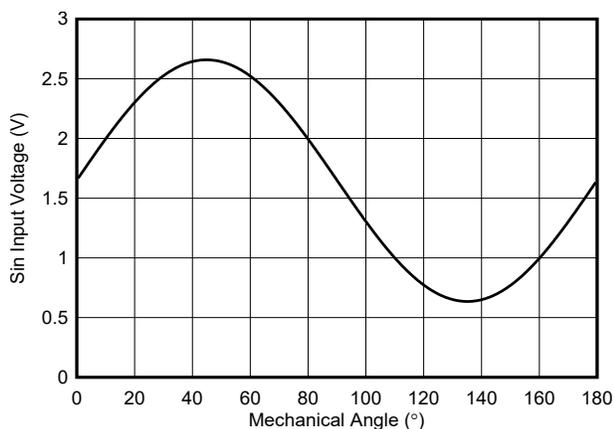


図 4-4. MSPM0 ADC1 入力におけるシングルエンド AMR センサの正弦波

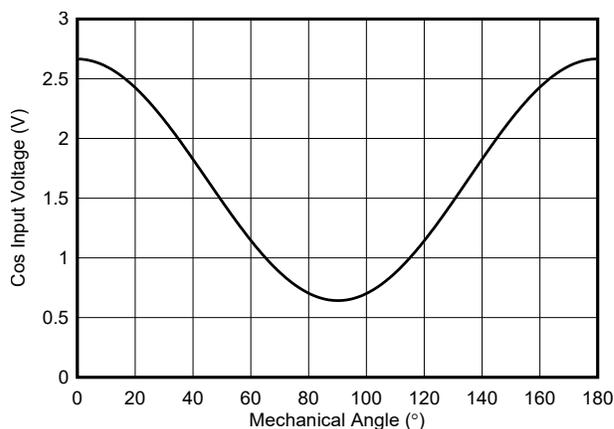


図 4-5. MSPM0 ADC0 入力におけるシングルエンド AMR センサの余弦波

信号対雑音比と有効ビット数を測定するため、32kHz のサンプルレートと固定角度で正弦信号と余弦信号を 2000 回連続で測定します。

以下の 2 つの図に、オフセット補正された正弦信号と余弦信号を 62.5ms の時間領域で示します。対応する A/D 変換された正弦および余弦入力信号から 1.65V バイアス電圧を減算しています。ピークツーピークノイズは 0.6mV 以内です。図 4-6 と図 4-7 に、正弦信号と余弦信号の対応するヒストグラムを示します。

