

モーター制御の位置センサの選択

はじめに

モーターは「センサレス」化の傾向がありますが、位置センサは残されますか？この質問に対する完全な答えはかなり複雑ですが、基本的には、位置センサは存在します。ブラシレス DC モーターブロック整流またはフィールドオリエンテッドコントロール (FOC) ブラシレス AC モーターを使用した、センサレス設計の電動工具などの用途では、回転角度センサなしで動作します。ただし実際には、産業用ロボットや人型ロボット、自律型移動ロボット、リニアモーター搬送システムのような最終製品では、回転角度センサやリニア位置センサが絶対に必要です。

ブラシレスモーター制御による位置センサの使用

位置センサは、ブラシレス DC またはブラシレス AC モーターによる固定子電流の整流だけでなく、速度と位置の制御にも使用されます。多くの場合、産業用多軸ロボットでは、モーターシャフトとロボットの軸の間にギアが含まれています。回転角度センサをモーターシャフトと結合する場合は、回転部の角度を検出するだけでなく、モーターシャフトの回転をカウントして、対応するロボット軸の等価絶対角度位置を制御する必要があります。適用方法が異なるとエンコーダの種類も異なります。

インクリメンタルエンコーダとアブソリュートエンコーダ

インクリメンタルエンコーダは通常、ABZ デジタルまたはアナログの単方向インターフェイスを使用します。このインターフェイスでは、2 つの直交符号化デジタルパルストレイン信号 (A と B) または 2 つのアナログ Sin/Cos 信号 (A と B) により、約 10 ~ 28 ビットまでの高い分解能で低レイテンシの相対角度測定が可能です。オプションのインデックス (Z または I) を使用すると、絶対的な機械的角度情報を使用できます。インクリメンタルエンコーダでは起動時に絶対角度が不明なため、インデックスが発生する前に 1 回転まで回転する必要があります。このため、これらのエンコーダは、非常に短いレイテンシ (1μs 未満) が要求され、起動時の絶対角度情報を必要としない速度可変アプリケーションに最適です。

逆に、単回転または多回転のアブソリュートロータリーエンコーダでは、起動時の絶対角度位置情報が提供されます。ベンダー固有のプロトコルを使用する双方向 **RS-485** インターフェイスが用意されており、時間トリガ角度の測定値に加え、回転速度や回転数などの情報も得られます。角度分解能は通常、10 ~ 30 ビットを超え、レイテンシは 10μs と低いため、幅広い産業用アプリケーションに対応できます。位置分解能は通常、デジタルインターフェイス経由で送信されるデータフォーマットです。たとえば、20 ビットの整数フォーマットの角度の分解能は $360/2^{20}$ です。0h = 0 度、0xFFFF = 360 度 - $360/2^{20}$ です。全体的なシステムノイズは量子化ノイズよりも大幅に高くなります。この効果の特性は有効ビット数 (ENOB) で明らかです。

式 1 は、測定角度の標準偏差により、角度の ENOB を計算しています。

$$\text{ENOB [bit]} = (20 \cdot \log_{10}(360/\text{stddev}(\text{angle})) - 1.76)/6.02 \quad (1)$$

角度ノイズ信号の実効値は標準偏差 (1 シグマ) と等しくなります。**図 1** は角度精度を示しています。関連する角度誤差は標準偏差よりも大きくなっています。角度精度はピークノイズ (多くの場合は 6 シグマ値を使用) だけでなく、1 回転に対する非線形性に依存します。

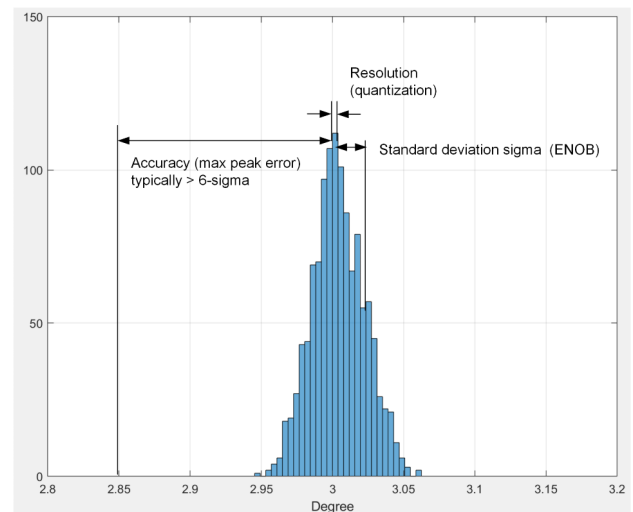


図 1. 静的角度分布。

FOC モーター制御技術とエンコーダの要件

図 2 に示す FOC 方式は、回転子の磁束角度に応じて生じる固定子電流ベクトルを制御して、永久磁石同期モーターのトルクを最大化する高度な技術です。FOC を使用すると、静止状態から高速動作まで、過渡応答が高速で滑らかなトルクを実現できます。回転子の磁界角を正確かつ低レイテンシで測定すると、3 つの固定子位相電流 (i_u , i_v , i_w) が回転子の磁界方向座標系に分解され、 i_q はトルク生成電流、 i_d は弱め界磁電流と等しくなります。

人型ロボットなどの最終製品では、絶対回転角度は通常 $1 \sim 0.1$ 度の精度、12 ～ 15 ビットの ENOB、8kHz ～ 32kHz のサンプルレートで測定されます。回転角度はモーター位相電流と同時に検出されます。20 μ s 未満の低レイテンシ角度で測定すると、マイクロコントローラ (MCU) が制御アルゴリズムを実行して、次の PWM サイクルの PWM (パルス幅変調) を更新するのに十分な時間を確保できます。

ほとんどの人型ロボットと同様に、回転角度センサをモーターハウジングに組み込むことも、モーターシャフトに取り付けるために別のハウジングに組み込むこともできます。どちらの場

合も、高温での動作が求められます (多くの場合、最大 125°C の環境温度)。制御マイコンがロータリーエンコーダの近くに配置される人型ロボットでは、TI の TMAG6180-Q1 異方性磁気抵抗 (AMR) センサなどの 360 度角度センサにより、コスト効率の優れた低レイテンシのインターフェイスを実現できます。

回転式モーターとは異なり、リニアモーターベースの輸送システムでは絶対線形位置の検出が必要ですが、最大トルクには FOC を適用します。多くの場合、100 μ s 未満のレイテンシの 12 ビット位置分解能で十分です。

さらに、産業機械における国際電気標準会議 62061 または国際標準化機構 (ISO) 13849 の機能安全を実現するには、安全度水準または性能レベルに基づいて決定される安全認証エンコーダや、ランダムなハードウェア障害を検出するための位置センサによる追加の診断が必要です。車載アプリケーションにおいて、ISO 26262 準拠の設計ではシステム起動時に診断を実行しますが、産業用システムでは多くの場合週 7 日 24 時間稼働することが多いため、通常の動作中に継続的に診断する必要があります。

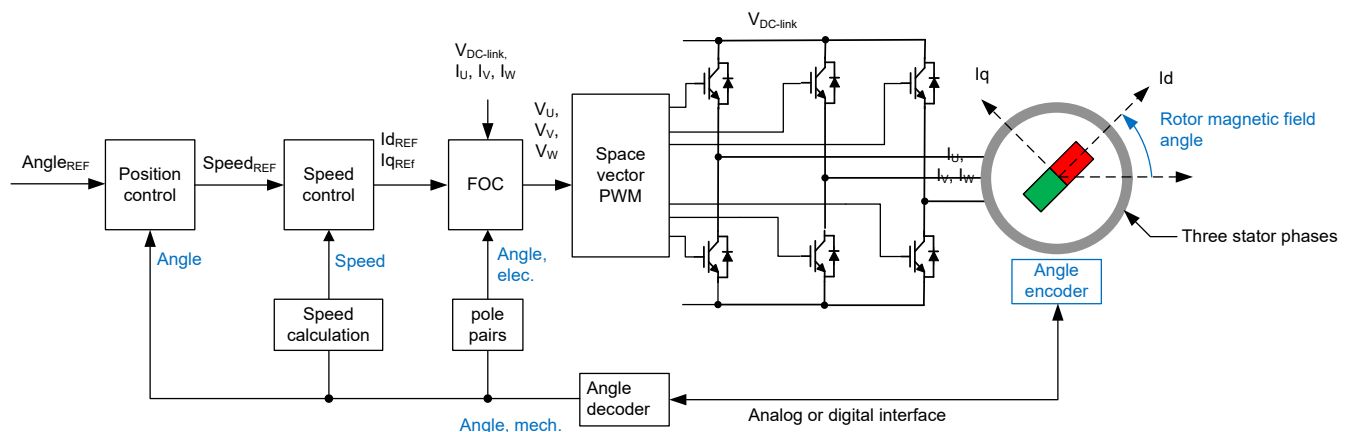


図 2. カスケード式位置、速度、FOC。

位置センサ技術

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。通常、光学センサは最高の分解能を提供し (磁気センサと誘導センサの方が信頼性に優れる)、システム全体のコストを抑えることができます。産業用または車載用システムでは、付くの配線に大電流が流れるため、浮遊磁界に影響されない誘導式などのセンサ技術が必要です。静電容

量式センサは通常、誘導式センサや磁気式センサよりも解像度が低く、それほど一般的ではありません。

(モーター統合に起因する高温などの) 過酷な環境におけるコスト重視のシステム向のため、TI は磁気式および誘導式の位置センサを提供しています。

磁気位置センサ

磁気エンコーダは、回転動作または直線動作を検出するコスト効率の優れた方式を可能にし、ほこり、油、水などが存在する過酷な環境での耐性を実現します。磁気位置センサは磁場の変化を検出して、それらを電気信号に変換し出力信号を生成します。ホールエフェクト、AMR、トンネル磁気抵抗 (TMR)、巨大磁気抵抗 (GMR) など、磁気位置センサ技術にはさまざまなものがあります。表 1 は各センサの利点と欠点を示しています。

パラメータ	ホールエフェクト (磁束コンセンタレータなし)	ホールエフェクト (磁束コンセンタレータあり)	AMR	GMR	TMR
動作領域	-	-	飽和	飽和	飽和
コスト	最も低コスト	> ホール	> ホール	> ホールと AMR	最も高コスト
測定角度	XYZ	XYZ	XY	XY	XY
角度範囲 (度)	0-360	0-360	0-180 (TMAG618 0-Q1 は 360 まで拡大)	0-360	0-360
レイテンシ	高	高	低	低	低
角度誤差 (度)	<1.2 1	<1 1	<0.6 1	>1 2	<0.6 2
磁束密度範囲 (磁気エアギャップ距離を制限) (ミリテスラ単位)	0-300	0-70	>20 - 制限なし (TMAG618 0-Q1 は 1,000 まで許容)	20-120	20-120

表 1. 磁気センサ技術の比較: 主な機能と仕様:

1. ゲインおよびオフセットのキャリブレーション後。

2. ゲイン、オフセット、直交性キャリブレーション後

3D ホール効果リニアセンサを使用したリニア位置の例

5m/s ~ 15m/s で移動する高速移動ペイロードキャリアを搭載したリニアモーター搬送システムでは、多くの場合、100μs 未満のレイテンシおよび 8kHz 以下のサンプルレートの 12 ビット位置分解能で十分ですが、図 3 に示すように、複数の位置センサを高速シリアルペリフェラルインターフェイス (SPI) バス経由で単一のマイコンに接続します。

TMAG5170 3D ホール効果センサには、高精度、低レイテンシ、基板配置の柔軟性という 3 つの主な利点があります。全温度範囲にわたる感度誤差ドリフトは 2.8% 未満です。10MHz SPI により低レイテンシが可能になります。さらに、オンボードの 3D センシング素子により、XY、YZ、XZ の検出方向を設定できるため、磁石に対するセンサの配置位置の柔軟性が向上します。

クワッド 3D ホール効果センサを搭載した高精度で低レイテンシのリニア位置検出のリファレンスデザインは、25mm 間隔で配置した TMAG5170 を使用して、高精度で低レイテンシのリニア位置検出を実現します。C2000™ マイコンは 4 つの TMAG5170 センサすべてから Z と X 磁場データを 8kHz 以上のサンプルレートで読み取り、0.15mm 未満の誤差、57.5μs 未満のレイテンシで移動する磁石の位置を計算します。

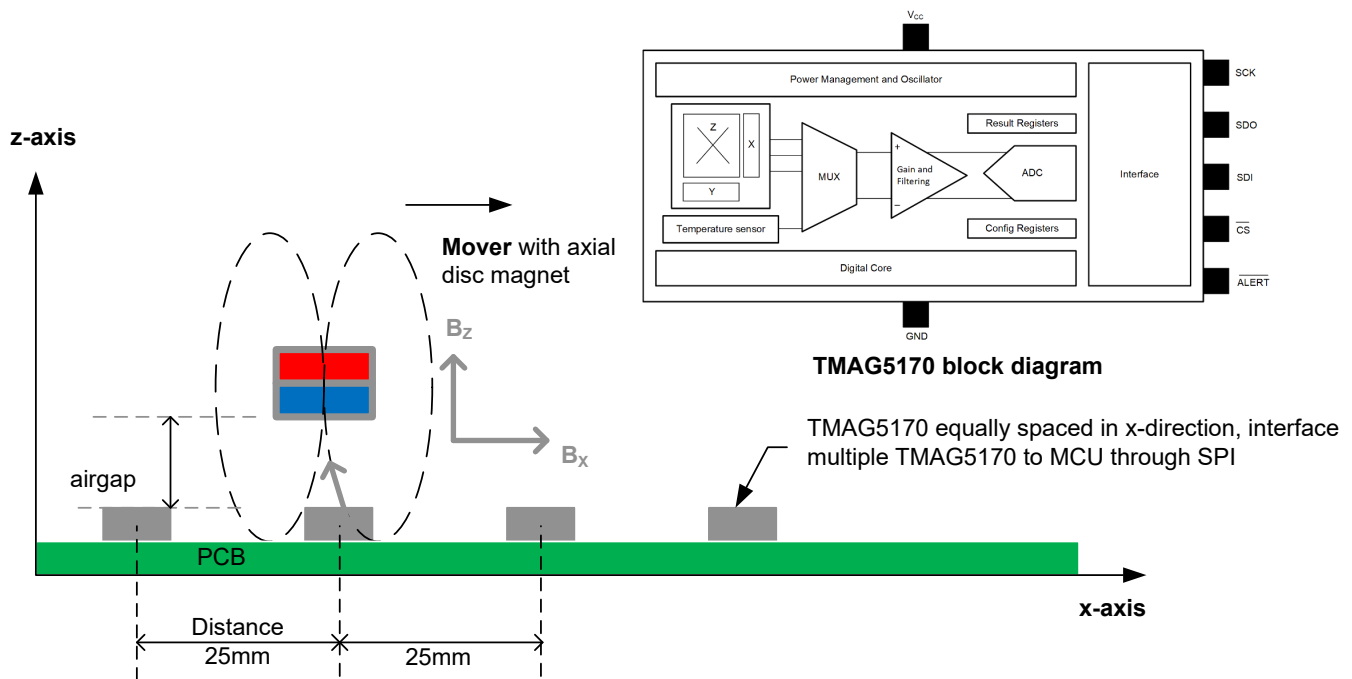


図3. リニアモーター搬送システムの TMAG5170。

AMR センサを使用した回転角度の例

AMR センサは 4 つの磁気抵抗ホイートストンブリッジで構成され、2 つのブリッジの出力端子の電圧差が外部磁界の大きさを反映します。

ホール効果センサと比べ、AMR センサはより高い周波数で動作し、信号対雑音比 (SNR) が高くなります。GMR および TMR センサと比べ、AMR センサの直交誤差は無視できる程度です。高精度のエンコーダを必要とするサーボドライブのような用途では、磁界の耐性が高く全体的に耐性に優れた AMR センサが、多くの場合望ましい選択肢となります。

TMAG6180-Q1 2D AMR 角度センサは磁界を測定して、これらの磁界に比例する 2 つの差動 (またはシングルエンド) 電圧出力を生成します。TMAG6180-Q1 の $2\mu\text{s}$ 未満のレイテンシにより、高速移動に起因する角度誤差も最小限に抑えられます。内蔵のホール効果スイッチは、2 つのデジタル象限出力 (Q0 と Q1) を生成するため、角度検出範囲が 360 度に拡張されます。正弦波形および余弦波形と合わせて、Q0 および Q1 のデジタル出力は絶対回転角度を判断するのに十分です。図 4 は TMAG6180-Q1 の機能のブロック図で、図 5 は出力波形を示しています。

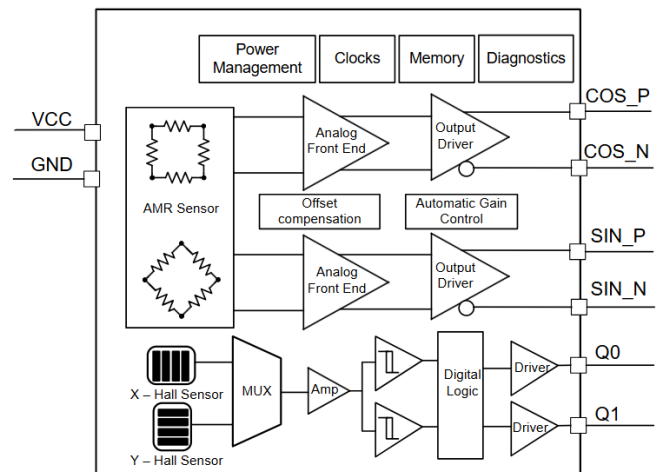


図4. TMAG6180-Q1 のブロック図。

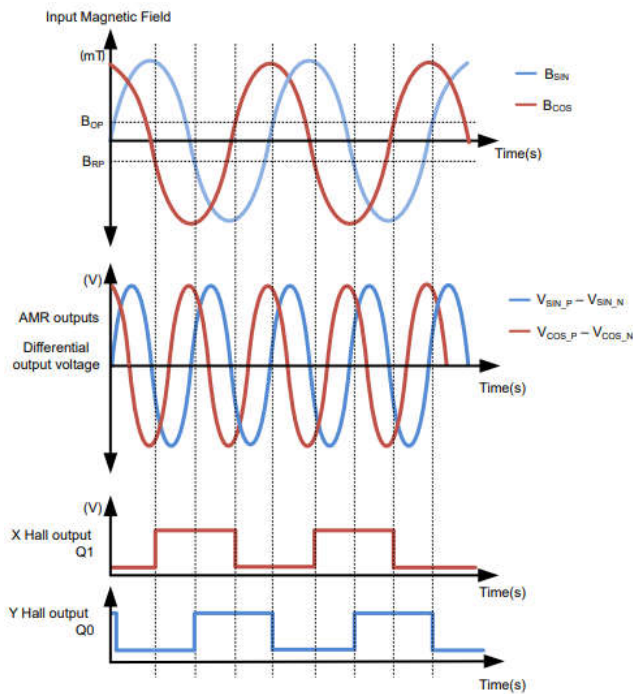


図 5. TMAG6180-Q1 の出力波形。

精度を向上させるには、マイコンは高速で ENOB の高い A/D コンバータを内蔵し、有限インパルス応答フィルタなどのデジタルフィルタを実行して信号チェーンのノイズを除去でき、機械的公差や信号チェーンのゲインとオフセットの不整合に起因する誤差を除去するための、追加の補償アルゴリズムを備えている必要があります。**AMR センサを使用した、高分解能、低レイテンシ、コンパクトな絶対角度エンコーダのリファレンスデザイン**は、TMAG6180-Q1 と **MSPM0G3507** マイコンを使用した小型フォームファクタ (直径 3cm) のリファレンスデザインで、デュアル 12 ビット ADC による最大 128 倍のオーバーサンプリングと算術アクセラレータを内蔵しており、効率の向上とシステムコストの削減に役立ちます。図 6 に示すように、このシステムは 15.4 ENOB に相当する 94.7dB の SNR と 0.05° 未満の角度誤差で角度測定を行います。

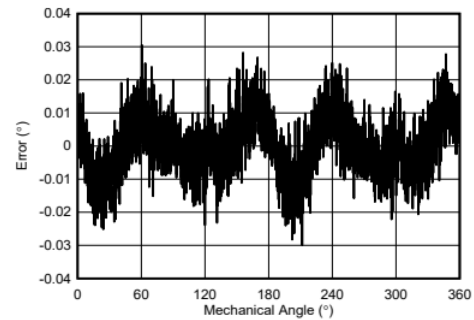


図 6. 25°C でオフセットキャリブレーションを行った場合の 1 回転に対する角度誤差。

インダクティブ方式による位置検出

インダクティブ方式の角度センサには、磁気センサに比べていくつかの利点があります。その主な利点は、外部 DC フィールドに対する固有の磁気耐性です。さらに、インダクティブ技術では、金属ターゲットがシャフトの周りを回転するときの位置を判定するため、誘導性金属ターゲットのみ (磁石がない) を検出コイルの近くに配置する必要があります。

図 7 は、各センサコイルに 1 つずつ搭載された 2 つの **LDC5072-Q1** インダクティブセンサを使用した、アブソリュートエンコーダを示しています。Nonius エンコーディングには 2 つの検出コイルが必要です。外側のセンサターゲットには 16 個の金属位置があり、内側のターゲットには 15 個ある可能性があります。両方のターゲットの間隔を均等にすると、完全な回転に対して一意のパターンが強制され、絶対角度を高精度で知ることができます。

機械式レゾルバはインダクティブ方式のアブソリュートエンコーダと同じ機能を実行しますが、サイズと重量が欠点となります。プリント基板上にインダクティブ方式のエンコーディングソリューションを直接構築できますが、レゾルバは歯の周囲に銅線を巻きつけた厚いスチールラミネーション上に構築されます。また、レゾルバは機械的構造のため、製作コストが増加します。最後に、レゾルバは 500mW の電力 (7V_{RMS} で 70mA を想定) を消費するため消費電力が問題になる可能性があります。

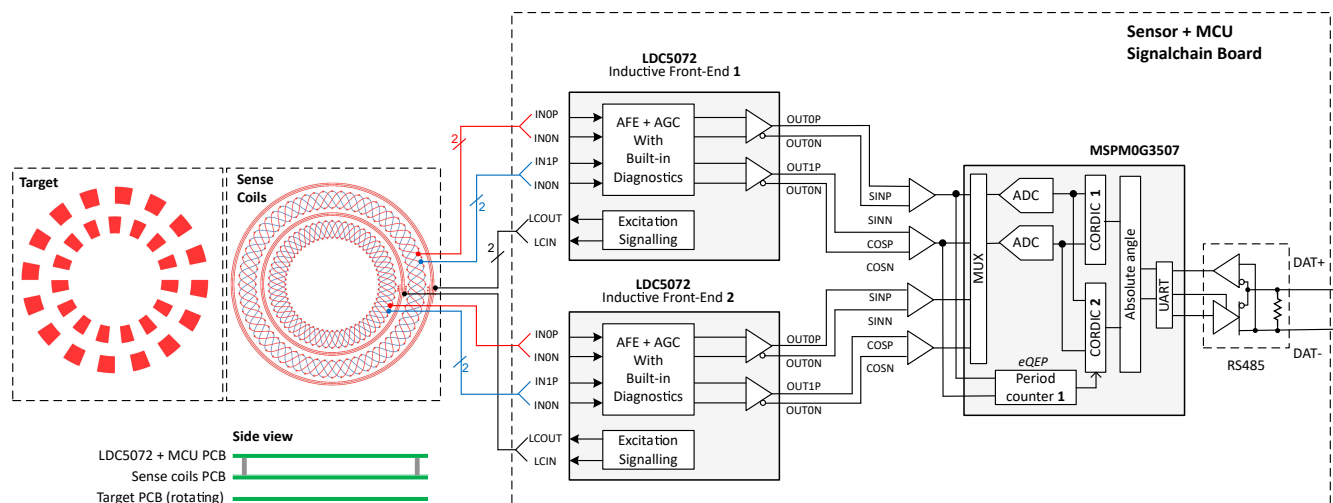


図 7. LDC5072-Q1 を使用したアブソリュートエンコーダ。

まとめ

最適な位置センサはモーター駆動システムの要件によって異なります。考慮すべき最も重要な条件は、コスト、性能、動作温度、サイズです。別の側面は、産業用または車載用ソリューションに、診断機能または安全機能を追加するかどうかです。モーターとエンコーダの種類ごとに固有の要件があるため、アプリケーションに最適なセンサタイプを選択することが重要です。

その他の資料

- アプリケーションの要約、『[人型ロボットのモーター制御](#)』をお読みください。
- 『[正確なモータ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](#)』を確認してください。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

C2000™ is a 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。

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated