

Design Guide: TIDA-010961

高分解能、低レイテンシ、低消費電力の絶対誘導性角度エンコーダのリファレンス デザイン

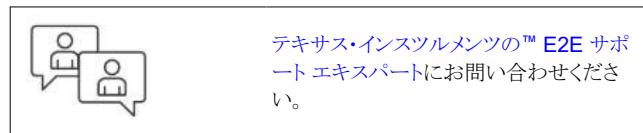


説明

このリファレンス デザインは、高分解能の絶対誘導性角度エンコーダを提示します。回転する導電性ターゲットプリント基板 (PCB) がこの設計の一部を形成しています。固定 PCB には、励起コイルと Nonius レシーバコイルに加えて、インダクタコンデンサ (LC) 発振器と正弦 余弦インターフェイスを備えたデュアル非接触型誘導性センサ フロントエンドが含まれています。4MSPS アナログ - デジタルコンバータ (ADC) 付き Arm® Cortex®-M0 マイクロコントローラ (MCU) が絶対角度を計算します。

リソース

TIDA-010961	デザイン フォルダ
LDC5072, MSPM0G3507	プロダクト フォルダ
TPSM365R3, REF3533	プロダクト フォルダ
TLV9062	プロダクト フォルダ

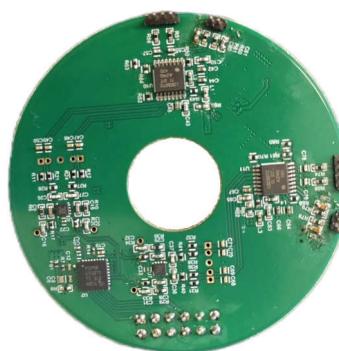
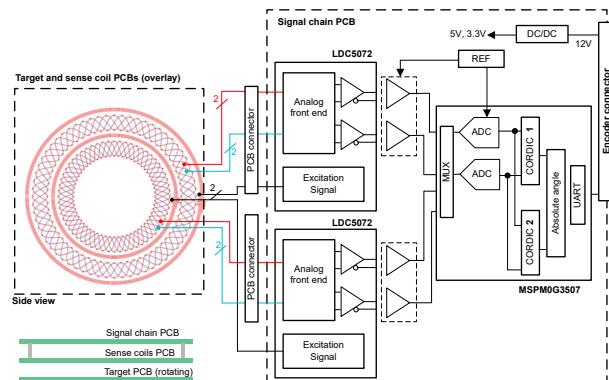


特長

- 絶対角度分解能 16.6 の有効ビット数 (ENOB)、静的角度精度 0.04、非常に短いレイテンシの 9.6μs
- 直径 58mm の導電性ターゲット/センス PCB は、1 回転あたり 16 周期および 15 周期で 2 個の Nonius コイルを使用しているため、低高さの設計が可能です
- 浮遊磁界に対する耐性により、リゾルバの置き換えとシステムコストの低減、500mW 未満の低消費電力、高い精度を実現できます
- 非接触型の誘導性位置センシング向けの内蔵アナログ フロントエンド IC を採用すると、磁石が不要になり、システムコストを低減できます
- デュアル 12 ビット A/D コンバータ (ADC)、オーバーサンプリング、三角関数演算アクセラレータを統合した MCU により、解像度の向上とシステムコストの削減が可能

アプリケーション

- サーボ ドライブ位置センサ
- ロボットの位置センサ
- ヒューマノイド (ヒト型ロボット) の位置センサ
- トラクション インバータ



1 システムの説明

シングルターンまたはマルチターンの絶対回転角度エンコーダは、精密な機械的角度位置決めが必要なサーボドライブ、産業用ロボット、協働型ヒューマノイドロボットなどのさまざまなアプリケーションに対応しています。位置センサの主な種類は、光学式、磁気式、誘導式、または静電容量式です。近くの配線に大きな電流が流れるため、高度なセンサ技術が必要になります。一例が誘導性センサです。これは、磁気系の環境で効果的に動作します。誘導性センサは外部の浮遊磁界に対する耐性があり、信頼性の高い測定を実現します。

図 1-1 は、このリファレンス デザインが絶対シングルターン誘導回転角度エンコーダをどのように実証するかを示しています。この誘導性エンコーダは、3 枚のプリント基板 (PCB)、回転モーターシャフトに接続された回転ターゲット PCB、固定コイルおよびシグナルチェーン PCB で構成されます。

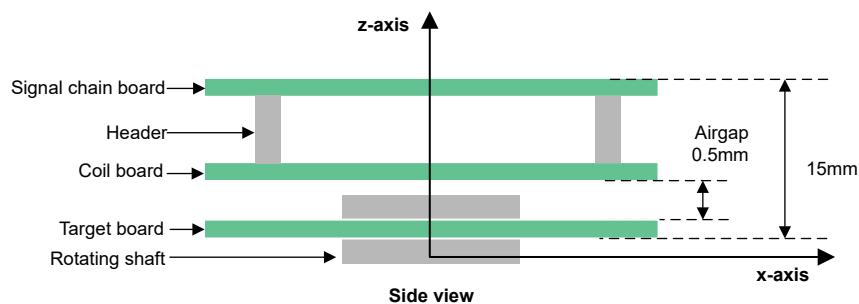


図 1-1. 誘導性角度センシングの原理

コイル PCB には、2 組のエキサイタコイルとレシーバコイルがあります。2 組のレシーバコイルは、起動時の絶対位置を検出するために 1 回転あたり 16 および 15 の期間を実装しており、1 回転あたりの周期が短いよりも高い分解能を実現します。コイル PCB は、デュアル LDC5072 誘導性フロントエンドと MSPM0G3507 マイクロコントローラを使用する信号チェーン PCB に接続されています。図 1-2 は、回転ターゲット PCB が、PCB 上に印刷された導電性のデュアルパタンと 58 mm の直径を持つパッシブディスクであることを示しています。

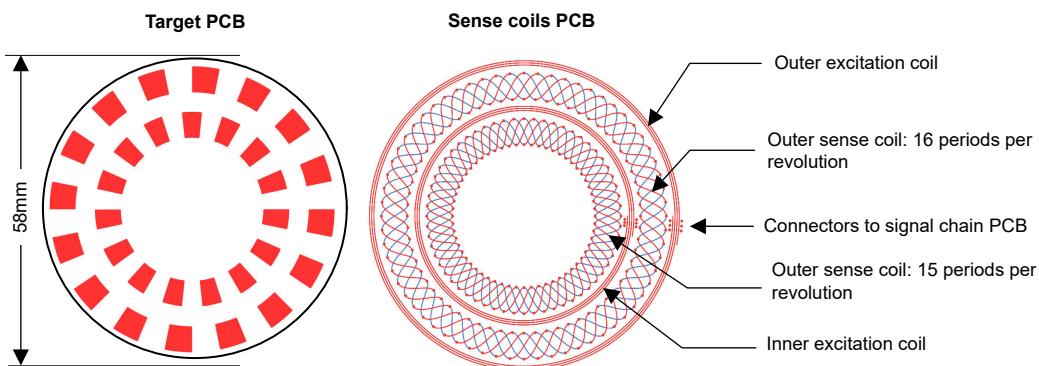


図 1-2. ターゲット/センスコイル PCB

2 つの LDC5072 誘導性フロントエンド IC はそれぞれ高周波励起信号を生成します。これらの信号は、対応する励起コイルに直接注入されます。励起コイルは、レシーバコイルに対するターゲットの回転角度位置に応じて、レシーバコイルに 2 次電圧を生成します。受信コイルからの電圧を読み取ることによって、位置の信号表現が得られます。2 つの LDC5072 デバイスはそれぞれ信号を処理し、高周波励起周波数を除去し、電気角を追跡する振幅変調差動アナログ正弦信号と余弦信号を生成します。MSM0G3507 の内蔵 ADC は、LDC5072 出力信号を 32kHz のレートでサンプリングします。このセンサは、2 つの信号トラック (1 つは 16 周期、もう 1 つは 15 周期) で初期ゲインおよびオフセット較正を実行します。次に、センサは回転位置起動を検出し、高分解能の絶対角度を連続的に計算します。

1.1 主なシステム仕様

表 1-1 に、このリファレンス デザインの主な仕様を示します。

表 1-1. TIDA-010961 主な設計仕様

パラメータ	値(標準値)	備考
機能	シングルターン誘導型絶対角度エンコーダ	—
誘導性センサの種類	LDC5072-Q1 誘導性アナログ フロントエンド	—
センス PCB コイルの外径	58mm	—
センス PCB コイルシャフト孔	16mm	—
外側コイルの周期	16	—
コイルの内側の周期	15	—
ターゲット PCB とセンス PCB の間の空間距離	0.5mm(標準値)、1.2mm(最大値)	設定可能。図 1-1 の定義を参照してください
角度の精度	≤ 0.04°	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(標準偏差)	≤ 0.0015°	—
角度分解能(ENOBI)	有効ビット数(ENOBI): 16.6	—
角度分解能(値)	32 ビット(IQ21)	MSPM0G3507 に固有のカスタム
角度伝搬遅延(レイテンシ)	9.6μs	誘導性センスコイルの実効サンプリング ポイント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	構成可能
最大動作速度	未テスト	ローパス フィルタ コンデンサを増加するように変更します。 セクション 3.1.3.1 を参照してください
A/D コンバータ	8 倍オーバーサンプリング デシメーション フィルタを備えたデュアル 12 ビット ADC	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
エンコーダ コネクタ	12 ピンコネクタ	表 4-2 を参照
インターフェイス	UART	2.5M ポーレート
電源電圧	12V ±10%	—
12V 入力での消費電力	468mW	—
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
シグナル チェーンの PCB 層	6	—

2 システム概要

2.1 ブロック図

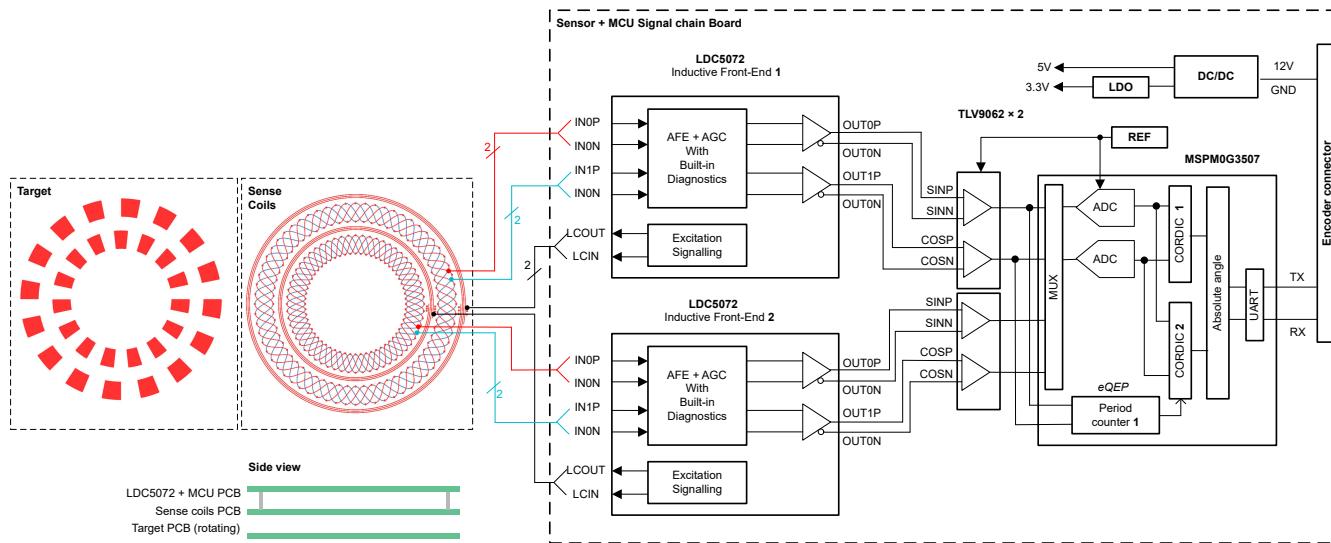


図 2-1. システム ブロック図

2.2 設計上の考慮事項

誘導性エンコーダは、外部の浮遊磁界に対する固有の耐性、低コスト、比較的高い分解能という特長から、産業用位置センシング アプリケーションの分野で新たなトレンドとなっています。機械式リゾルバは外部の浮遊磁界への耐性がありますが、PCB ベースの誘導性角度センサはシステムコストの低減、低消費電力での動作、より高い精度を実現するほか、産業用ドライブに対する高い EMC 耐性の双方向デジタルインターフェイスを備えた内蔵デジタル処理機能を備えています。

誘導性センス技術は通常、ターゲットボードとコイルボードを必要とします。導電性ターゲットボードは PCB にパターンをプリントでき、コイルボードにはレシーバコイルと励起コイルの両方が搭載されています。コイル PCB は静止していますが、ターゲット PCB はモーターシャフトに取り付けられ回転します。励起コイルは、レシーバコイルに対するターゲットの位置に応じて、レシーバコイルに 2 次電圧を生成します。位置の信号表現は、受信コイルからの電圧を読み取って処理し、ターゲット位置の正弦成分と余弦成分を表すアナログ出力を生成することによって得られます。

図 2-1 が示すように、誘導式エンコーダは通常、より高い解像度を得るために多極ペア受信コイルを使用しますが、このインジケータは増分位置のみを示します。Nonius エンコーディングは絶対位置を取得する方法であり、Nonius エンコーディングでは互いに素な周期を持つ 2 セットの受信コイルが必要です。

電気信号チェーンのオフセットとゲイン、および ADC のサンプル レート、速度、解像度が角度の精度に影響します。温度ドリフトが非常に小さい部品は、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。

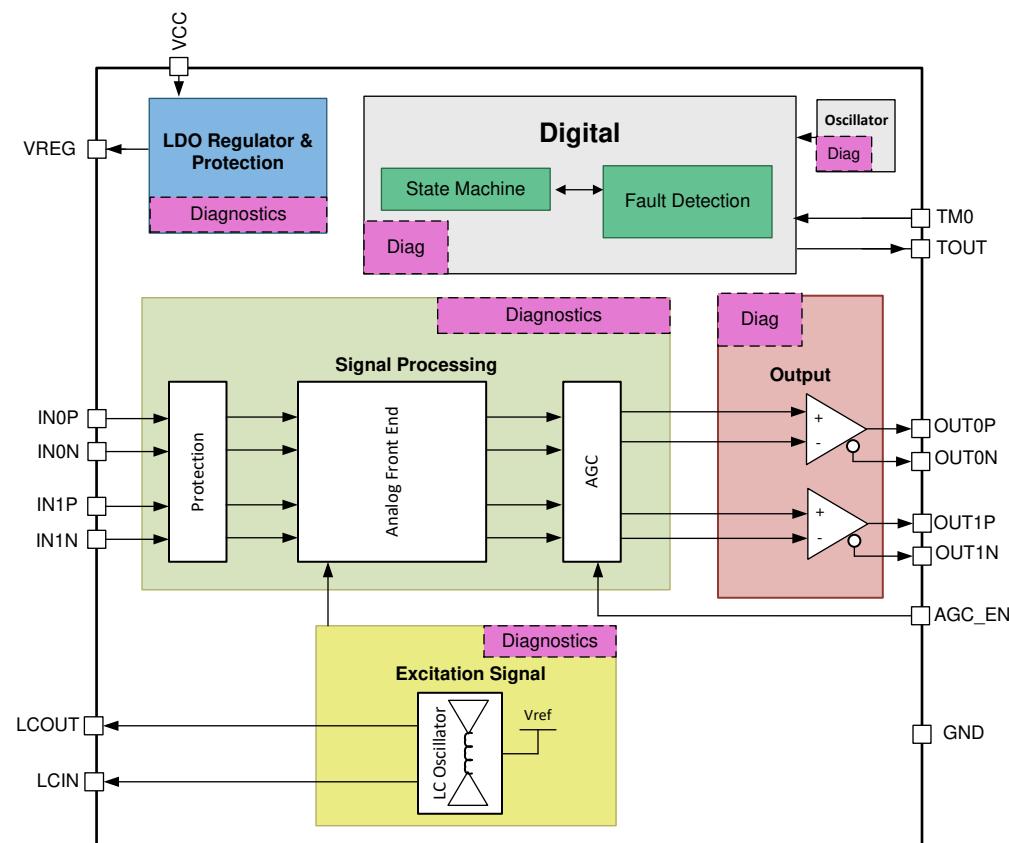
高集積かつ低消費電力の小型フットプリント回路は、最小フォーム ファクタ円形 PCB の設計に重要です。エンコーダはモーターに内蔵できるため、通常は動作周囲温度は少なくとも最大 125°C である必要があります。

2.3 主な使用製品

2.3.1 LDC5072-Q1

LDC5072-Q1 IC は、車載用および産業用アプリケーションの絶対回転位置を対象とした非接触型誘導性位置センサ用のアナログ フロントエンドです。このデバイスには、 $0^\circ \sim 360^\circ$ の絶対回転位置を検出する非接触誘導位置センサ用の統合アナログ フロントエンドが搭載されています。また、デバイスには多数の診断機能が搭載されており、電源投入前やデバイス動作中に発生した障害を検出、監視、報告します。このデザインでの主な特長は次のとおりです。

- $0^\circ \sim 360^\circ$ の絶対回転位置に対応する非接触型誘導性位置センサ向けアナログ フロントエンド IC 内蔵
- 過酷な環境での動作をサポートし、浮遊磁界、汚れ、汚染に対する耐性
- 機能安全準拠
- 温度範囲: $-40^\circ\text{C} \sim 160^\circ\text{C}$



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

図 2-2. LDC5072-Q1 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、拡張された Arm® Cortex®-M0+ 32 ビットコア プラットフォームをベースとする、MSP 高集積超低消費電力 32 ビット MCU ファミリの製品です。コスト最適化されたこれらの MCU は高性能アナログ ペ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
- 演算アクセラレータ。DIV、SQRT、MAC、TRIG の各計算をサポート
- 最適化された低消費電力モード。
 - RUN: 96µA/MHz (CoreMark)
 - STANDBY: リアルタイム クロック (RTC) と静的ランダム アクセス メモリ (SRAM) の保持で 1.5µA

2.3.3 TPSM365R3

TPSM365R3 は、パワー MOSFET、内蔵インダクタ、ブートコンデンサを小型の QFN パッケージに統合した 300mA、65V 入力の同期整流降圧 DC/DC パワー モジュールです。このデバイスの主な特長を以下に示します。

- 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET)、インダクタ、コントローラを 3.5mm × 4.5mm × 2mm の QFN パッケージに内蔵しています
- 広い入力電圧範囲: 3V ~ 65V
- 全負荷範囲にわたって 85% を上回る非常に高い効率を達成すると同時に、モーターの統合が容易になります
- 堅牢な設計用の本質的な保護機能
- 拡張産業用温度範囲に対応: -40°C ~ 125°C

2.3.4 TLV9062

TLV9062 は、レールツーレールの入力および出力スイング機能を備えたデュアル低電圧 (1.8V ~ 5.5V) オペアンプです。このデバイスは、低電圧での動作、小さな占有面積、大きな容量性負荷の駆動が必要なアプリケーション向けの、コスト効率の優れた設計です。このデザインでの主な特長は次のとおりです。

- レールツーレール入出力
- 低い入力オフセット電圧: ±0.3mV
- 低い広帯域ノイズ: 10nV/√Hz
- 低い入力バイアス電流: 0.5pA
- ユニティゲイン安定
- 内部無線周波数干渉 (RFI) および電磁干渉 (EMI) フィルタ

3 システム設計理論

3.1 ハードウェア設計

ハードウェアは以下の 3 つの PCB で構成されています。(1) モーターシャフト、固定コイル PCB の (2)、(3) 信号チェーン PCB に接続する回転ターゲット PCB です。

3.1.1 ターゲット PCB

ターゲットボードは通常、PCB 上にパターン化された銅箔です。パターンの周期は、コイルボード上のレシーバコイルの周期と同じである必要があります。このリファレンスデザインは、16 周期と 15 周期を使用します。各パターンの幅と高さは、1 周期のレシーバコイルと一致している必要があります。

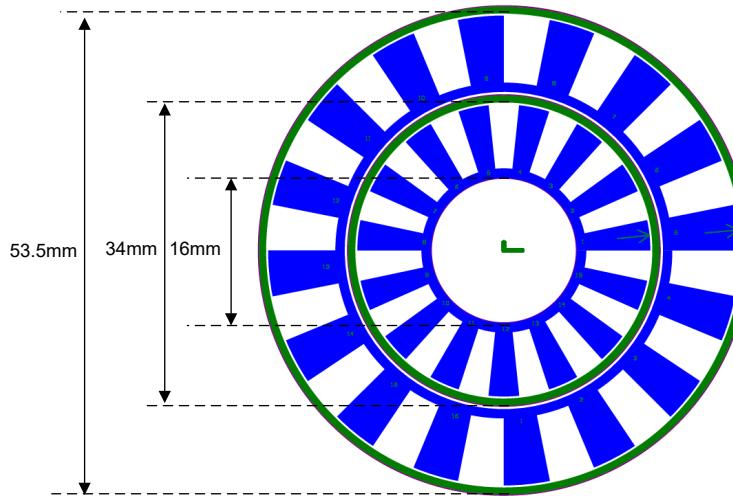


図 3-1. ターゲット PCB

3.1.2 コイル PCB

コイルボードには、外側コイルと内側コイルが含まれています。コイルの各セットには、励起コイルとレシーバコイルが含まれています。励起コイルはスパイラル形状をしています。レシーバコイルは、正弦または余弦の形状をしています。

誘導性エンコーダの分解能は、主にコイルの周期に依存します。このリファレンスデザインでは、16 ビット ENOB を超える分解能を実現するために、16 周期の外部コイルと 15 周期の内部コイルを使用しています。ただし、コイルの周期が長くなると PCB のサイズも大きくなり、コイルの外径は 58mm に制限されます。

励起コイルについては、インダクタンスを適切に制御する必要があります。励起コイルはインダクタとして機能し、LDC5072 デバイスの LCIN ピンと LCOUT ピンに接続されています。また、2 つのコンデンサをこれら 2 つのピンに接続して、LC 発振器を形成します。インダクタンスと容量によって、励起信号の周波数が決まります。信号振幅と消費電力の間にはバランスがあります。信号振幅が大きいほど電磁界が大きくなり、励起コイルの巻数が高くなります。インダクタンスを変更せずに維持するには、コイルの幅を狭くする必要があり、抵抗値の増加と消費電力の増加につながります。このリファレンスデザインは、 $5\mu\text{H}$ 付近に維持する励起コイルのインダクタンスを制御します。

励起コイル信号とレシーバコイル信号は両方とも高周波信号です。ノイズ耐性を向上させるため、このリファレンスデザインでは 6 層 PCB 基板を使用し、差動信号配線を異なる層でオーバーラップさせています。