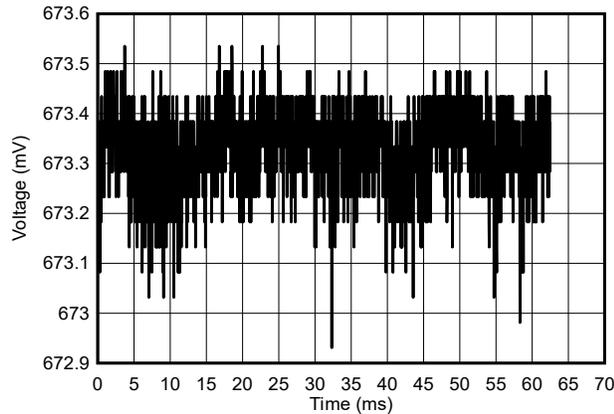


図 4-6. 機械的角度 67.48° での AMR センサの正弦電圧信号、バイアス電圧補正あり

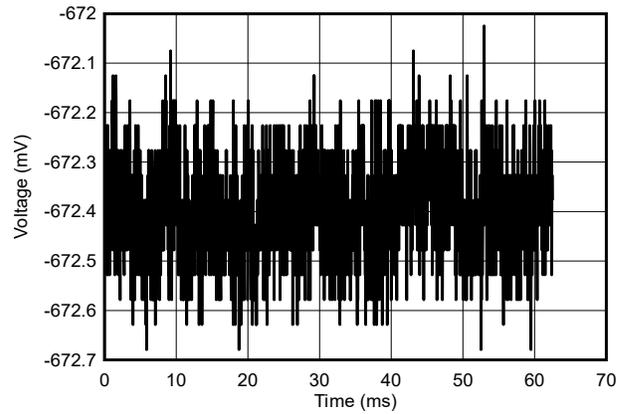


図 4-7. 機械的角度 67.48° での AMR センサの余弦正弦電圧信号、バイアス電圧補正あり

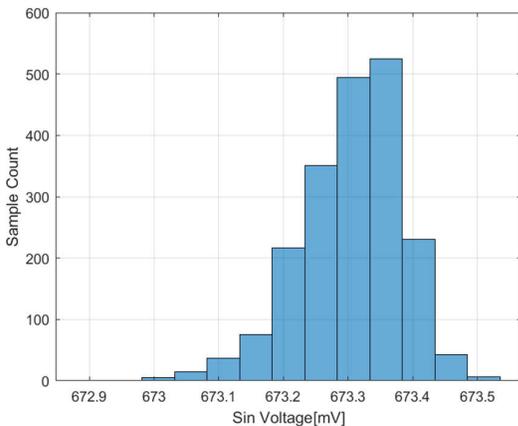


図 4-8. ヒストグラム正弦信号、サンプル数 2000

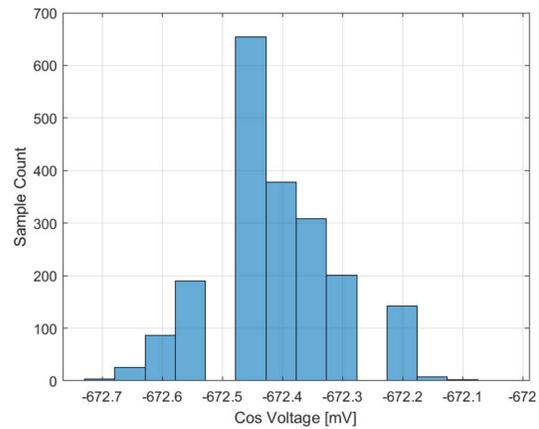


図 4-9. ヒストグラム余弦信号、サンプル数 2000

表 4-4 に、フルスケールレンジでの標準偏差、信号対雑音比 (SNR)、有効ビット数 (ENOB) を示します。ADC が 64 倍平均化モードの場合、SIN 信号の ENOB は 13.3 ビット、COS 信号の ENOB は 13 ビットです。

表 4-4. TMAG6180 のフルスケールレンジでの標準偏差、SNR、ENOB

パラメータ	X 軸	Y 軸	コメント
標準偏差 [mV]	0.082	0.101	RMS
正弦 / 余弦振幅 [V]	1	1	peak
SNR [dB]	81.7	80	dB
ENOB [bit]	13.3	13	ビット

