

## Application Brief

# ヒューマノイド ロボットのモーター制御



Kristen Mogensen

### はじめに

製造業やサービス業における自動化の需要の高まりにつれて、ヒューマノイド ロボットの開発も進んでいます。ヒューマノイドは、人間の動きをよりよく模倣するために、周囲の環境に対する自由度 (DOF) と高速応答時間 (ミリ秒単位) によって、より複雑で正確になっています。図 1 に、ヒューマノイド ロボットの一般的なモーターとモーション機能を示します。

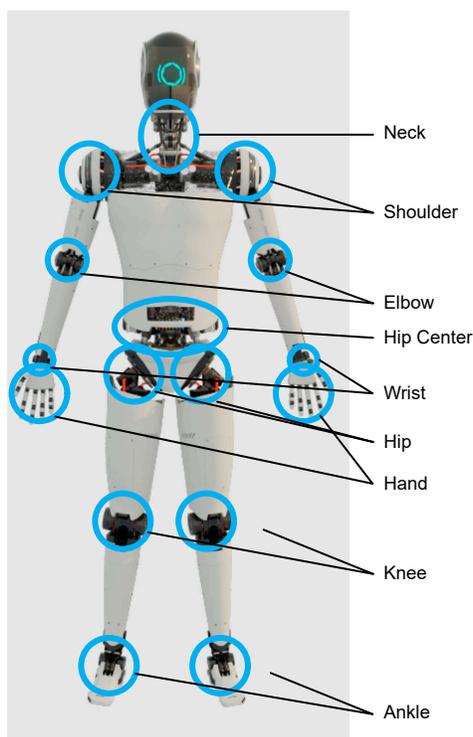


図 1. ヒューマノイド ロボットの DOF に追加する位置を表示します

DOF を高くするのは、ヒューマノイド ロボットでより多くの電動モーター ドライブが必要になることを意味します。ロボット設計におけるドライブの位置は、ドライブのさまざまな要件が定義されます。主な仕様は次のとおりです：

- 通信インターフェイスのアーキテクチャ
- 位置センシング
- モーター タイプ
- モーター制御アルゴリズム
- 電力段要件
- 電子回路のサイズ
- 機能安全に関する検討事項

現時点で、ヒューマノイド ロボットの機能安全の要件を定義する標準は存在していません。ただし、ロボットと産業用ロボットに関する標準は存在しています。将来の標準化機関では、需要が増加し続ける中で、ヒューマノイド ロボットの安全性要件を指定することが予想されています。安全要件が定義されるまで、ヒューマノイドの設計者は現在のシステム設計に対し

て適切な注意を払い、将来的な再設計に投入する労力を最小限に抑える必要があります。ISO13482、ISO10218、および ISO 3691-4 は、将来に対する予想を詳しく説明することができます。

## 通信インターフェースのアーキテクチャ

ロボット内でドライブの位置と関係があるので、すべてのドライブとの通信を最適化すると同時に、ケーブル配線量を最小限に抑えることが重要です。最適化を実現するには多くのオプションがあります。最も一般的に使用される方法は、[図 2](#) と [図 3](#) で示されたデジチェーン通信とリニアバスのトポロジです。