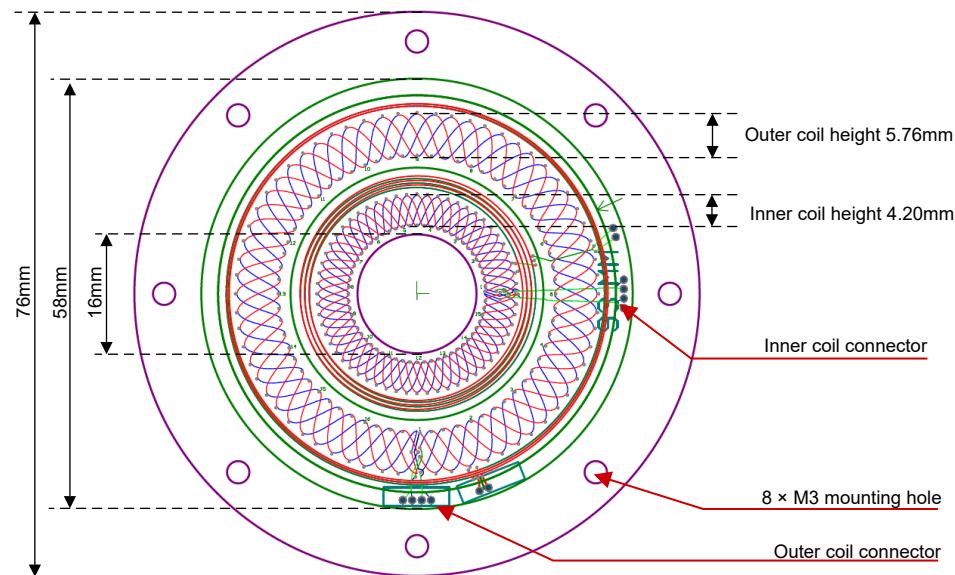


図 3-2. コイル PCB

3.1.3 信号チェーン PCB

3.1.3.1 誘導性角度位置センサ フロントエンドの回路図

図 3-3 に、外側センスコイルの誘導性 AFE の回路図を示します。コメントは、内部センスコイルの回路図にも適用されます。

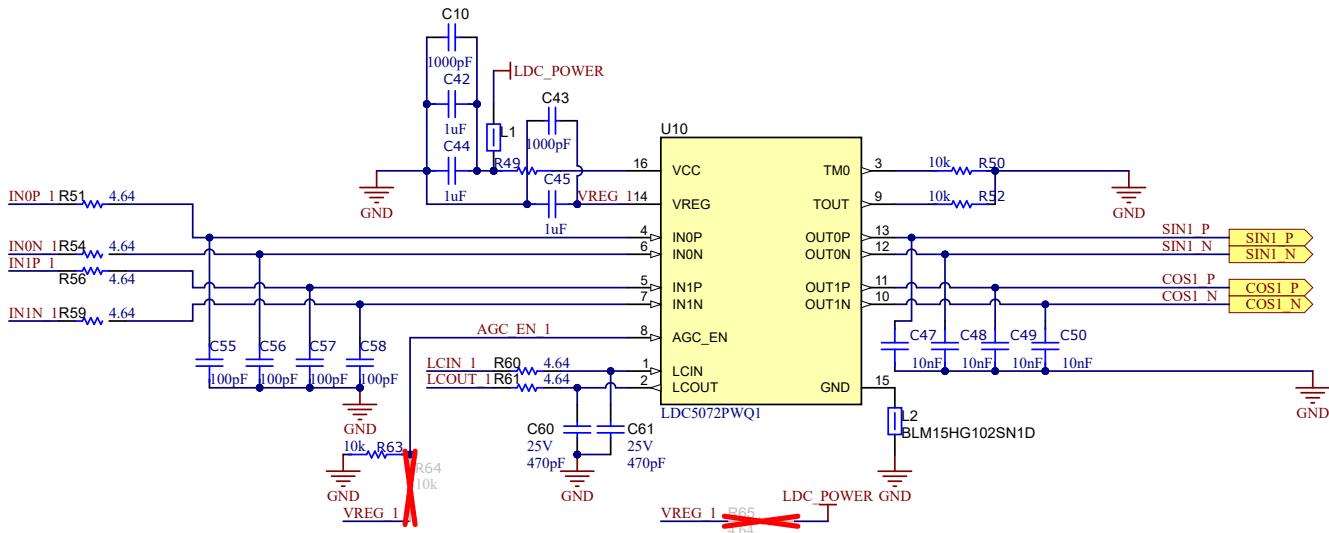


図 3-3. 誘導性 AFE LDC5072 の回路図

3 つのデカップリングコンデンサ (C10, C42, C44) を LDC5072 VCC と GND ピンの近くに追加します。C43 と C45 は、VREG と GND ピンの近くに配置されたデカップリングコンデンサです。

LDC5072 デバイスは、VCC で 3.3V と 5V の両方の電源電圧をサポートします。3.3V が供給される場合、VCC と VREG の両方に外部 3.3V 電源から電力を供給され、R65 を実装する必要があります。5V が供給される場合、LDC5072 は内部 LDO を使用して VREG のための 3.3V を生成し、R65 を取り外す必要があります。

LDC5072 デバイスは、固定ゲインモードと自動ゲイン制御 (AGC) モードの両方をサポートしています。R63 と R64 は、ゲイン設定を制御する分圧抵抗です。このリファレンスデザインは R64 を実装していないため、LDC5072 デバイスを AGC モードで動作させます。

LC 回路を形成するのは、センスコイル PCB 上の C60、C61 (470pF)、および励起コイルです。コイルの外部励起インダクタンス (L) は 5 μ H として設計されているため、LC 回路の共振周波数は 4.6MHz で、計算式で計算できます。

$$f_{\text{osc}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_{60}C_{61}}{C_{60} + C_{61}}}} \quad (1)$$

R51、C55、R54、C56、C57、R58、C58 は、センサコイルの正弦出力および余弦出力用のローパスフィルタを実装しています。

C47、C48、C49、C50 は 10nF であり、LDC5072 出力インピーダンスを持つローパスフィルタを形成します。より高速にする場合は、コンデンサを小さくしてください。コンデンサの選定については、データシートを参照してください。

3.1.3.2 差動からシングルエンドへの信号変換

TLV9062 は、差動エンドからシングルエンドへの回路を実装して、MSPM0 MCU 内のシングルエンド ADC を駆動するために使用されます。TLV9062 の差動ゲインは 0.5 に設定され、バイアス電圧は 3.3V の基準電圧 (REF3533) を使用して 1.65V に設定され、0V ~ 3.3V のユニポーラ信号を取得します。

帯域幅は 1MHz 付近で構成され、2.8MSPS ADC サンプルレートの半分未満です。TLV9062 を使用した最初のフィルタは 1.6MHz に設定され、C9 (20pF) と C24、C26 (各 10pF)、2 番目のフィルタ R17 (500) および C16 (200pF) は 1.6MHz に設定されます。

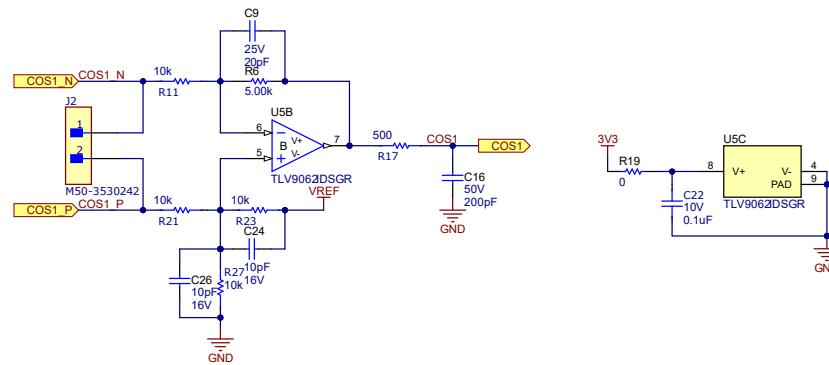


図 3-4. TLV9062 の回路図

3.1.4 MSPM0G3507 の回路図設計

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 VCORE 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の生成を防止するため、VDD と 3.3V 電源レールの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。

MSPM0 は、外部 ADC リファレンスを受け入れて ADC の ENOB (実効ビット数) を改善します。TIDA-010961 では、REF3533 は外部リファレンスとして使用され、その出力は M0 の VREF+ ピンと VREF- ピンに接続されます。C10 (100nF) デカップリングコンデンサは VREF+ と VREF- 間に配置されます。

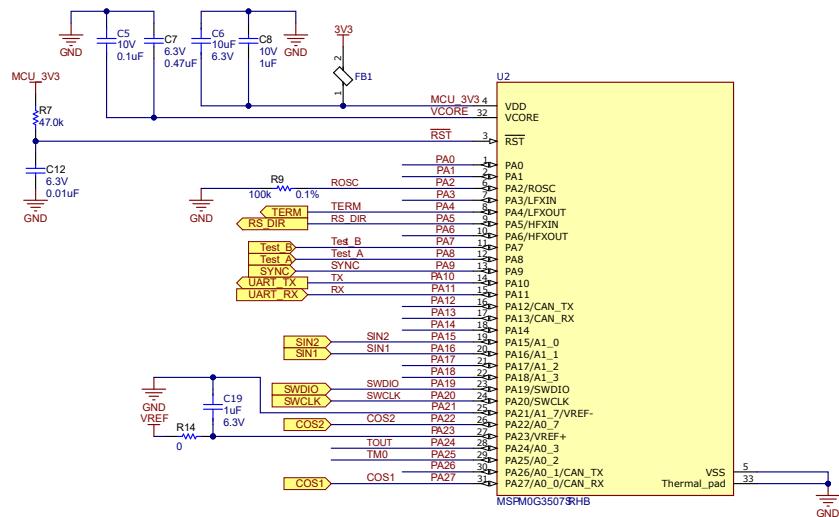


図 3-5. MSPM0G3507 の回路図

3.1.5 電源の設計

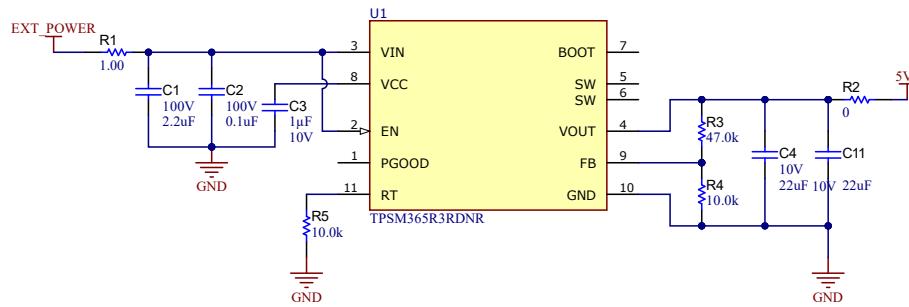


図 3-6. 入力電源回路図

公称入力電源電圧は 24V で、最大入力電圧レンジは 60V です。TPSM365R3 DC/DC 降圧モジュールは、最大 65V の入力を受け入れ、5.5V の中間電源レールを生成します。C1、C2、C3 はデカップリング コンデンサであり、VIN ピンおよび GND ピンの近くに配置されています。R5 はこのコンバータのスイッチング周波数を設定し、10kΩ 抵抗は 1500kHz に設定されています。R3 と R4 の設定出力電圧を 5.5V にします。式 2 は、出力電圧が $V_{FB} = 1V$ で計算できることを示しています。

$$V_{out} = V_{FB} \frac{R_4 + R_3}{R_4} \quad (2)$$

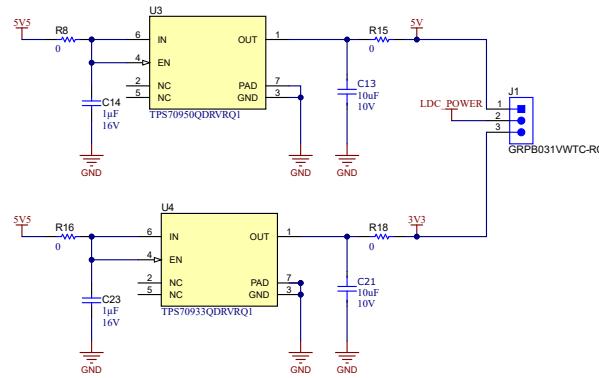


図 3-7. 5V および 3.3V ポイントオブロード電源の回路図

LDO TPS70950 は、LDC5072 の中間 5.5V 入力から 5V を生成します。LDO TPS70933 は、LDC5072、TLV9062、MSPM0G3507 用に 3.3V レールを生成します。J1 ジャンパは、LDC5072 の電源電圧、すなわち 3.3V または 5V を選択します。ノイズ デカップリングのために $1\mu\text{F}$ コンデンサ C14 および C23 を追加し、安定した動作のために $10\mu\text{F}$ 出力コンデンサ C13 および C21 を追加しています。

電圧リファレンス REF3533 は 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。同様に、TPS7A0533 では、デカップリングに C8 (100nF) が必要であり、安定した動作のために C9 ($1\mu\text{F}$) が使用されます。

3.2 絶対位置の計算

絶対位置を取得するために、このリファレンス デザインでは共線期間のデュアル トラックコイルを使用しています。外部トラックは 16 周期コイルを使用し、内部トラックは 15 周期コイルを使用しています。

絶対位置の計算方法をよりわかりやすく示すために、たとえば、設計ガイドでは 4 周期の外側コイルを、3 周期の内側コイルを使用しています。

図 3-8 は、簡単にするために周期数を 4 および 3 と低くして、機械的 1 回転における外側コイルと内側コイルの電気角の関係を示しています。

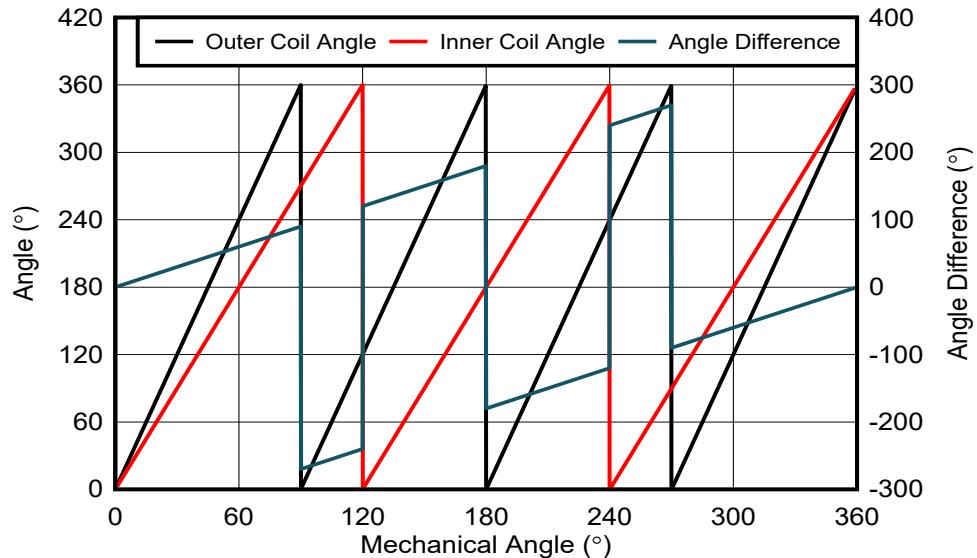


図 3-8. 外側コイルと内側コイルの角度と互いに素な 4 周期と 3 周期の関係

絶対機械的角度は例 4 と例 3 の複素数コイルの電気角の差により決定されます。

表 3-1. 電気角差と絶対角度の関係

差角度 (°)	絶対角度 (°)
0~90	N4 ⁽¹⁾
-270~-240	90 + N4 ⁽¹⁾
120~180	90 + N4 ⁽¹⁾
-180~-120	180 + N4 ⁽¹⁾
240~270	180 + N4 ⁽¹⁾
-90~0	270 + N4 ⁽¹⁾

(1) N4 は、外側コイルの機械的角度を意味します。

このリファレンス デザインでは、互いに 16 個のコイルと 15 個のコイルを使用します。16 周期コイルは、絶対角度を 16 セクタに分割します。絶対角度が 第 n 次セクタ内にあると仮定すると、外側コイルの角度は内側コイルの角度より $n \times 22.5^\circ$ 大きい、または $360 - n \times 22.5^\circ$ 小さいです。[式 3](#) セクタ番号を計算します。

$$\text{sector} = \begin{cases} \text{FLOOR}\left(\frac{(\text{outer coil angle} - \text{inner coil angle})}{22.5}\right) & \text{outer coil angle} \geq \text{inner coil angle} \\ \text{FLOOR}\left(\frac{\text{outer coil angle} - \text{inner coil angle} + 360}{22.5}\right) & \text{outer coil angle} < \text{inner coil angle} \end{cases} \quad (3)$$

次に、絶対角度を次のように計算できます。

$$\text{absolute position} = \text{sector} \times 22.5^\circ + \text{fine angle}/16 \quad (4)$$

図 3-9 に、Nonius エンコーダの絶対位置計算フローチャートを示します。

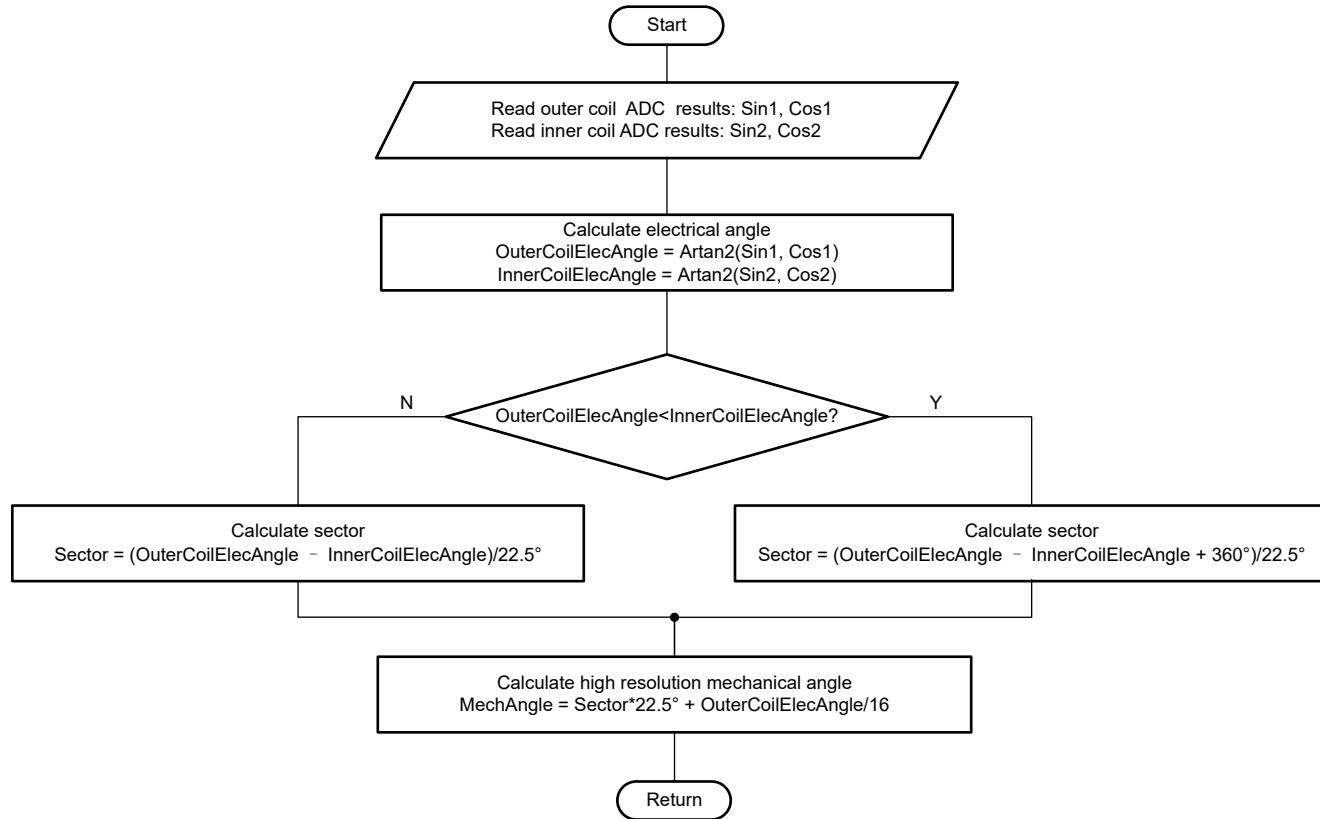


図 3-9. 回転角度計算フローチャート

3.3 ソフトウェア設計

テキサス インスツルメンツ社内のテスト ソフトウェアは、M0 MCU 用の MSPM0 ソフトウェア開発キットを使用して、MSPM0G3507 でこのリファレンス デザインを検証します。

3.3.1 角度計算のタイミング

TIDA-010961 リファレンス デザインでは、MSPM0G3507 は LDC5072 デバイスの出力正弦信号と余弦信号を 8 倍のオーバーサンプリング比でサンプリングし、絶対角度を計算します。TMAG6180 デバイスの ADC は内部 32kHz の Timer0 によってトリガされ、ADC 結果を配列に保存します。ADC がトランザクションを完了した後、割り込みが生成され、MCU は絶対角度を計算します。

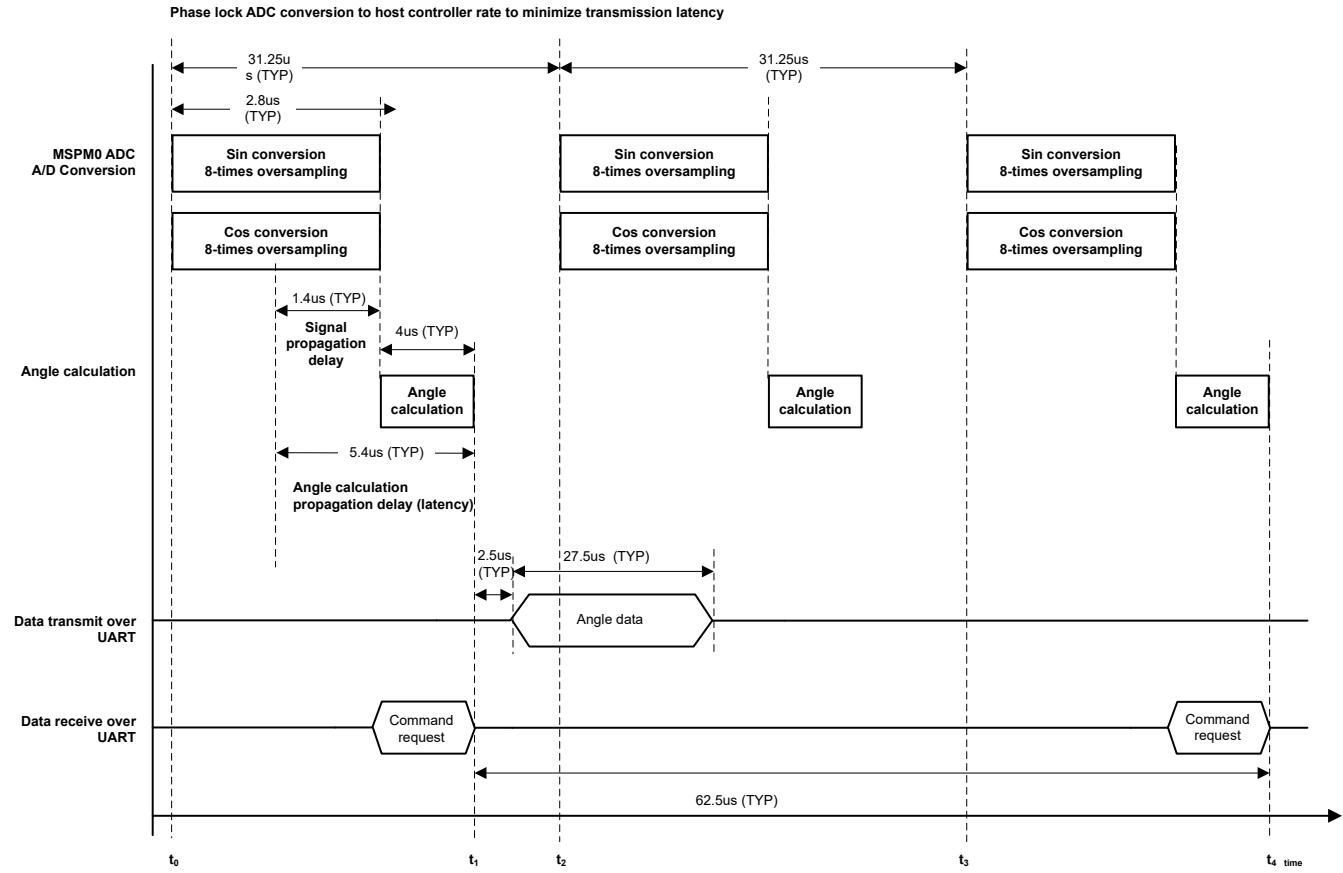


図 3-10. MSPM0G3507 タイミング図

ホストコントローラは、TIDA-010961 から位置データを取得するためのコマンド要求を送信します。このコマンドは MSPM0 で UART 割り込みをトリガし、MCU は位置データを送信します。

表 3-2. システム レイテンシ解析

サブシステム	伝搬遅延 (代表値)
LVD5072	4μs
差動からシングルエンドへのフィルタ	0.2μs
8倍オーバーサンプリング ADC	1.4μs
角度計算	4μs
合計	9.6μs

3.3.2 回転角度誤差の発生源と補償

角度を正確に測定するために、ターゲットボードの中心をコイルボードの中央に揃え、許容誤差を含めます。最高の精度を得るためにエンコーダを較正するには、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較正手順については、[『AMR 角度センサの較正』](#)アプリケーションレポート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、電気オフセットは較正できません。
- 振幅の不一致の較正手順については、[『AMR 角度センサの較正』](#)アプリケーションノート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、振幅の不一致を較正できません。

その他の誤差発生源には、3次高調波などのセンサ信号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。以下の図は、この種の誤差を理解して補償できるようにするために、誤差の発生源と角度誤差への影響の概要を示しています。

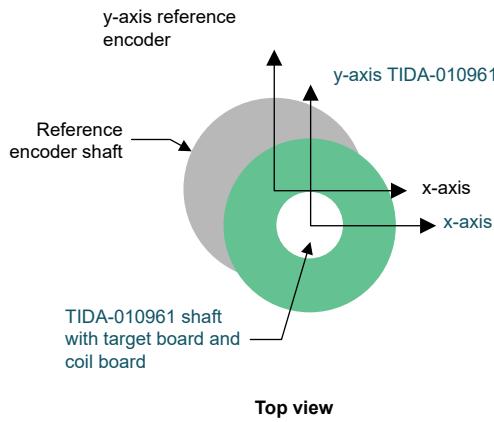


図 3-11. シャフト アダプタの機械的変位

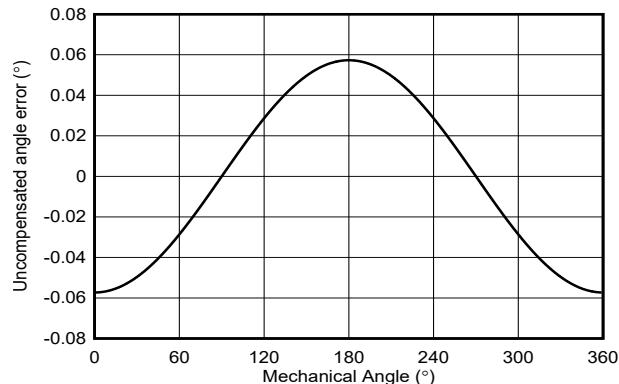


図 3-12. シャフト アダプタの変位による機械的角度誤差

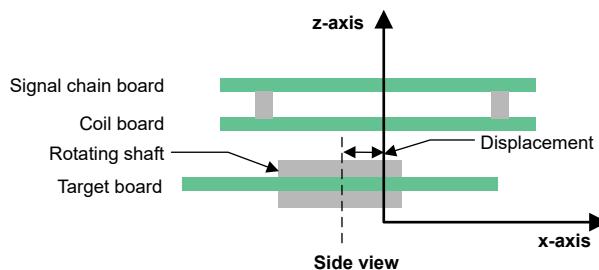


図 3-13. ターゲットボードとコイルボードの変位

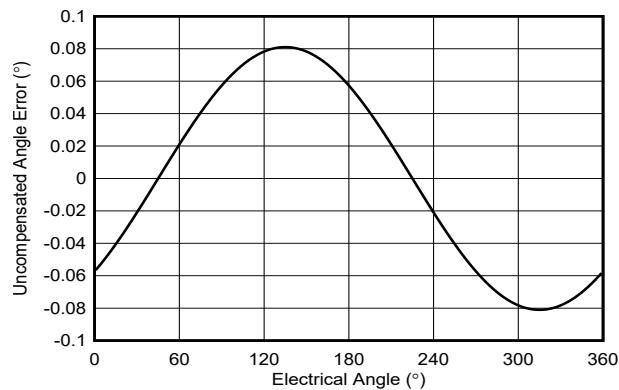


図 3-14. ターゲットボードとコイルボードの変位による電気角度誤差

図 3-15～図 3-17 に、センサ信号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)の例が角度誤差に影響を与える例を示します。

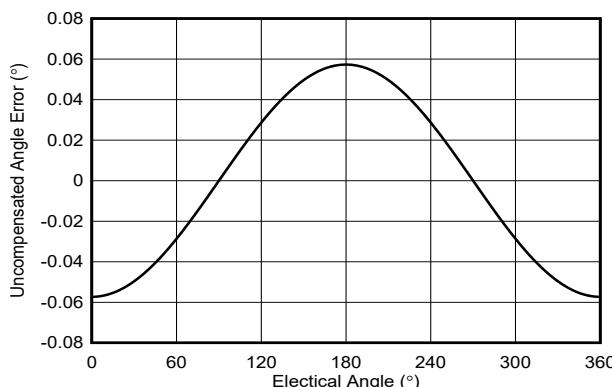


図 3-15. 正弦信号および余弦信号チェーンのオフセットによる電気的角度誤差 (0.1%)

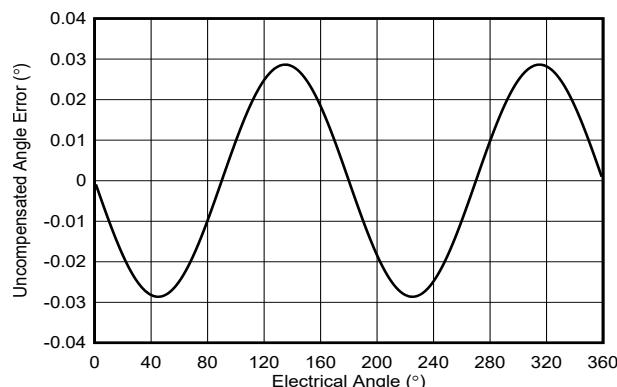


図 3-16. 正弦信号および余弦信号のゲインの不一致による電気的角度誤差 (0.1%)

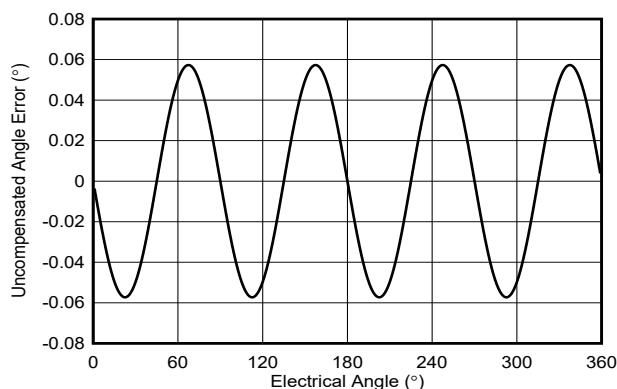


図 3-17. 正弦信号および余弦信号チェーンの非直線性による電気的角度誤差 (0.1%)

外側コイルには 16 の周期があるため、電気的角度誤差次数に 16 を乗算すると、機械的角度誤差次数が得られます。表 3-3 に、角度誤差パターンへの影響をまとめます。

表 3-3. 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	ターゲット ボードヒューズルボーディングの変位	信号チェーンのオフセット	信号チェーンゲインの不一致	信号チェーンの非直線性(第 3 次高調波)
電気角度誤差高調波	—	1st	1st	2nd	4th
機械的角度誤差高調波	1st	16th	16th	32nd	64th

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も参照してください。

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

このリファレンスにあたって、[表 4-1](#) にリストされているハードウェア機器を使用します。

表 4-1. ハードウェアの前提条件

装置	備考
TIDA-010961	このリファレンス デザインの構成は次のとおりです。
LBY80-C	2D リニア ステージ
TIDA-010956	統合型モーター ドライブ向け、48V、85A、3 相インバータのリファレンス デザイン
MS1H4-40B30CA	23 ビット光エンコーダ付きサーボ モーター

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。

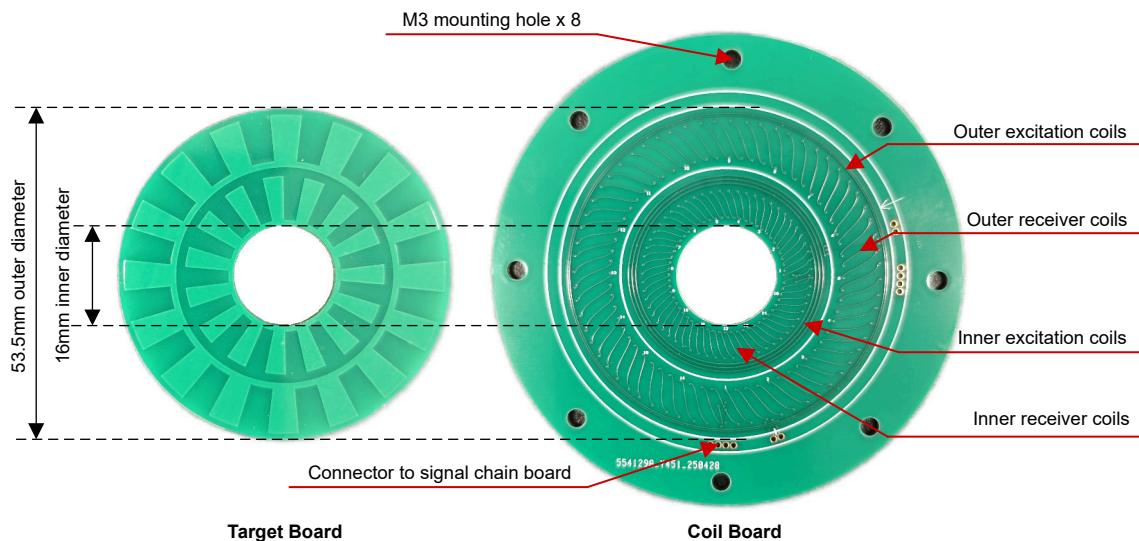


図 4-1. ターゲット PCB (左) とセンスコイル PCB (右)

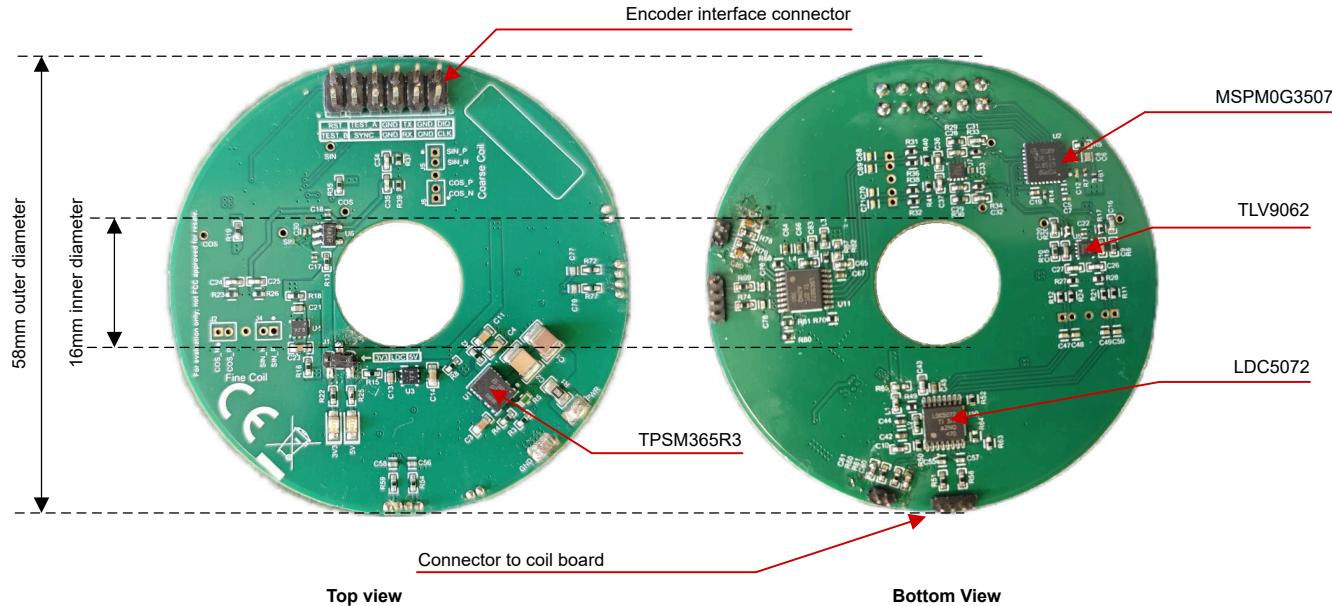


図 4-2. 信号チェーン ボードの上面図(左)と底面図(右)

4.1.2 エンコーダのインターフェイス

表 4-2 は TIDA-010961 インターフェイス J3 を示しています。この表には、UART と JTAG インターフェイスが含まれます。UART は、ホスト MCU と角度を通信するために使用します。JTAG は、ソフトウェアのダウンロードとデバッグに使用します。インターフェイスにはデバッグ用のテストピンがいくつか残されています。

表 4-2. インターフェイス仕様ヘッダ

ピン	信号	I/O	ピン	信号	I/O
J3-1	TEST_A	O	J3-2	RST	I
J3-3	SYNC	I	J3-4	TEST_A	O
J3-5	GND	-	J3-6	GND	-
J3-7	UART RX	I	J3-8	UART TX	O
J3-9	GND	-	J3-10	GND	-
J3-11	CLK	I	J3-12	DIO	I/O

4.2 ソフトウェア

テキサス インスツルメンツ社内のテストソフトウェアは、M0 MCU 用の MSPM0 ソフトウェア開発キットを使用して、MSPM0G3507 でこのリファレンス デザインを検証します。

表 4-3 に、主要なソフトウェア設定を示します。

表 4-3. ソフトウェアの設定

サブシステム	パラメータ	値
割り込み	ADC トリガ周波数	32kHz
	位置計算周波数	32kHz
ADC	ハードウェア オーバーサンプリング レート(OSR)	8
	サンプリング時間	280ns
UART	ボーレート	2.5M
	ワード長	8bit

4.3 テスト設定

図 4-3 にエンコーダのテストベンチを示します。

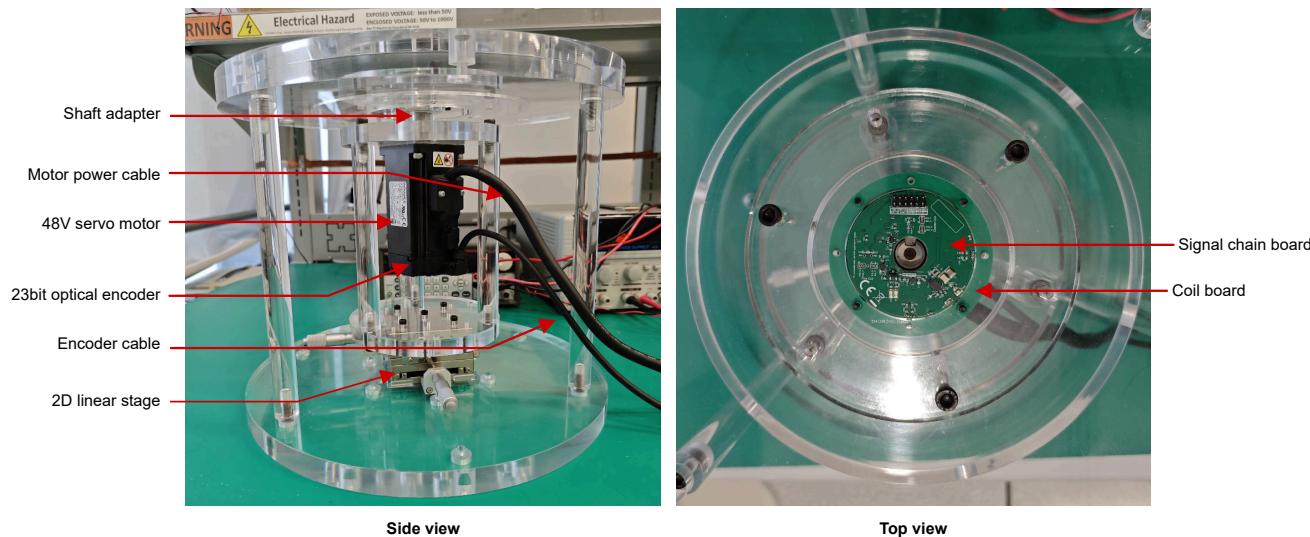


図 4-3. エンコーダ テストベンチ

図 4-3 に、テスト設定全体を示します。MS1H4-40B30CA は、23 ビット光エンコーダを内蔵した 48V サーボ モータです。高分解能光学エンコーダは、正確なリファレンス位置を提供し、位置測定誤差を計算します。

2D リニア ステージを使用して、ターゲット ボードとレシーバ ボードを正確に中心に整列させることができるように、レシーバ ボードの XY 位置を調整します。

TIDA-010956 3 相インバータは、モーターを一定の速度で動作させます。テストベンチは、TMS320F280039 リアルタイム MCU LaunchPad™ 開発キットを使って 3 相インバータを制御し、位置要求コマンドをリファレンス エンコーダと TIDA-010961 に同時に送信します。

4.4 テスト結果

4.4.1 誘導性センサの正弦/余弦ノイズの測定

図 4-4 と 図 4-5 に、1 つの電気的周期にわたって 7 つのセクタで 16 周期で測定された外側コイルの正弦および余弦信号を示します。これは、135 度から 157.5 度の機械的角度に対応します。この正弦波の最大/最小電圧は 3.036V と 0.123V です。余弦信号の範囲は 3.176V と 0.232V です。正弦信号と余弦信号の間にゲインとオフセットの不一致があり、これにより、第 1 次 高調波電気角誤差が発生します。較正によりこの誤差を最小化します。

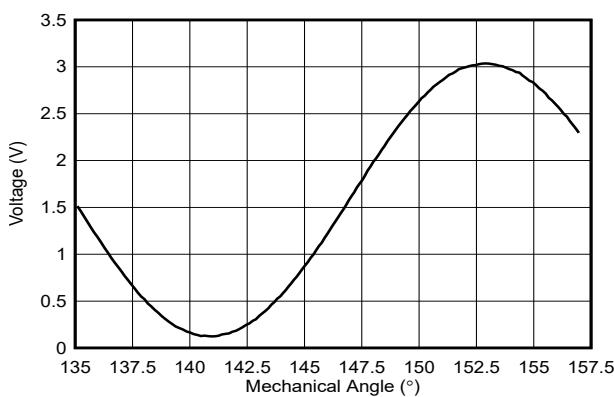


図 4-4.1 電気サイクルの正弦波

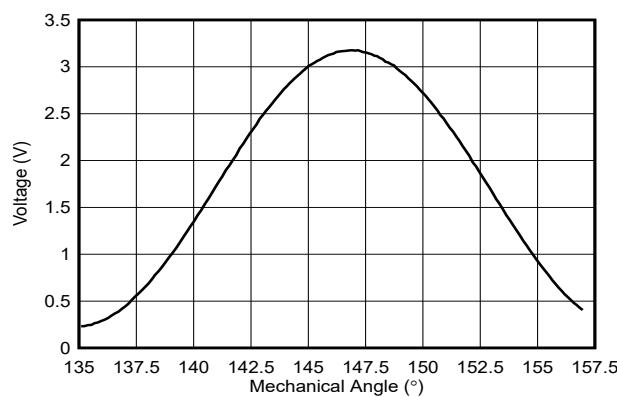


図 4-5.1 電気サイクルの余弦波

以下の図は、固定 0.5 度の機械的角度での正弦信号および余弦信号ノイズとヒストグラム プロットを示しています。分析のため、外部ループおよび内部ループの正弦信号と余弦信号を 2000 サンプルし、8 倍のオーバーサンプリングにより 32kHz のサンプルレートで実施します。

表 4-4 は、フルスケール範囲に対する標準偏差、信号対雑音比 (SNR)、有効ビット数 (ENOB) を示します。絶対角度位置データは、スタートアップ時に絶対角度が検出された後、外側コイルによって計算されます。内側コイルのノイズは最終的な精度に影響を与えません。

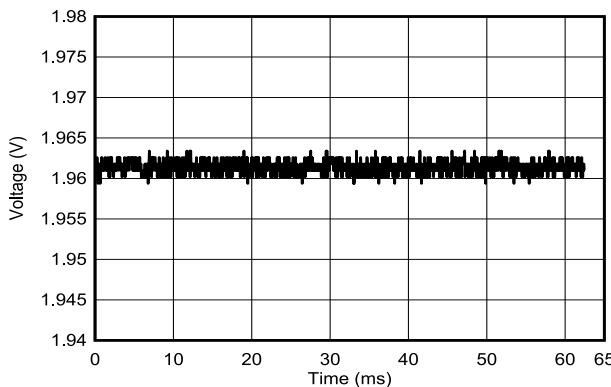


図 4-6. 外側コイル 0.5 度での正弦信号

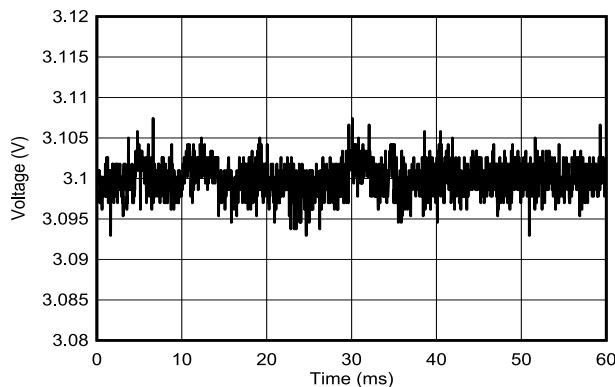


図 4-7. 外側コイル 0.5 度での余弦信号

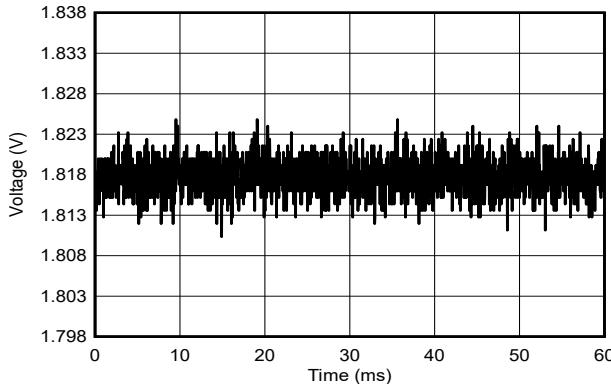


図 4-8. 内側コイル 0.5 度での正弦信号

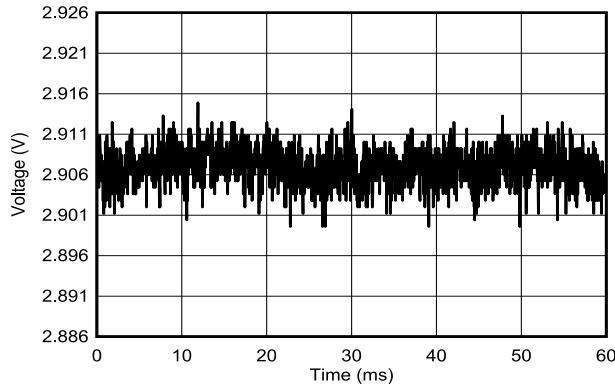


図 4-9. 内側コイル 0.5 度での余弦信号

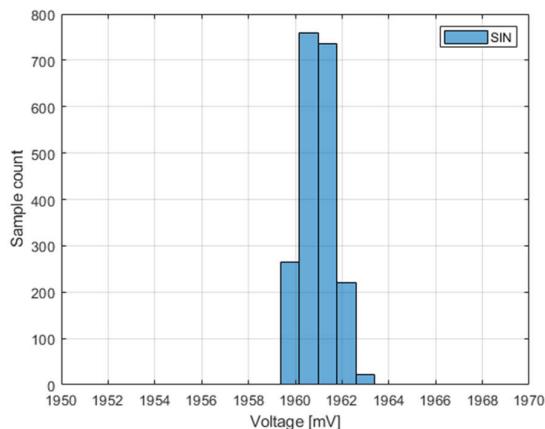


図 4-10. ヒストグラム外側コイルの正弦

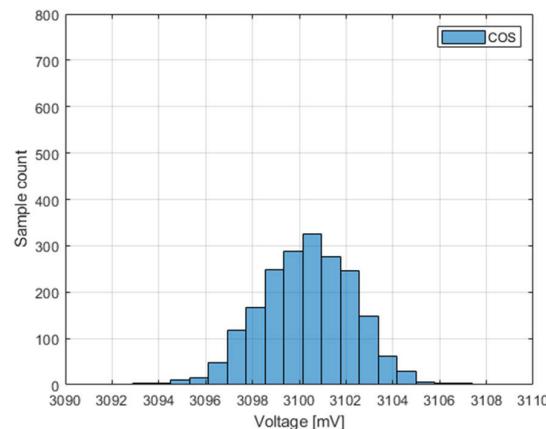


図 4-11. ヒストグラム外側コイルの余弦

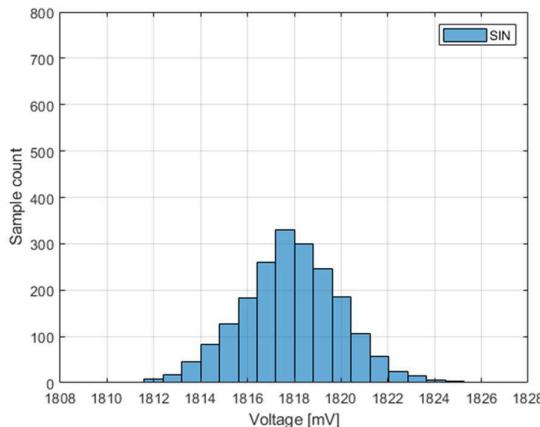


図 4-12. ヒストグラム内側コイルの正弦

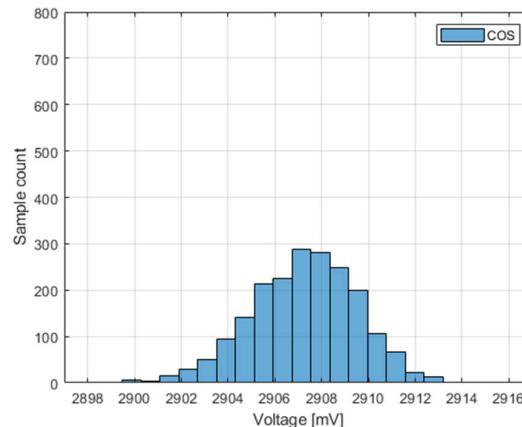


図 4-13. ヒストグラム内側コイルの余弦

表 4-4. MSPM0 ADC フルスケール レンジでの標準偏差、SNR、ENOB

パラメータ	外側コイル正弦	外側コイル余弦	内側コイル正弦	内側コイル余弦
正弦/余弦振幅 (V)			1.45	
標準偏差 (mV)	0.73	2.00	2.13	2.24
SNR (dB)	66.0	57.2	56.7	56.2
ENOB (ビット)	10.66	9.21	9.12	9.05

4.4.2 絶対角度ノイズ測定

このテストでは、機械的角度は 5.1 度に固定されています。角度は、16kHz のサンプルレートで読み取られます。分析のために 2000 サンプルを採取しました。図 4-14 と図 4-15 に、それぞれ時間ドメインノイズとヒストグラムを示します。

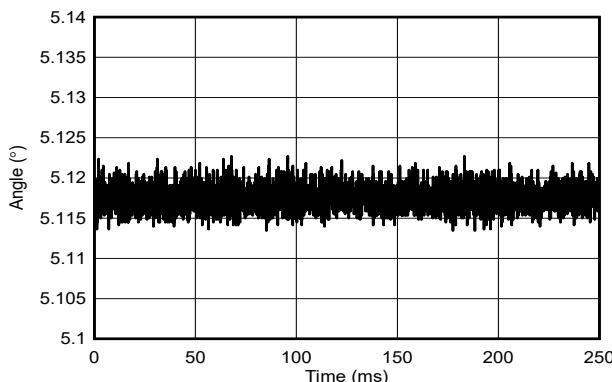


図 4-14. 16kHz のサンプルレートで 2000 サンプル以上、
5.1 度の静的角度

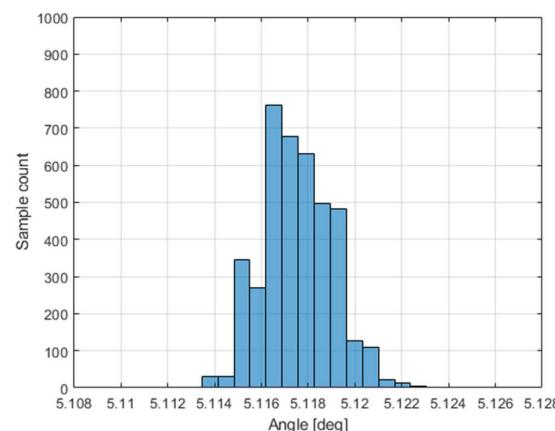


図 4-15. 5.1 度の角度のヒストグラム

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。

表 4-5. 静的機械角度 5.1 度における標準偏差、SNR、ENOB

パラメータ	絶対角度	備考
標準偏差 (°)	0.0015	RMS
SNR (dB)	101.6	SNR = $20 \times \log_{10} (\pm 180 \text{ deg}/\text{STDEV})$
ENOB (ビット)	16.6	ENOB = $(\text{SNR} - 1.76)/6.02$

次のテストでは、角度を 22.5 度間隔で変更し、1 回転に相当する 16 の電気周期すべてにわたってノイズフロアを検証します。8 つの電気的周期のそれぞれに有意な差はありません。ピークツーピークの静的角度ノイズは約 0.02 度で、最大値は 225 度で発生します。

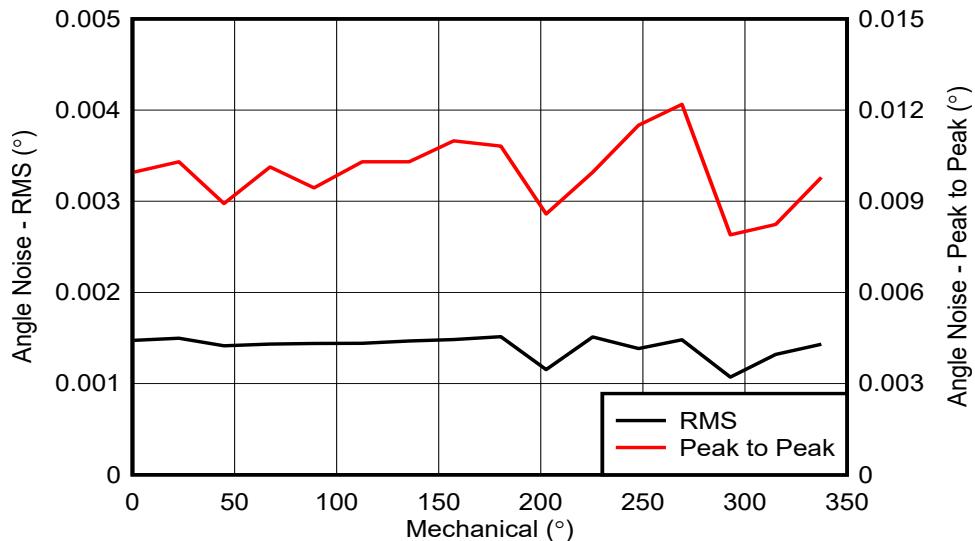


図 4-16. 1 回転にわたる静的角度ノイズ

次のテストを実施して、静的角度ノイズと空間距離を検証します。

空間距離が大きくなると、ターゲットボードで生成される渦電流が減少し、レシーバコイルの出力信号振幅も減少するため、角度ノイズも大きくなり、これはエンコーダの分解能が低くなることを意味します。空間距離が 1.5mm に大きくなると、レシーバコイルの信号が非常に小さいため、内部コイルの LDC5072 デバイスが故障モードに移行します。したがって、絶対位置を計算することはできません。空間距離は 1.5mm 未満にしてください。

表 4-6. 外側コイルの角度ノイズと空間距離の関係

空間距離 (mm) (1)	0.5 (デフォルト)	0.8	1.2	1.5
静的角度ノイズ (1 シグマ) (°)	0.0015	0.0023	0.0025	0.0048

(1) 空間距離は、ターゲットボードの上面とコイルボードの底面間の距離です。

4.4.3 回転角度精度の測定

このセクションでは、モーターが 30 rpm の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。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、リファレンスエンコーダと TIDA-010961 の同期位置データ時間を取り集めます。その後、リファレンスエンコーダの角度を、誘導性エンコーダの角度と比較します。空間距離はデフォルト値の 0.5mm に設定されています。合計 2500 個の角度サンプルが 1 回転で収集されます。

図 4-17 および 図 4-18 は、オフセットとゲインによる機械的な角度誤差を示しています。

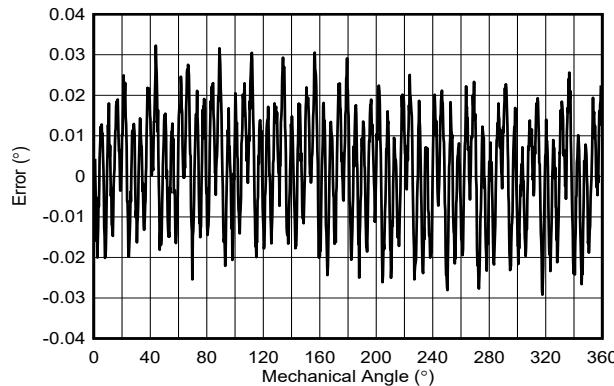


図 4-17. 周囲温度 25°C でオフセットおよびゲイン較正を行った場合の 1 機械的サイクルにおける回転角度精度

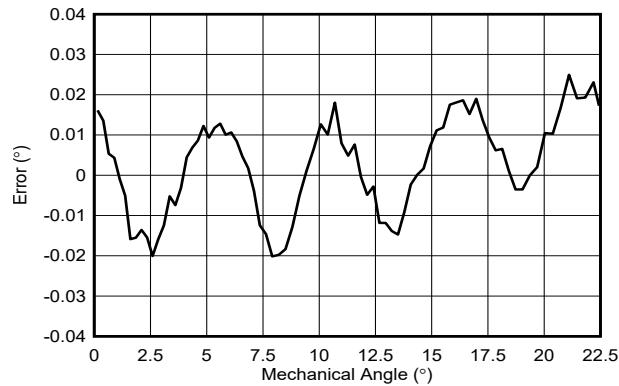


図 4-18. 周囲温度 25°C でオフセットおよびゲイン較正を行った場合の 1 電気的サイクルにおける回転角度精度

再現性テストでは、同じ較正パラメータを使用して角度データを 2 回収集します。図 4-19 は、較正ありの 2 サイクルの誤差結果を示しています。サイクル 1 とサイクル 2 のデータはほぼ完全にオーバーラップしており、TIDA-010961 の信頼できる再現性があることを意味しています。