4.3.2 静的角度ノイズの測定

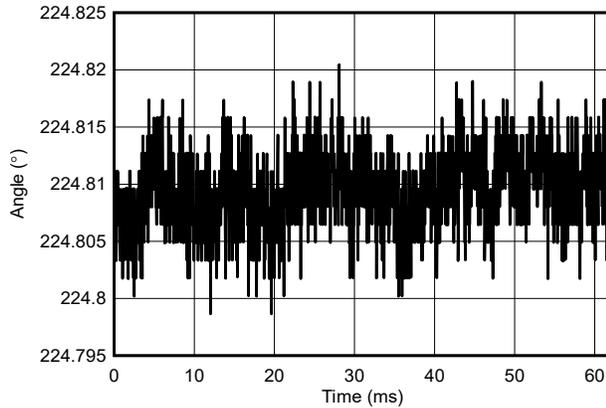


図 4-10. 224.8°、サンプル数 2000、サンプルレート 32kHz での静的角度

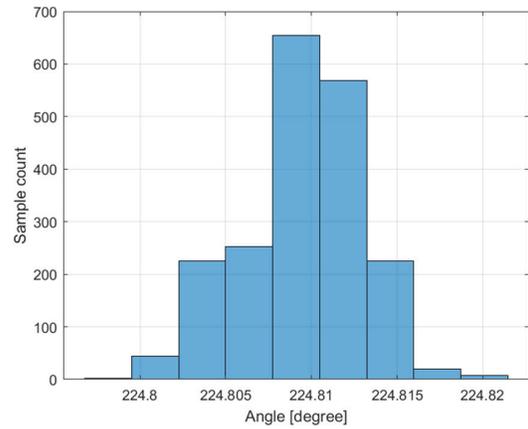


図 4-11. 224.8°、サンプル数 2000、ビン幅 1LSB (17 ビット) での角度のヒストグラム

モーター シャフトを 224.8° の機械的角度で固定します。MSPM0 は 32kHz で角度を計算します。2000 個の角度サンプルを取得し、時間領域の図 (図 4-10) とヒストグラム (図 4-11) をプロットします。

表 4-5 に、フルスケール位置測定範囲と、対応する標準偏差および ENOB を示します。角度ノイズの RMS は 0.0033° であり、360° のフルスケール、15.4 ENOB に対して SNR が 94.7dB であることを意味します。

表 4-5. TMAG6180 の静的角度 224.8° での標準偏差、SNR、ENOB

パラメータ	値	コメント
標準偏差 [°]	0.0033	RMS
フルスケール レンジ [°]	0-360	
SNR [dB]	94.7	SNR = 20 × log10(±180°/STDEV)
ENOB [ビット]	15.4	ENOB = (SNR - 1.76)/6.02

無相関のノイズであると想定すると、絶対機械角度の理論的な総分解能は、64 倍オーバーサンプリングの 12 ビット ADC を含む AMR センサの正弦と余弦のシグナル チェーンの有効ビット数 (ENOB) より 2 ビット増加する可能性があります。電氣的 AMR センサの 1 周期にわたる正弦 / 余弦の補間角度の理論的分解能は、正弦および余弦サブシステムの ENOB + 1 ビットに等しくなります。このデザインでは、機械的回転ごとに 2 電氣的周期であるため、1 ビットが追加されます。

モーター シャフトの角度を 22.5° の間隔で変更します。各角度で 2000 個のサンプルを取得します。表 4-6 と表 4-7 に対応する RMS とピーク ツー ピーク値を示します。ピーク ツー ピークの静的角度ノイズは約 0.02° で、最大値は 225° で発生します。

表 4-6. 最初の半回転における静的角度ノイズ (0°~180°)

機械的角 [°]	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
標準偏差 [°]	0.0025	0.0020	0.0028	0.0027	0.0026	0.0022	0.0028	0.0028
ピーク ツー ピーク [°]	0.0185	0.0160	0.0227	0.0185	0.0184	0.0173	0.0182	0.0192

表 4-7. 2 番目の半回転における静的角度ノイズ (180°~360°)

機械的角 [°]	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
標準偏差 [°]	0.0029	0.0024	0.0031	0.0032	0.0026	0.0027	0.0019	0.0027
ピーク ツー ピーク [°]	0.0182	0.0182	0.0225	0.0245	0.0184	0.0182	0.0151	0.0206

図 4-12 に、機械的 1 回転におけるピーク ツー ピーク角度ノイズを示します。黒で示されており、左側の Y 軸を基準としています。角度の標準偏差は赤で示され、右の Y 軸を基準としています。