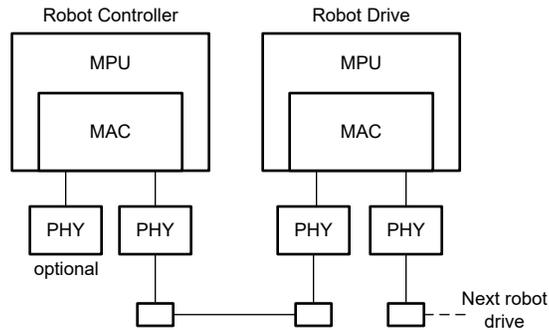


図 2. デジチェーン通信

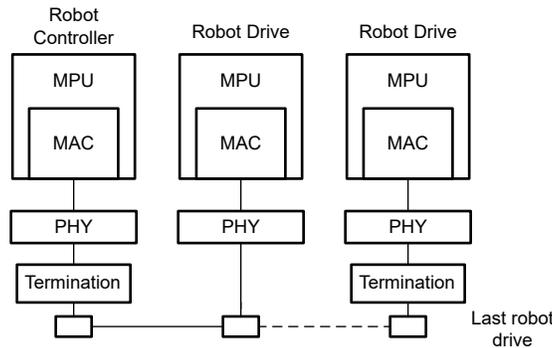


図 3. リニアバストポロジ

トポロジを選択した後、ドライブに十分な応答時間を確保するために、帯域幅、タイミング、レイテンシの要件を検討します。応答時間は、定義されたデータフレームサイズに基づいて、必要なリアルタイム対応の通信プロトコルを決定できます。通信インターフェースの帯域幅要件は、分散型モータードライブと、集中型と外部のロボット モーションコントローラの間でモーター制御アルゴリズムを分割し、ノード間で必要とされる通信フレーム サイズを最小限に抑える方法の決定にも影響されます。

通常、通信システムの最小帯域幅要件は約 8Mbit です。ただし、トレンドが示すように、設計のトレンドの進化につれて、システム診断機能と安全機能に関する要件は厳しくなっています。

システムの要件に応じて、ヒューマノイドシステムが通常使用する通信インターフェースは、CAN-FD または イーサネットベース (EtherCAT を含む) のどちらかです。TI は、これらの通信プロトコルに対応するように設計された物理層 (PHY) トランシーバと組込みプロセッサを提供しています。

[CAN トランシーバ](#)と[イーサネット IC](#) は、ヒューマノイドシステムの開発に使用されるデバイスです。

## 位置センシング

ヒューマノイド ロボットの動作がモーター位置データを受信するために、経路計画を定義する必要があります。位置データを利用することで、ヒューマノイド ロボットの制御された動作が可能になります。高精度で制御された動作を実現するには、ロボットにモーターの情報をキャプチャするための回転子位置センサを搭載する必要があり、モータードライブを通して集中処理コンピュータに情報を効率的に渡す能力も備える必要があります。モーターに必要な精度に応じて、さまざまな回転子位置センサが使用されています。最も一般的に使用されるエンコーダの一部を次に示します：

- 光学エンコーダ
- 磁気エンコーダ
- インクリメンタル エンコーダ
- SIN/COS リゾルバ

これらのエンコーダは、ドライブに接続して、回転子の角度データを提供するための異なるインターフェイスを備えています。これは、位置制御の実施に必要です。これらのインターフェイスには特定のハードウェアが必要なため、モーター制御プロセッサは以下のエンコーダ構成の少なくとも 1 つをサポートする必要があります：

- BiSS, Endat, Hiperface などの専用シリアル インターフェイス、または他のデジタル アブソリュート・エンコーダ
- リゾルバ インターフェイス向けのサンプル/ホールド機能付きの ADC コンバータ
- インクリメンタル エンコーダ向けの直交エンコーダ パルス
- 磁気エンコーダ インターフェイス用のシリアル インターフェイス

モーターとモーターのギアの実装方法に応じて、1 つのモーターに複数のエンコーダが必要になる可能性があります。TI は、エンコーダ インターフェイス システムを実現するため、アナログとプロセッサ IC の両方を提供しています。位置センシング方法では、[RS-485](#) と [RS-422](#) トランシーバと、[多軸のリニア位置センサと角度位置センサ](#)を使用します。

## モーター タイプ

ヒューマノイド ロボットはバッテリーを使用して動作するため、効率を最大化し、ロボットの動作時間枠を延長するようにモータードライブが設計されています。

高い電力レベルを使用する場合、ヒューマノイド ロボットに PMSM モーターのようなモーターを組み込むことができます。ブラシ付きの DC モーターは、手制御や指制御のようないくつかのローパワー ケースに使用できます。ただし、現在の設計トレンドによれば、将来すべてのモーターがブラシレスになることが示されています。

