

## Application Brief

# ヒューマノイドロボットにおける GaN FET の実用化



Eason Tian, Kyle Wolf

### はじめに

ヒューマノイドロボットには、サーボ制御システム、バッテリー管理システム (BMS)、センサシステム、AI システム制御など、数多くのサブシステムを統合されています。この複雑なシステムのスムーズな動作を維持しながら、人間の体積に統合する場合、サイズと放熱に関する要件を満たすのは困難です。ヒューマノイドロボット内で、スペースに最も制約のあるサブシステムは、サーボ制御システムです。人間に似た動作範囲を実現するためには、約 40 個のサーボモーター (PMSM) と制御システムをロボットの全体に導入するのは普通です。モーターが、首、胴体、腕、脚、つま先など、体のさまざまな部分にわたって配置されています。この数には、手にあるモーターは含まれていません。人間の手の自在な運動を模倣するには、片手で 12 個以上のマイクロモーターを統合する必要があるかもしれません。これらのモーターの電力要件は、実行される特定の機能によって異なります。たとえば、ロボットの指を動かすモーターは数個のアンペアしか必要としない一方、股関節や脚を動かすモーターは 100 個以上のアンペアが必要になります。

従来のサーボシステムと比較すると、ヒューマノイドロボットのサーボシステムにおいて、制御精度、サイズ、放熱に関する要件がさらに厳しくなっています。この記事は、モータードライブでの GaN (窒化ガリウム) 技術のさまざまな利点を説明し、GaN を活用してヒューマノイドロボットのサーボシステムが直面する課題を解決する方法を示します。

### より高い制御精度

各種サーボモータードライブアプリケーションで、モーター制御は通常、複数の制御ループレイヤに分割されています。電流/トルクループ、速度ループ、位置ループ、より上位に位置するモーション制御ループがこれらに該当します。これらのループは通常、カスケード形式で配置されており、各ループは「リアルタイム」処理要件を課しています。電流ループまたはトルクループは、最も迅速に制御を行うループです。この種の電流/トルクループより前に、各アップストリームループが複数回動作し、ダウンストリームループに対して入力参照値を提供します。図 1 に、標準的なカスケード制御トポロジーを示します。

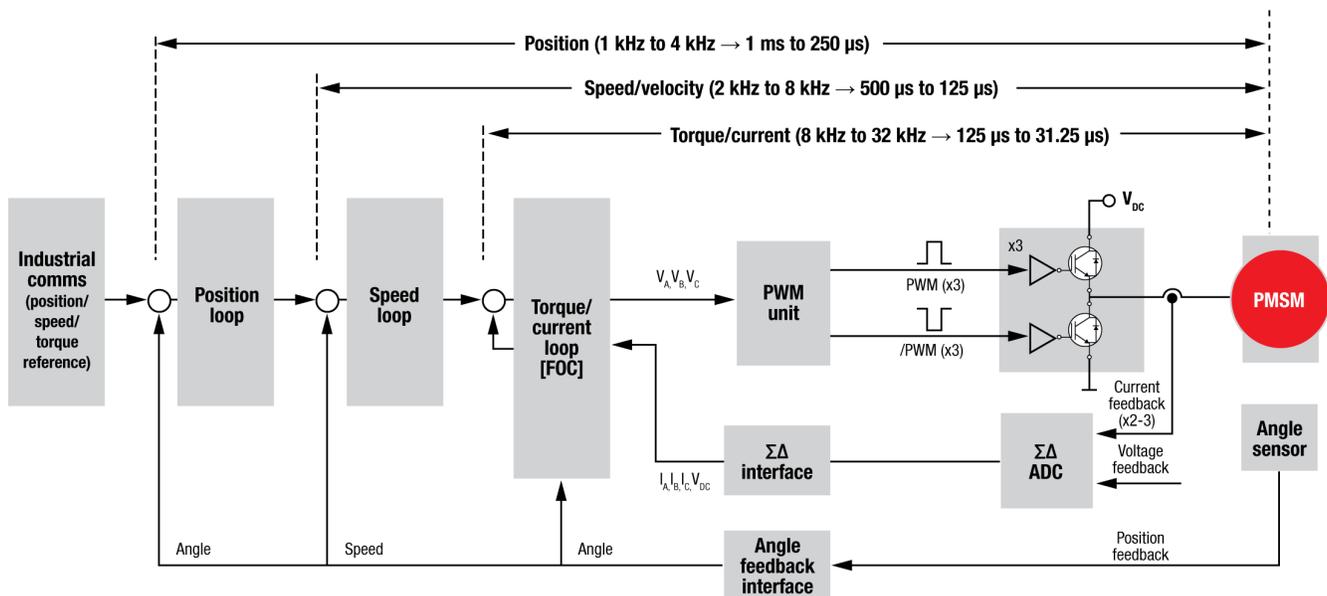


図 1. 標準的なサーボモーター制御ループテクノロジー

制御ループの最も重要な部分は電流ループです。通常、FET のスイッチング周波数は電流ループと同じで、約 8kHz ~ 32kHz です。電流ループの速度は、モーター制御の精度と応答速度に直接的な影響を及ぼします。ヒューマノイド ロボットの単純な動作は、多くのサーボ モーターの制御で成し遂げます。ロボット本体内にある約 40 個のモーターを調整すると同時に、システムの安定性を維持するには、各関節の制御精度と応答速度は非常に厳しい要件を満たす必要があります。モーター制御ループの速度と PWM 周波数を高くすることで、これらの要件を満たすことができます。たとえば、100kHz のスイッチング周波数 (図 2) を使用すると、モーター電流リップルが小さくなり、制御の精度が向上するため、より分解能の高いモーター電流を実現できます。高分解能のモーター電流波形は、電流が正弦波に良好であることも意味します。これにより、モーターの動作効率が向上し、モーターの発熱が低減されます。

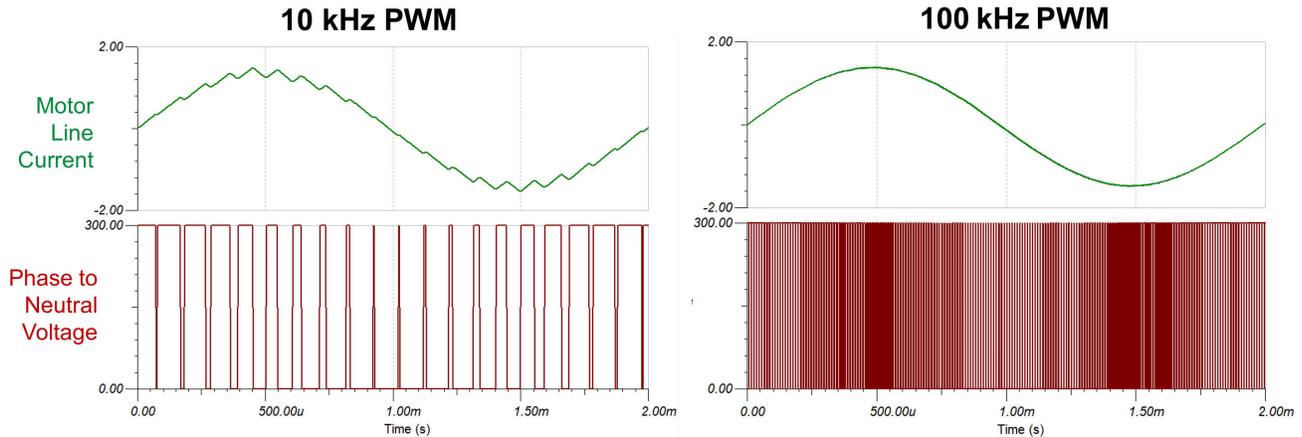


図 2. 100kHz および 10kHz PWM モーター電流

さらに、PWM スwitching 周波数を高くすると、DC バス コンデンサのサイズと静電容量を削減することができます。電解コンデンサをセラミックコンデンサに置き換える場合、バス容量がより小さい要件が課されます。サーボ出力段 FET は、PWM 信号を使用してバス コンデンサから定期的に電流を引き込みます。PWM 周波数を高くすると、単位時間あたりに消費される電荷の量が小さくなり、必要なバス容量が小さくなります。TIDA-010936 のテストによると、PWM 周波数を 20kHz から 80kHz に上げた後で、電解コンデンサを等価な容量のセラミック コンデンサに置き換えて、同様のバス電圧リップルを得ることができます。電解コンデンサに対して、セラミック コンデンサには、小型化、長寿命化、高周波特性の向上などの明らかな利点があります。

したがって、ヒューマノイドロボットを設計する際には、より高速な電流ループと PWM 周波数を考慮する必要があります。MOSFET ベースのサーボドライバの場合、PWM スwitching 周波数を高くすると損失が大きくなり、ドライバの発熱が深刻になります。Switching 周波数が 10kHz から 20kHz に上昇すると、MOSFET ベースのドライバによって全体の損失が 20% から 30% 増加します。これは、ヒューマノイドロボットにとっては納得できません。一方、GaN FET は高周波の場合も Switching 損失を低減します。TIDA-010936 のテストでは、ボードの損失は 40kHz と 80kHz でほぼ同じです。そのため、Switching 周波数の高い場合には GaN が特に適しています。

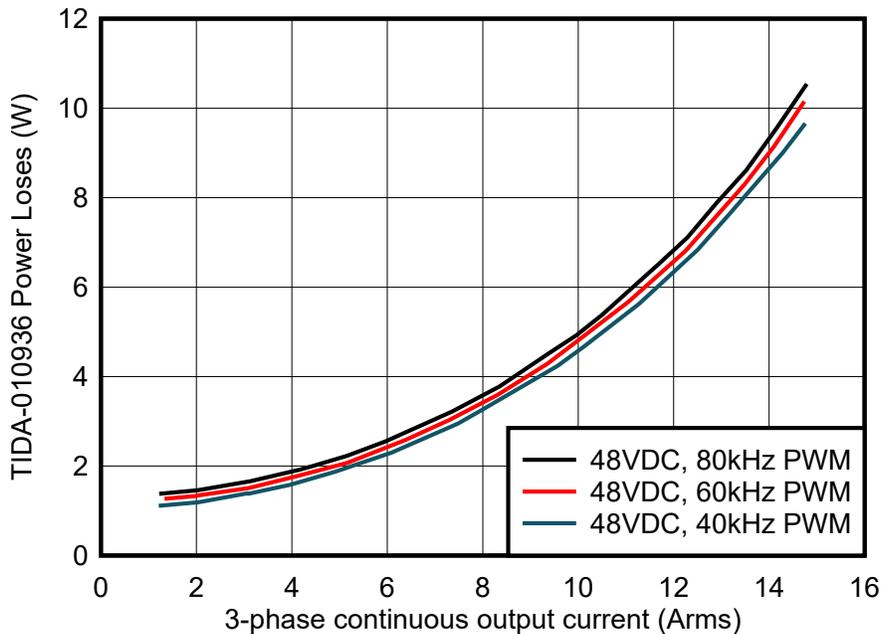


図 3. TIDA-010936 48V 入力での基板損失と 3 相出力電流との関係

### より低いスイッチング損失

GaN はこのような低いスイッチング損失を実現できる理由は、GaN デバイスの特性です。GaN デバイスはゲート容量 ( $C_g$ ) が小さく、出力容量 ( $C_{oss}$ ) が小さいため、Si-MOSFET に比べて 100 倍の高速でスイッチング速度を提供できます。ターンオフ時間とターンオン時間が短縮されるため、デッドタイムは 10 ~ 20ns などのより短い範囲内で制御できますが、MOSFET は通常約 1 $\mu$ s のデッドタイムを必要とします。デッドタイムが短縮されると、スイッチング損失が低くなります。また、GaN FET にはボディダイオードが存在していませんが、第 3 象限動作にとってフリーホイール機能を実現します。高周波 PWM の場合、MOSFET のボディダイオードがより大きな逆回復損失 ( $Q_{rr}$  損失) を引き起こします。第 3 象限の動作により、ボディダイオードに起因するスイッチ ノードのリングングと EMI のリスクも回避できます。これによって、電力密度の高いヒューマノイドロボット内の他のデバイスへの干渉を低減できます。

### より小さいサイズ

ヒューマノイドロボットの共有スペースは限られています。電源基板は通常、直径 5 ~ 10cm のリング PCB です。さらに、共有スペースにはモーター、レギュレータ、エンコーダ、さらにはセンサを統合する必要があります。重要なことに、設計者は限られたスペースで、より高い電力とより安定性の高いモーター制御を実現する必要があります。MOSFET と比較して、GaN は  $R_{sp}$  (特定の抵抗、ダイ面積との比較) が小さい、つまり同じ  $R_{dson}$  の MOSFET に比べて、GaN のダイ面積が小さいことを意味します。テキサス インストルメンツは、FET とゲートドライバを統合し、フットプリント面積をさらに低減しています。その結果、わずか 4.5 x 5.5mm のパッケージに 4.4m $\Omega$  ハーフブリッジとゲートドライバを収容することができます。

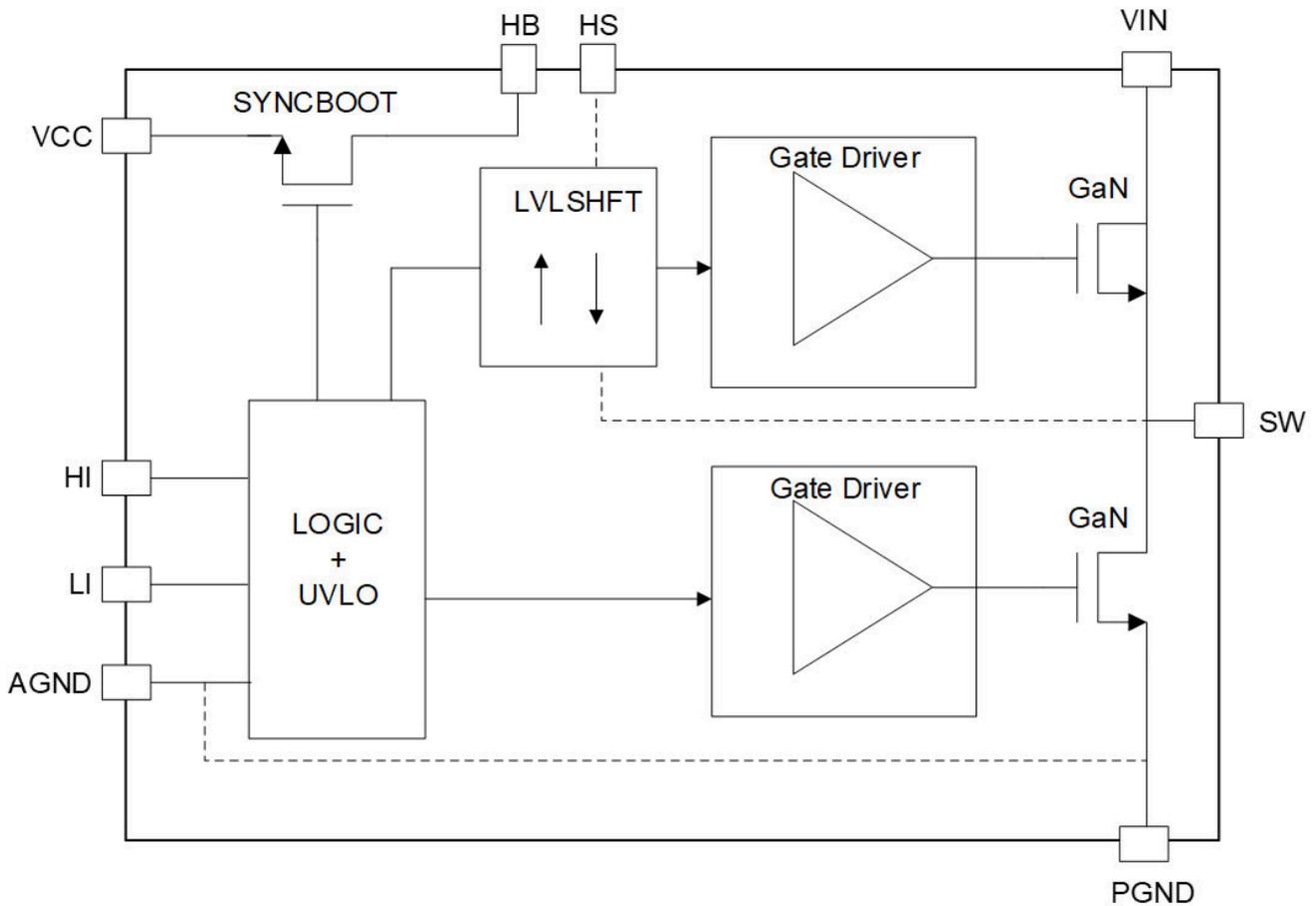


図 4. LMG2100 のブロック図

LMG2100R026 を例にします。このデバイスは、ハーフブリッジの FET とハーフブリッジドライバを内蔵しており、55A の連続電流に耐えることができます。ドライバを FET に統合するには、以下のような多くの利点があります：

- ゲートのリングング低減を通じて、動作の信頼性をさらに向上
- 最適化されたパッケージ フットプリントを通じて電源ループのインダクタンスを低減
- ゲートドライバを統合することで、サイズの低減を実現
- 内蔵された保護機能でデバイスを保護

デザイン内の GaN と MOSFET を比較するには、類似の電力レベルを実現する TIDA-010936 と TIDA-01629 の各デザインを確認します。図 5 に示すように、統合されたゲートドライバと GaN の  $R_{sp}$  が低いことにより、電源デバイス全体のチップ面積が 50 % 以上低減されています。

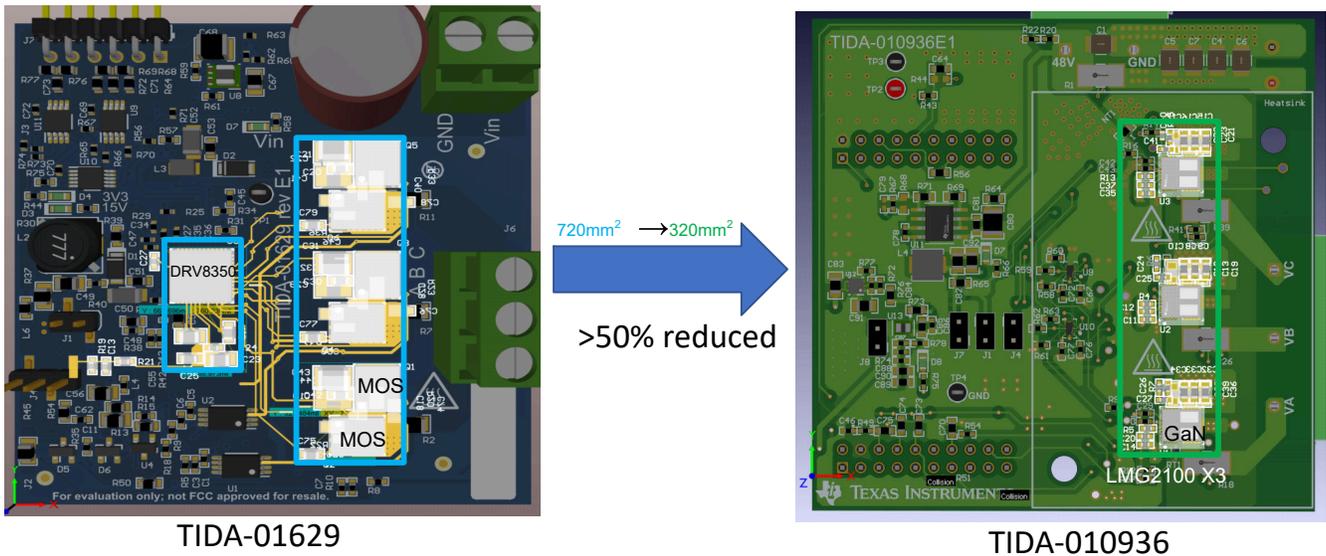


図 5. GaN と MOSFET の電力段の比較

### まとめ

ヒューマノイド ロボットの制御精度と電力密度に対する要件がますます高まっています。GaN は、高い PWM 周波数で低損失を達成すると同時に、より精度の高いモーター制御を簡単に実現することができます。GaN の高電力密度という特性と、テキサス インストルメンツの内蔵ドライバの特性を組み合わせることで、サイズをさらに小さくすることができます。これらの利点により、GaN ベースのモータードライブは、より効率的、安定的、インテリジェントなロボット設計を実現するヒューマノイド ロボットにとって望ましいデザインになる可能性が高くなります。

ヒューマノイド ロボットに加えて、GaN 技術は他のロボット (協働ロボット、外科用ロボット、AGV)、産業用サーボ、家電製品、および高い電力密度を必要とする他のアプリケーションにも対応できます。

### 参考資料

1. [TIDA-010936](#)
2. [LMG2100R026](#)
3. [LMG2100R044](#)
4. [TIDA-01629](#)
5. [GaN にはボディダイオードが存在していますか? - GaN の第 3 象限動作について](#)

### 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