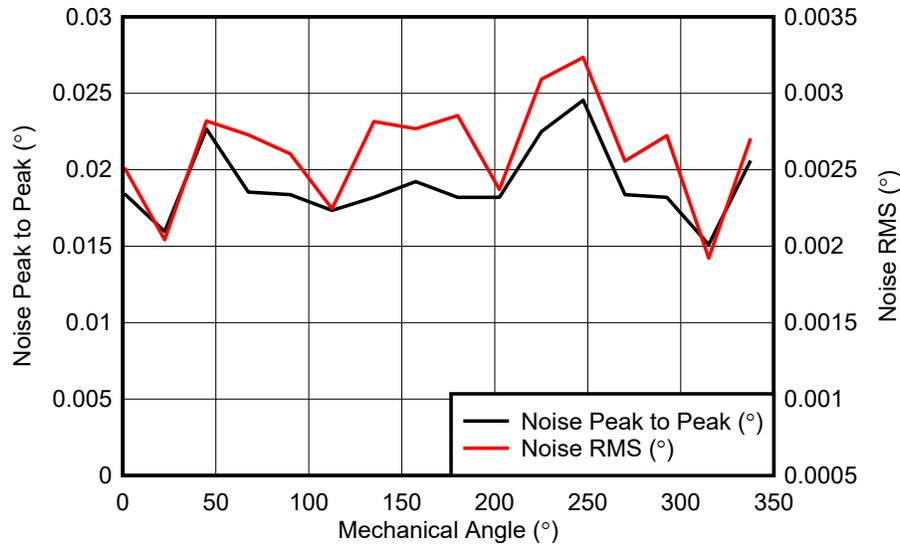


図 4-12. 1 回転にわたる静的角度ノイズ

表 4-8. 静的角度ノイズとエアギャップとの関係

機械的角度 [°]	0	45	90	135	180	225	270	315
エアギャップ 0.8mm での標準偏差 [°]	0.0031	0.0025	0.0020	0.0029	0.0027	0.0033	0.0032	0.0031
エアギャップ 2.3mm での標準偏差 [°]	0.0038	0.0024	0.0035	0.0031	0.0035	0.0034	0.0034	0.0033

有効エアギャップを 2.3mm に変更し、異なる機械的角度での静的角度ノイズを測定します。テスト結果を表 4-8 に比較します。最大ノイズ RMS は、エアギャップ 2.3mm では 0.0038°、エアギャップ 0.8mm では 0.0033° です。エアギャップを大きくするとノイズがわずかに増加する可能性があります、SNR と ENOB への影響は小さいと考えられます。

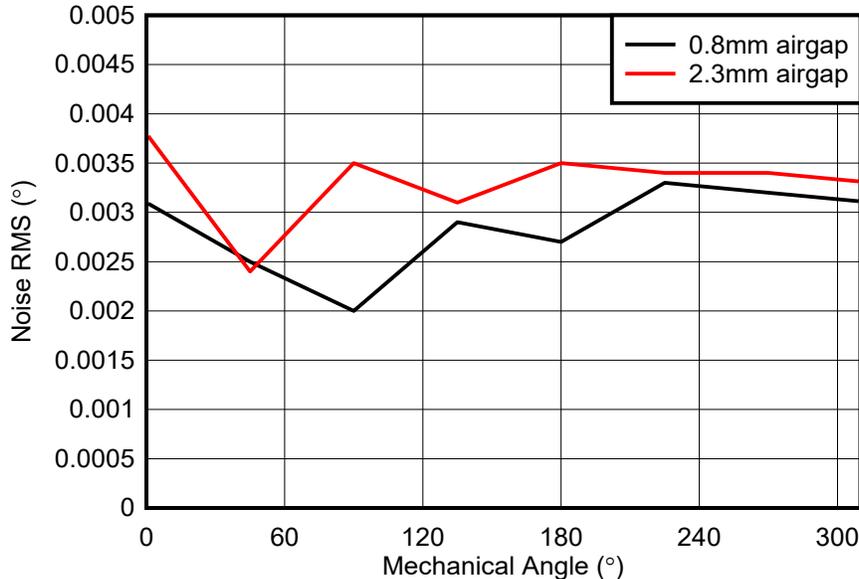


図 4-13. 静的角度ノイズとエアギャップとの関係

4.3.3 回転角度精度の測定

このセクションでは、モーターが一定速度で動作しているときの角度精度をテストします。テストプラットフォームでは、テスト対象のモーターをサーボモーターで 30RPM で駆動します。ホストコントローラは 16kHz の周波数で位置データ要求コマンドを送信し、基準エンコーダと TIDA-010947 の位置データを収集できます。基準エンコーダと TIDA-010947 のデータを比較し、回転角度精度を取得します。

磁気システムのシミュレーションにテキサス・インスツルメンツの磁気センスシミュレータ (TIMSS) ツールを使用すると、磁気システムの設計と評価を迅速化できます。