PMSM モーターには、台形波または正弦波巻線の 2 つのオプションがあります。巻線と制御アルゴリズムの選択は、モーターの制御精度に影響を及ぼします。

モーター設計のもう 1 つの重要なトピックは、FET により迅速にスイッチングするオプションです。その結果、モーターの重量あたりのトルクを改善する新しい設計オプションが誕生します。

## モーター制御アルゴリズム

モーター タイプを選択した後、ユーザーはモーターを制御する方法を決定できます。制御ループを実装するためにいくつかの方法がありますが、モーター制御は通常 [図 4](#) に示すものと同様、必要なアナログサブシステムとプロセッサ ペリフェラルを示しています。

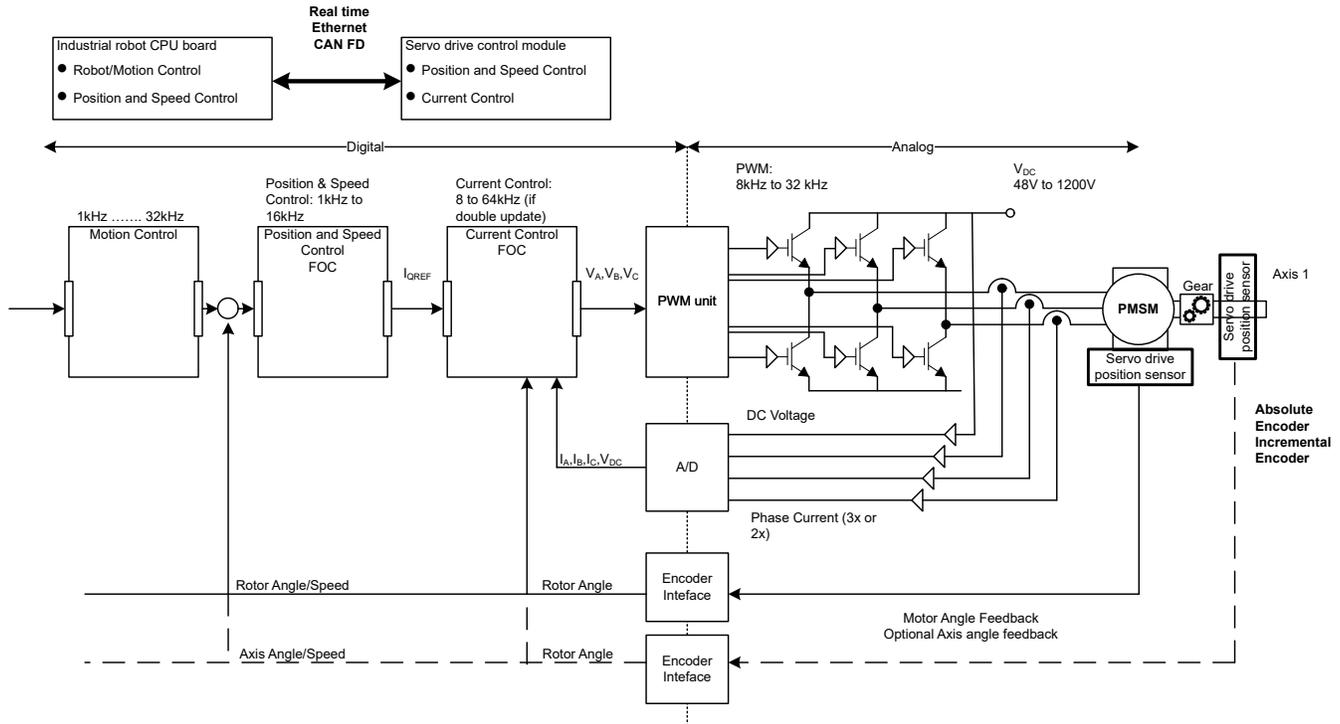


図 4. ロボット制御用途のリアルタイム通信のタイミング需要

表 1 は、図 4 を一般的なテンプレートとして使用し、アルゴリズム FOC またはブロック整流を選択するときに必要なペリフェラルと性能を列挙します。

表 1. モーター制御タイプでのペリフェラルと回路の需要

モーター タイプ	ブラシ付きのモーター	矩形波 PMSM	正弦波 PMSM
ハーフブリッジ	×2	×3	×3
電流センス	×1	×1	×2 ~ ×3
電圧センス DC リンク	×1	×1	×1
角度センサの精度	≤1°	60°	≤1°
処理能力	Low	Low	中
効率	低	中	High

TI はアルゴリズムと角度センサの要件に適合する多様な MCU を提供しています。重要な要因は IC のサイズと、高性能ドライブシステムを実現するためのリアルタイム能力です。C2000 リアルタイム マイコンと Arm ベースのマイコンは、モーター制御アルゴリズムで使用されます。

### 電力段要件

ロボットのドライブ位置に応じて、電力レベルは 4kW ~ 10W の範囲内で変動しており、ドライブの大半は 10W ~ 1.5kW です。

通常は、60V 未満の SELV 電圧範囲内で動作します。その結果、コンポーネントは最大 60V で動作する必要があります。アンプ、FET、ゲートドライバシステムの潜在的なノイズの影響を低減するために、最大 100V で動作する部品が推奨されます。ドライブの電氣的仕様を定義した後、他の設計上の考慮事項があります。

プリント基板 (PCB) を実装するために利用できる物理的サイズは、設計上のもう 1 つの考慮事項です。小型サイズの IC と高度に最適化された電力密度の設計は、小さなスペースで設計の目標を達成するためには不可欠です。高い電力密度は、ロボットの外部が 55°C を上回ることが許容されない場合、ロボットの温度制限につながる可能性があります。55°C では、30 秒以内に全厚の皮膚が燃焼します。温度管理方法には、ファンや液体などの追加の冷却手段を含めないでください。

温度管理とスペースのバランスを考慮すると、サイズあたりのワット数に関連して電力段のバランスを維持することができます。この状況は、電力段のアーキテクチャに影響を及ぼします。発生する可能性のある問題の 1 つは、電力段をより高い周波数で動作させる必要があるということです。この問題は一般的に MOSFET に存在しますが、GaN FET のような新しいテクノロジーでも、MOSFET ベースのシステムと比較してスイッチング性能が向上します。温度が敏感なシステムの場合、MOSFET テクノロジーに比べてスイッチング損失が最小限であるため、GaN FET の理論的効率は高くなります。周波数が高くなると、MCU 内に追加機能を搭載して、高い周波数のスイッチングを十分な分解能で実現するのに必要な信号伝達をサポートする必要があります。

TI の MOSFET ゲートドライバを採用すると、お客様は MOSFET を可能な限り最高の速度にスイッチすることができます。また、TI の低電圧 GaN FET を利用することで、ロボット内の位置ごとに最適な FET タイプを迅速に比較し、検討することができます。

ドライブを実装するには高性能 MOSFET または GaN FET が必要であり、結果的にモーターの効率が向上します。洗練されたアルゴリズムは、モーター FET スwitching 需要と損失の低減に役立ちます。

ヒューマノイド ロボットはバッテリーを使用して動作し、電圧は通常 48V、あるいは 39V ~ 54V の範囲内です。バッテリーの充電状態によって異なります。使用電圧は、バッテリー充電の最小使用電圧として設定されるレベルによって異なります。先に、39V の時に、ドライブに必要な最大電力は 4kW で、ロボットドライブは必要な電力を供給するために約 102Arms の電流で最大動作する必要があることがわかります。また、0A 付近の高精度測定を考慮すると、FET のデッドタイムを短縮でき、0A 付近での電流測定の直線性にも利点があり、低電流時の測定精度向上につながります。

また、電力段の要件を評価し、目的の性能レベルを達成するために適切な電流センシング部品を選択する際にも、電流センシングは設計上の重要な検討事項です。

TI は、位相内電流センスとローサイド電流センスのアナログ オプション、およびシステムを効率的に実装する方法を示す設計ガイドラインを提供しています。通常、相内電流センシングは、常に電流に対応し、測定の精度を増やすために使用されます。電流を測定するには 3 種類のオプションがあります。

**表 2. 相内電流測定用の標準的な相内電流センシングオプション**

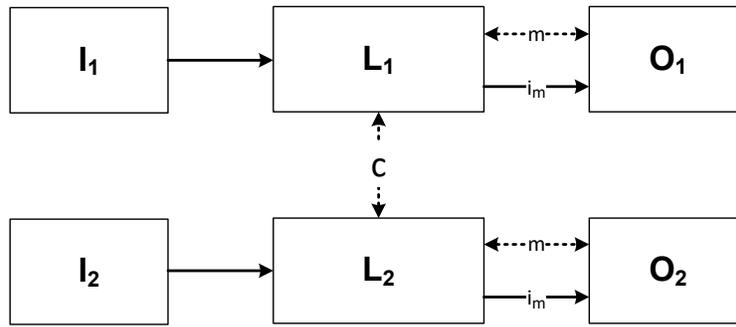
	電流センシング アンプ	デルタ シグマ モジュレータ	ホール センサ
精度	中	High	Low
電流レベル	50A	50A	100A
PCB の難易度	中	中	低

電流センス アンプとデルタ シグマ変調器では、これらのテクノロジーの電流レベルの使用は、部品の改良を進めていることで、約 100A まで緩やかに移行しています。

- [電流センシング アンプ](#)
- [デルタ シグマ モジュレータ](#)
- [ホール センサ](#)
- [GaN FET 電力段](#)
- [ゲートドライバ](#)

## 機能安全

将来の設計を計画する際には、機能安全の認証を簡素化するデバイスを選定することが重要です。ISO13482、ISO10218、および ISO 3691-4 の各標準は、今後ヒューマノイドに何が期待されるかを明確にしています。Class C 標準 (ISO10218 および ISO3691-4) は両方とも ISO13849 を参照し、システムは PLd でなければならないと述べています。ただし、ISO3691-4 はアーキテクチャを実装者に任せ、ISO10218 は CAT3 アーキテクチャを義務付けています。これらの標準の最悪の状況を考慮すると、ヒューマノイド ロボットには少なくとも CAT3 PLd の安全性に関する考慮事項を検討する必要があります。CAT3 システムを実装する場合は、[図 5](#) に示す安全アーキテクチャを配置する必要があります。



**Key** *Illustration from IEC13849-1:2023 figure 10*  
 $i_m$  Interconnecting means  
 $c$  Cross Monitoring  
 $I_1, I_2$  Input device  
 $L_1, L_2$  Logic  
 $m$  Monitoring  
 $O_1, O_2$  Output device  
 Dashed lines represent reasonably practicable fault detection

図 5. IEC13849-1:2015 図 10

TI は、包括的な安全性資料を含むデバイスを多数提供しており、お客様は安全対応システムを構築できるようにします。

### サンプルシステム

図 6 では、1.5kW のシステム設計を解決するために TI のコンポーネントを使用した提案ソリューションをブロック図に示されます。次の部品を使用できます。

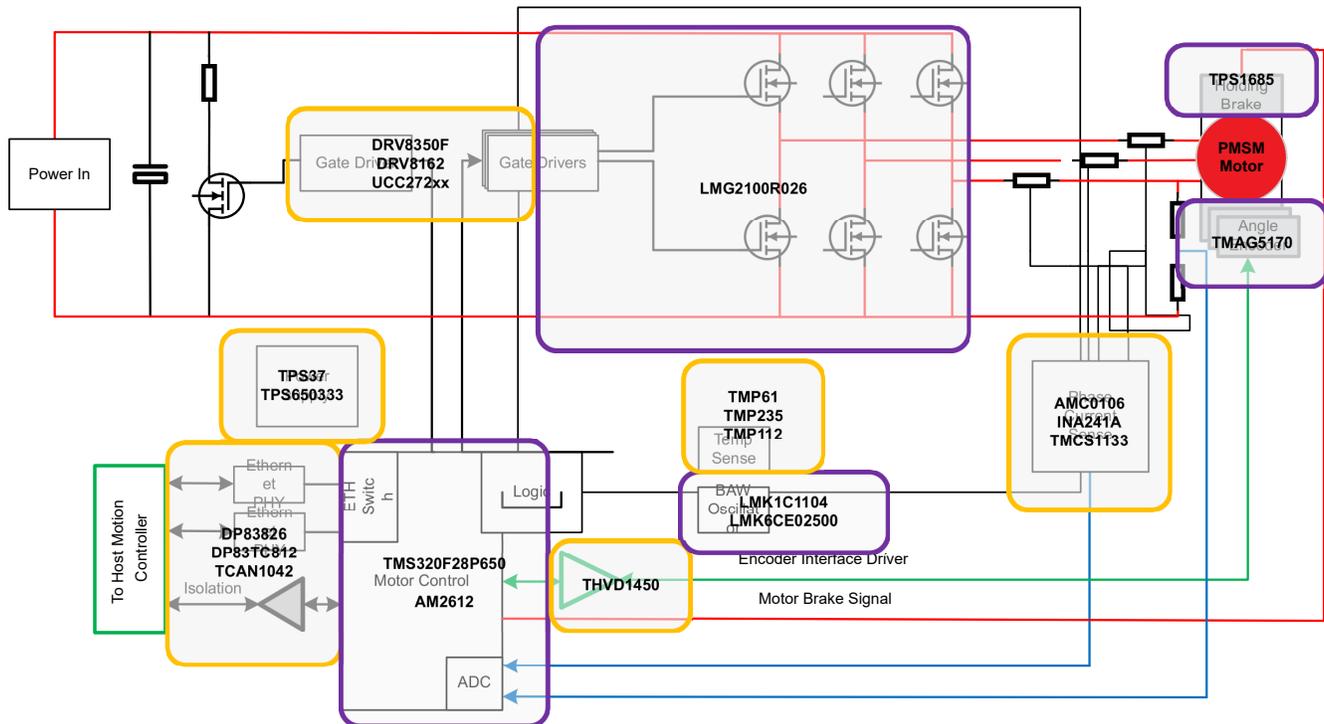


図 6. システムを実装する可能性がある部品を示すモータードライブソリューション

部品の詳細については、以下の TI 設計および EVM を参照して、システムレベルの性能結果を確認してください。

- [TIDA-010936](#)
- [TIDA-010956](#)
- [LAUNCHXL-F28P65X](#)
- [DP83TC812-IND-SPE-EVM](#)
- [TIDA-060040](#)

## まとめ

ヒューマノイド ロボットドライバを設計するには、精度、フレキシビリティ、革新性が求められます。テキサス インスツルメンツ は、エンジニアがロボット環境とシームレスに相互作用できる構築用ロボットの設計仕様に関する多様な仕様に適合できるように、統合回路の包括的な製品ラインアップを提供しています。TI は、数多くの評価基板、リファレンス デザイン、安全認証済みデバイスを提供しており、開発プロセスを簡素化し、市場投入期間の短縮と機能安全認証を自信をもって実現するのに役立ちます。TI と協力し、よりスマート、高速、安全なロボットを現実にするビジョンを推進します。

## 商標

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

## 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