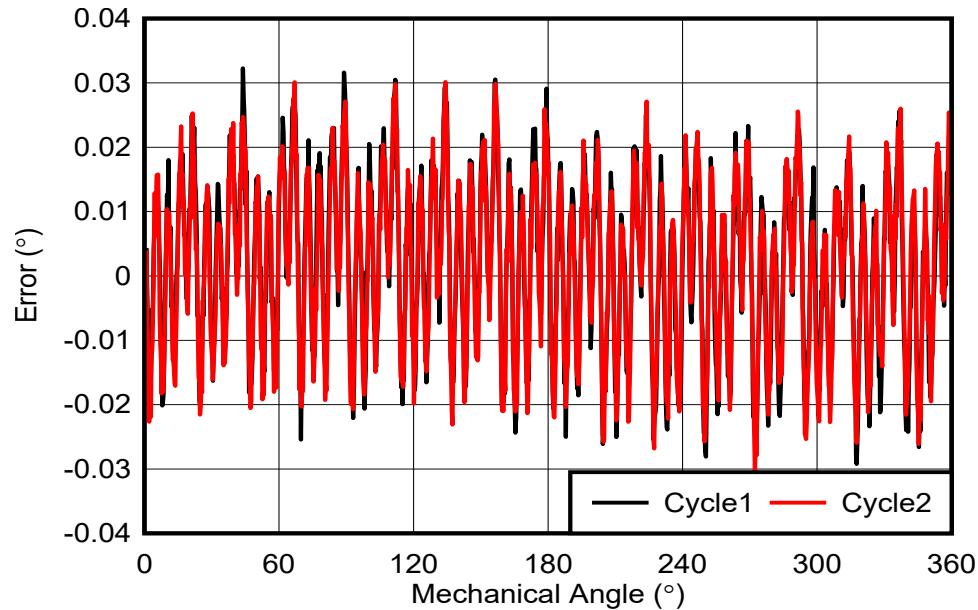


図 4-19. オフセットおよびゲイン較正付き回転角度精度 (周囲温度 25°C、繰り返しテスト実行時)

4.4.4 空間距離がノイズ、第 4 次高調波、総角度精度に及ぼす影響

空間距離が大きくなると、励起コイルによって生成される電磁場が小さくなり、LDC5072 のノイズも増加します。このセクションでは、TIDA-010961 の空間距離の影響を分析します。異なるモーター シャフト アダプタを使用すると、空間距離を 0.5mm から 1.2mm に変化させます。セクションで説明されているテスト手順を繰り返します。図 4-20 ~ 図 4-25 にテスト結果を示します。

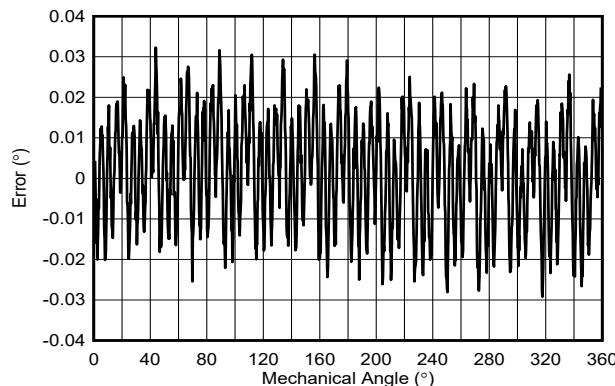


図 4-20. 空間距離 0.5mm での 1 機械サイクルにわたる
回転角度精度

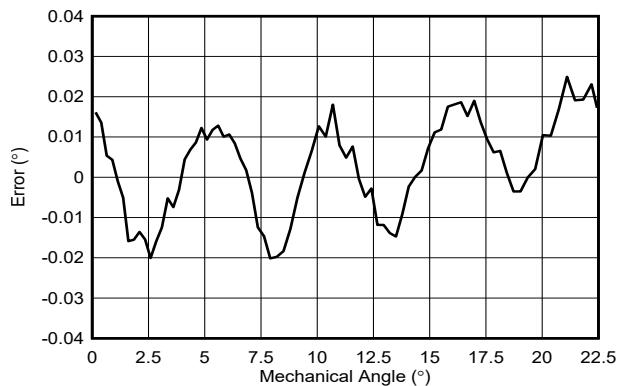


図 4-21. 空間距離 0.5mm での 1 電気的サイクルにわたる
回転角度精度

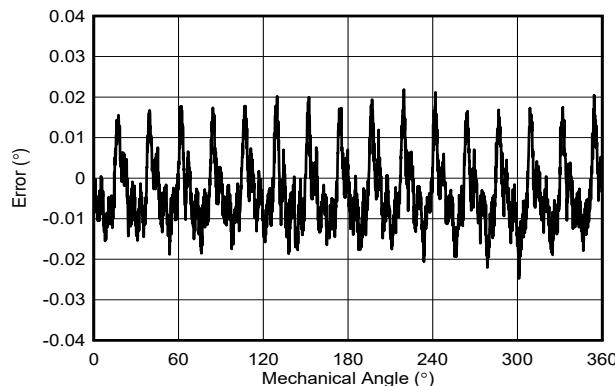


図 4-22. 空間距離 0.8mm での 1 機械サイクルにわたる
回転角度精度

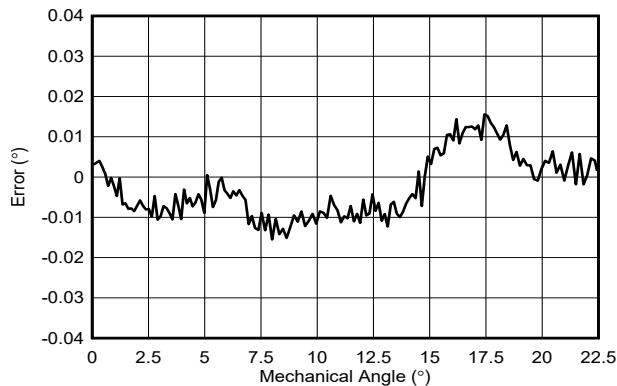


図 4-23. 空間距離 0.8mm での 1 電気的サイクルにわたる
回転角度精度

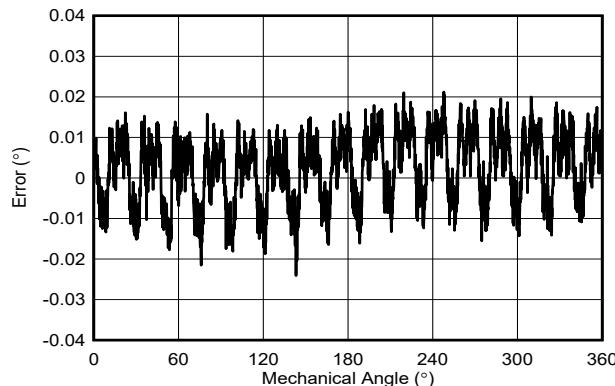


図 4-24. 空間距離 1.2mm での 1 機械サイクルにわたる
回転角度精度

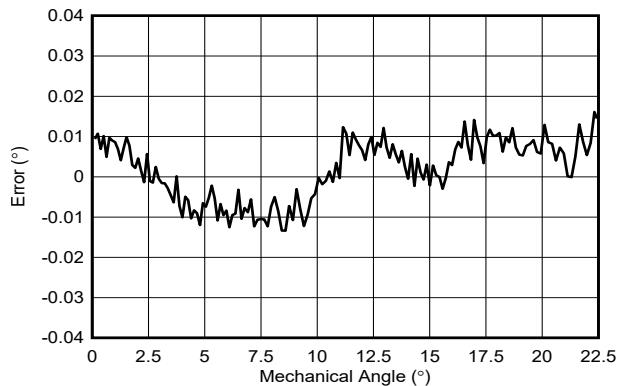


図 4-25. 空間距離 1.2mm での 1 電気的サイクルにわたる
回転角度精度

空間距離が異なる場合、角度誤差はすべて ± 0.04 度以下です。さらに、1 つの電気的サイクル図における回転角度精度は、空間距離の変化に応じて高調波が変化することを示しています。

FFT 分析を使用して、空間距離が高調波に及ぼす影響をさらに分析します。表 [表 4-7](#) は、結果を示しています。空間距離が小さいと、第 4 次高調波が大きくなります。ただし、空間距離が大きくなると静的ノイズは大きくなり、第 4 次の高調波誤差は小さくなります。エンコーダの分解能とエンコーダの精度の間にはトレードオフがあります。

表 4-7. 電気角度の高調波

(静電容量系絶縁素子などの) 空間距離	静的ノイズ (°) ⁽¹⁾	第 1 次高調波 (°) ⁽²⁾	第 2 次高調波 (°) ⁽²⁾	第 4 次高調波 (°) ⁽²⁾
0.5mm	0.0015	0.0068	0.0043	0.0110
0.8mm	0.0023	0.0085	0.0042	0.0039
1.2mm	0.0025	0.0080	0.0045	0.0038

(1) すべてのデータは 1 シグマ RMS の値です

(2) 高調波次数は電気的サイクルを基準としています

4.4.5 消費電力測定

エンコーダを 12V 電源に接続し、エンコーダ全体の消費電流を記録します。

12V 電源での消費電流は 39mA です。この値には、コイルの消費量とすべてのシグナルチェーンチップの消費量の両方が含まれます。リゾルバには、誘導性エンコーダを使った同様の動作原理があり、励起信号を注入する必要がありますが、リゾルバは通常、40mA から 200mA まで、高い励起電流を必要とします。誘導性エンコーダには、リゾルバと比較して消費電力において大きな利点があります。

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-010961](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.2 BOM

部品表をダウンロードするには、[TIDA-010961](#) 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-010961](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.4 Altium プロジェクト ファイル

Altium Designer® のファイルをダウンロードするには、[TIDA-010961](#) のデザイン ファイルを参照してください。

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-010961](#) のデザイン ファイルを参照してください。

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-010961](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.2 ツールとソフトウェア

LDC507x センサ デザインツール LDC5072X 設計ツールは、LDC5072-Q1 を使用してモーター位置を監視する誘導性 PCB センサの設計と実装をする際に、迅速化に役立つ強力なリソースです。

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。

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、『モーター制御での位置センサの選択』[Analog Design Journal](#)
2. 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 レポート
3. 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
4. テキサス インスツルメンツ、AMR (異方性磁気抵抗) 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
5. テキサス インスツルメンツ、統合型モータードライブ向け、48V、85A、小型フォーム フакタ、3 相インバータのリファレンス デザイン
6. テキサス インスツルメンツ、『TMS320F28003x リアルタイム マイクロコントローラ テクニカル』リファレンス マニュアル

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、独自の質問をしたりすることで、設計で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。

商標

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

Arm® and Cortex® are registered trademarks of ARM Limited.

are registered trademarks of Arm Limited.

Altium Designer® is a registered trademark of Altium LLC.

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、産業用アプリケーション向けのカスタム ドライブ コンポーネントとアセンブリの仕様指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、産業用アプリケーション向けのカスタム ドライブ コンポーネントとアセンブリ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默示保証、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、明示的または默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 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 © 2025, 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默示保証、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、明示的または默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、(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](#)、[TIの総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#)またはTI製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TIがカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TIの製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025年10月