エアギャップを 0.8 mm に保ち、1 回転で 30000 個の角度サンプルを収集します。図 4-14 に回転角度精度を示します。オフセットとゲインの較正なしでは、ピークツーピーク誤差は 0.28° です。ポストキャリブレーションを使用して 1 次および 2 次高調波を補償すると、図 4-14 に示すように、誤差を ±0.032° に低減できます。

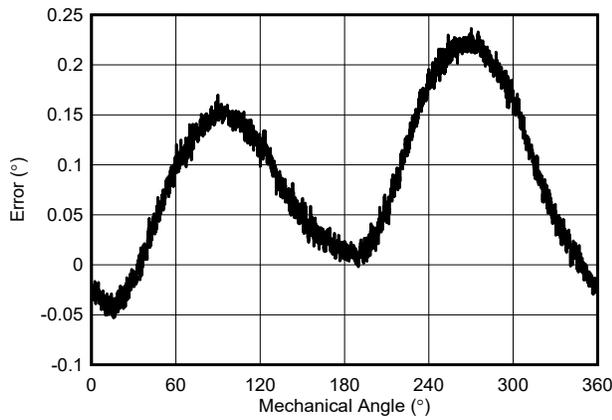


図 4-14. エアギャップ 0.8mm での較正なしでの回転角度精度

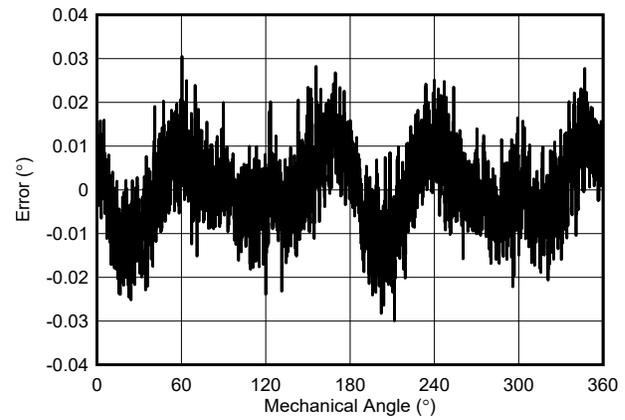


図 4-15. 周囲温度 25°Cでのオフセット較正後の回転角度精度

再現性テストを行うには、2 回転にわたって角度データを継続的にサンプリングします。同じ較正パラメータを使用して、2 サイクルの較正結果を比較します。図 4-16 に結果を示します。Cycle1 と Cycle2 のデータはほぼ完全にオーバーラップしており、TIDA-010947 の優れた再現性を示しています。

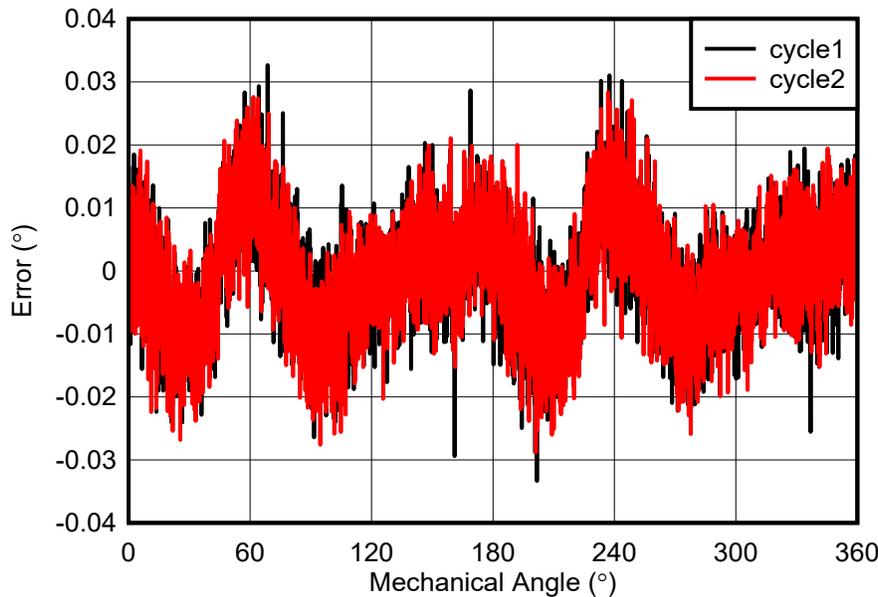


図 4-16. 周囲温度 25°Cでのオフセット較正後の回転角度精度、再現性テスト

4.3.3.1 エアギャップがノイズ、高調波、総角度精度に及ぼす影響

エアギャップが大きくなると、磁界が小さくなり、位置センサのノイズが大きくなる可能性があります。このセクションでは、エアギャップが TIDA-010947 に及ぼす影響を分析します。ガスケットを使用して、エアギャップを 0.3 mm～2.3 mm の間で変化させます。セクション 4.3.3 で説明したテスト手順を繰り返します。テスト結果を図 4-17～図 4-20 に示します。すべてのエアギャップで、較正を使用した場合の誤差は $\pm 0.037^\circ$ 未満です。

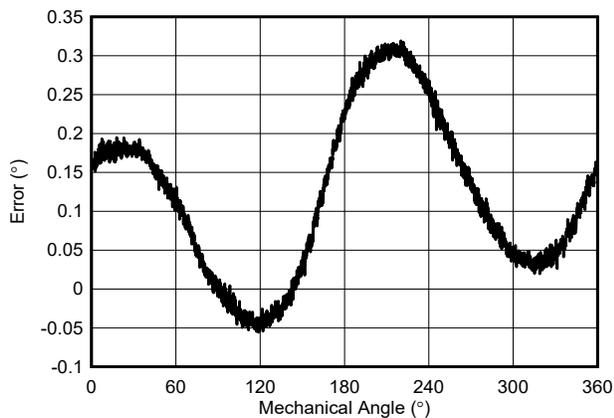


図 4-17. エアギャップ 0.8mm、較正ありでの回転角度精度

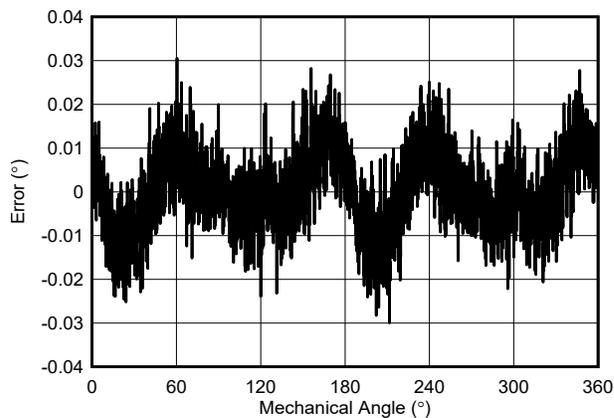


図 4-18. エアギャップ 0.8mm、較正ありでの回転角度精度

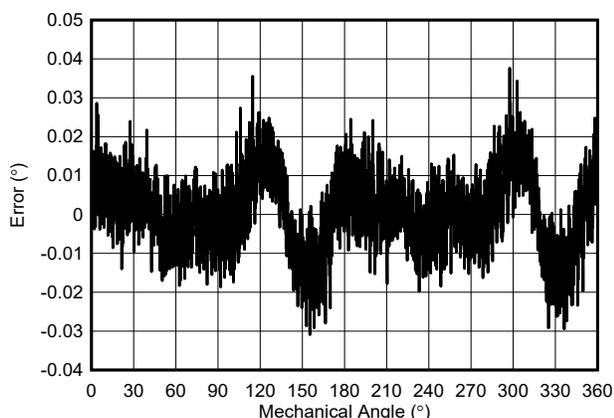


図 4-19. エアギャップ 1.3mm、較正ありでの回転角度精度

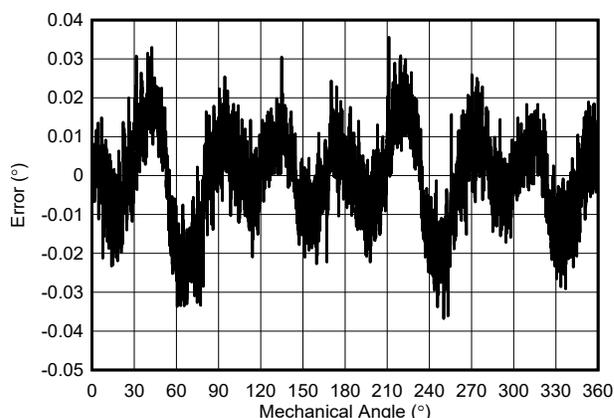


図 4-20. エアギャップ 2.3mm、較正ありでの回転角度精度

エアギャップが高調波に及ぼす影響をさらに分析するため、FFT 分析を使用します。結果を表 4-9 に示します。4 次高調波はシグナル チェーンのゲインの不一致に起因しており、エアギャップの影響は受けません。8 次高調波は AMR センサとシグナル チェーンの非線形性に起因しており、エアギャップが大きくなると、8 次高調波の値が大きくなる可能性があります。

表 4-9. 角度誤差および高調波とエアギャップとの関係

エアギャップ	オフセット較正後の角度誤差 [°]	4 次高調波 [°]	8 次高調波 [°]
0.3mm	< 0.04°	0.0086	0.0015
0.8mm	< 0.04°	0.006	0.0012
1.3mm	< 0.04°	0.0062	0.0041
2.3mm	< 0.04°	0.0058	0.0113

5 設計とドキュメントのサポート

5.1 デザイン ファイル

5.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-010947](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-010947](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.3 PCB レイアウト

PCB レイアウトをダウンロードするには、[TIDA-0147](#) でデザイン ファイルを検索してください。

5.1.4 Altium プロジェクト ファイル

Altium プロジェクト ファイルをダウンロードするには、[TIDA-010947](#) でデザイン ファイルを検索してください。

5.1.5 ガーバー ファイル

ガーバー ファイルをダウンロードするには、[TIDA-010947](#) でデザイン ファイルを検索してください。

5.1.6 アセンブリの図面

アセンブリの図面をダウンロードするには、[TIDA-010947](#) でデザイン ファイルを検索してください。

5.2 ツールとソフトウェア

ツール

TI-MAGNETIC-SENSE-SIMULATOR

機械式運動とセンサ出力への対応機能搭載、磁気シミュレーション ソフトウェア。

ソフトウェア

MSPM0-SDK

MSPM0 SDK は、MSPM0 MCU プラットフォーム向けアプリケーションの開発を迅速化するためのソフトウェア、ツール、文書の究極のコレクションを単一のソフトウェア パッケージに収録しています。

MSP-IQMATHLIB

テキサス・インスツルメンツ® の MSP IQmath および Qmath ライブラリは、C プログラム向けの高度に最適化された高精度の数学関数ライブラリで、MSPM0、MSP430、MSP432 の各デバイスで、浮動小数点アルゴリズムを固定小数点コードにシームレスに変換できます。

5.3 ドキュメントのサポート

1. テキサス・インスツルメンツ、[『AMR 角度センサの較正』](#)、アプリケーション ノート
2. テキサス・インスツルメンツ、[『最高のシステム角度センシング精度を達成する方法』](#)、アプリケーション ノート
3. テキサス・インスツルメンツ、[『テキサス・インスツルメンツ磁気検出シミュレータの機能入門』](#)、アプリケーション ブリーフ
4. 多摩川精機、[ロータリー エンコーダ カタログ](#)、製品カタログ

5.4 サポート・リソース

テキサス・インスツルメンツ E2E™ サポート・フォーラムは、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしったりすることで、設計に必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの[使用条件](#)を参照してください。

5.5 商標

テキサス・インスツルメンツの™, Arm™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

Cortex® is a registered trademark of Texas Instruments.
すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

6 著者について

YUFENG ZHANG は、テキサス・インスツルメンツの産業システム モーター ドライブ チームのシステム エンジニアであり、産業用ドライブ向けシステム デザインの仕様策定と開発を担当しています。

MARTIN STAEBLER は、テキサス・インスツルメンツの産業システム モーター ドライブ チームのシニア メンバー テクニカル スタッフであり、産業用ドライブ向けシステム デザインの仕様策定と開発を担当しています。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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ます。

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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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 © 2024, Texas Instruments Incorporated

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](#) 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated