

Application Brief

ヒューマノイドロボットのモーター制御



概要

自動化ソリューションへの需要が高まり続ける産業環境において、ヒューマノイドロボットは環境を変革する可能性を秘めています。従来の固定型自動化システムとは異なり、ヒューマノイドロボットは、人間中心のワークスペースの移動、人間の手向けに設計された工具の操作、そして動的な環境で人間の作業員と安全に協調して作業できるという独自の利点を備えています。

しかし、この可能性を実現するには、ヒューマノイドロボットの関節における自由度 (DOF) を追加するという、技術的な複雑さに対処する必要があります。現代のヒューマノイドロボットには、人間のような器用さと可動性を実現するために最大 70 の DOF が組み込まれており、これは産業用ロボットアームで一般的に見られる 6 ~ 12 の DOF から大幅に増加したものです。図 1 は、ヒューマノイドロボットにおける DOF の一般的な配置を示しています。

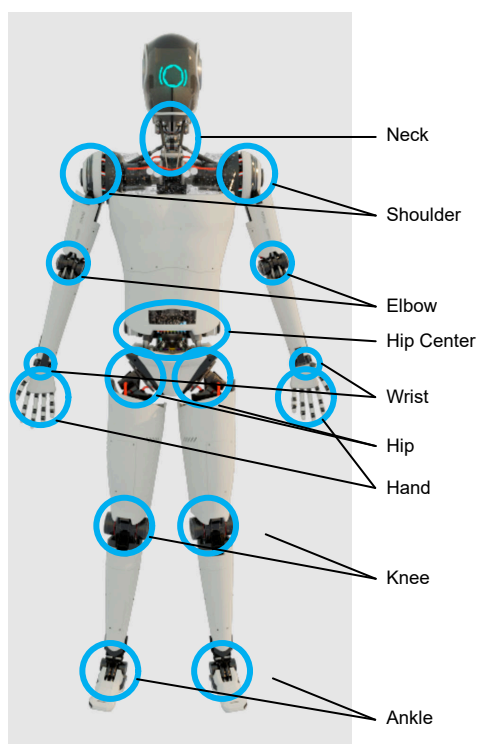


図 1. ヒューマノイドロボットにおける一般的な DOF の配置

追加の DOF をサポートするには、精密なアクチュエーション、センシング、および制御機能が必要となり、これがシステム設計の複雑さを増大させる原因となります。システム内の DOF が増えると、より多くの電気モータードライブが必要となり、そのモータードライブの配置場所によって、それをサポートするための様々な要件が定義されます。表 1 は、これらの主要な要件の一部の概要を示しています。

表 1. ヒューマノイド用モータードライブ設計の主要仕様

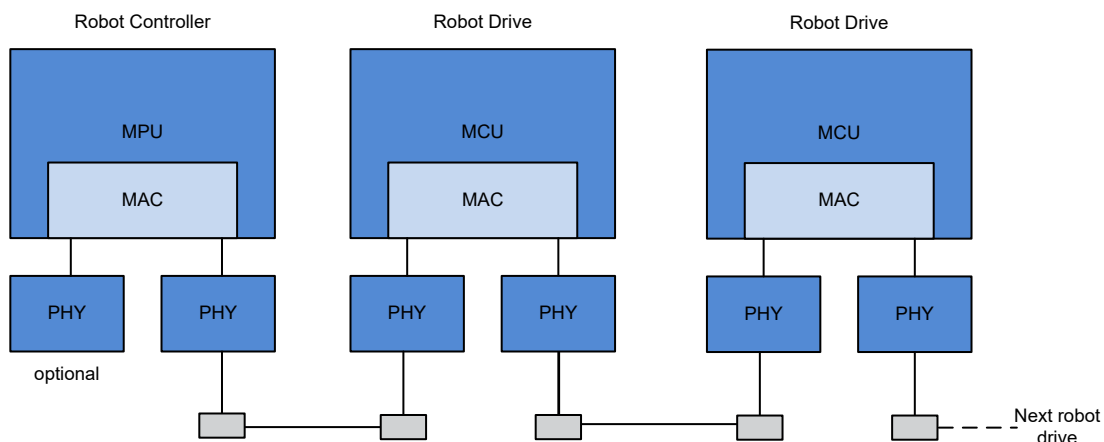
仕様	重要性
通信インターフェイスのアーキテクチャ	システムレベルの協調、レイテンシ、および最大 70 個のアクチュエータの拡張性を決定します。帯域幅の不足や非確定的なタイミングは、動作の不安定さや協調の失敗を引き起こします。
位置センシング	閉ループ制御のためのフィードバックを提供します。その精度は動作の正確性と安定性に直接影響します。分解能が不足すると、限界周期発振や軌道追従性の悪化を招きます。
モーター タイプ	効率、トルク密度、制御の複雑さ、および熱特性を定義します。モーターの選定は、システムの性能、バッテリー寿命、およびフォーム ファクタに影響を与える可能性があります。
モーター制御アルゴリズム	トルクリプル、効率、音響ノイズ、および動的応答を決定します。高度なアルゴリズムにより、同一のハードウェアからより高いパフォーマンスを引き出すことができます。
電力段要件	効率、放熱性能、電力密度を定義します。非効率な電力段の設計は、過度の発熱、バッテリー寿命の短縮、およびアクチュエータの大型化を招きます。
電子回路のサイズ	電子回路が人間の関節エンベロープ内に収まるかどうかを決定します。回路サイズが大きすぎると、人間サイズのフォーム ファクタを実現できなくなります。
機能安全に関する検討事項	安全な人間とロボットの相互作用、および規制準拠を保証します。不適切な安全設計では、協調環境への導入・展開が不可能になります。

この複雑さに加えて、二足歩行や器用な操作の間に動的安定性を維持する必要があり、これには制御ループ応答時間をミリ秒未満の範囲に抑える必要があります。具体的には、位置更新は 1 ~ 4kHz で行われ、電流レギュレーションは 10kHz を超える必要があります。

これらの課題に対応するため、エンジニアはサイズ、重量、消費電力、コストの制約を管理しながら、機械、電気、熱、制御の各領域にわたってアクチュエータの性能を同時に最適化する必要があります。また、確定的なリアルタイム通信プロトコルをサポートしつつ、一元的な動作計画と分散型の関節制御の間で計算負荷のバランスをとるために、組み込みプロセッサの選定もきわめて重要です。

通信インターフェイ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。最適化を達成するための多くの選択肢があります。最も一般的に使用される方法は、[図 2](#) と [図 3](#) に示すような、デジーチェーン通信システムおよびリニア バストポロジです。


図 2. デジーチェーン通信

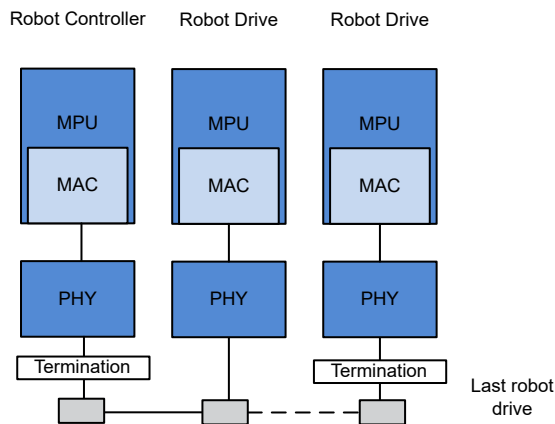


図 3. リニア バストポロジ

エンジニアは、ドライブの適切な応答時間を達成するために、トポロジを選択した後に帯域幅、タイミング、およびレイテンシの要件を考慮する必要があります。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/s** 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に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) トランシーバと組み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アクチュエータは、動きを制御するための経路計画を定義するために、モーター位置データを受信する必要があります。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。設計者は、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を使用できます。

最も一般的に使用されているエンコーダの例:

- 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

モーターやモーターのギアの実装方法によっては、単一のモーターに複数のエンコーダが必要になる場合があります。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のアナログおよび組み込みプロセッサとマイコン [MS1] 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駆動であるため、ロボットの動作時間を延長するために、モータードライブは効率を最大化するように設計されています。

ヒューマノイドロボットは、高出力レベルが必要な場合に PMSM 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。しかし、現在の設計トレンドは、将来的にはほとんどのモーターがブラシレスになる可能性が高いことを示しています。

PMSM を使用して設計する場合、台形巻きまたは正弦波巻きの 2 つの選択肢があります。巻線と制御アルゴリズムの選択は、モーターがどれだけ精密に制御されるかに影響します。

FET のスイッチングを高速化する選択肢も、モーター設計のもう 1 つの重要なトピックです。このアプローチにより、モーターの重量あたりのトルクを向上できる新しい設計の選択肢が得られます。

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する必要があります。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。

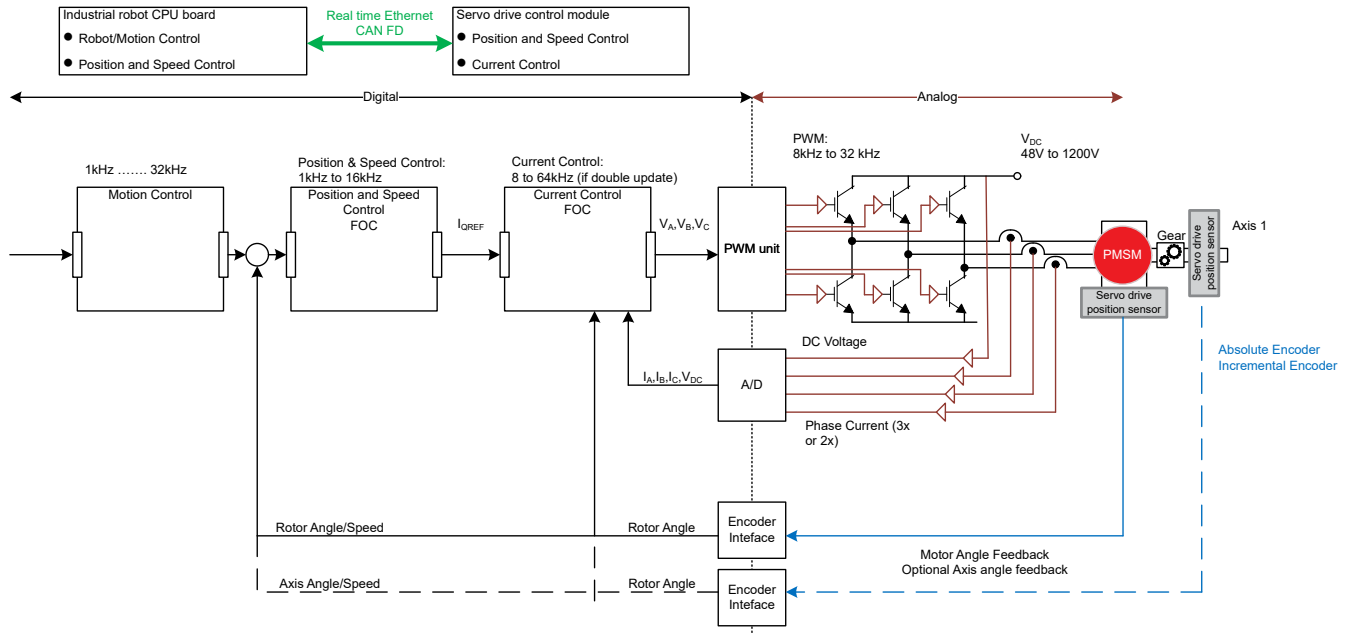


図 4. ロボット制御用途のリアルタイム通信のタイミング需要

図 4 は、表 2 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 2. 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	低	低	中
効率	低	中	高

TI は、ヒューマノイド ロボットのアルゴリズムと角度センサの要件に適合する多様なマイコンを提供しています。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。

- TMS320F28P650DK** : TMS320F28P65x シリーズのマイコンは、すべて 200MHz で動作する最大 3 つの CPU (2 × 32 ビット C28x DSP CPU および 1 CLA CPU) を搭載し、リアルタイム制御性能において 1000MHz の Arm Cortex-M7 に匹敵する処理能力を提供します。このデバイスには、計算効率を高めるための浮動小数点演算ユニットや、三角関数数学ユニット (TMU)、高速除算 (FINTDIV)、CRC エンジンなどのアクセラレータが含まれています。F28P65x シリーズは、統合型 EtherCAT コントローラを備えた、新しい超小型 9 x 9mm² BGA パッケージを提供します。IEC 61508 SIL 2 の機能安全認証を取得しており、系統的機能は最大 SIL 3 まで対応しています。
- AM2612** : AM2612 マイコンは、500MHz で動作する最大 2 つの Arm Cortex-R5F コアと産業用通信サブシステムを特徴とし、高性能なリアルタイム処理と低レイテンシ制御を提供します。EtherCAT および Gbps Time Sensitive Networking (TSN) イーサネットをサポートし、2μs 未満の超低イーサネット カットスルー レイテンシを可能にします。AM261x ファミリー マイコンは、10 x 10mm² BGA というコンパクトなフットプリントを提供し、IEC 61508 SIL 3 の機能安全認証を取得しています。
- AM13E23019** : AM13E23x ファミリー マイコン (AM13E23019 など) は、高性能な Arm Cortex-M33 コア、TinyEngine NPU、および高度なリアルタイム制御アーキテクチャを 1 つのチップに統合した、業界初の製品です。これらのマイコンは、最大 4 つのモーターに対して正確なリアルタイム制御ループを維持できると同時に、TinyEngine NPU が負荷センシングとエネルギー最適化のための適応型制御アルゴリズムを実行します。座標回転デジタル計算

(CORDIC) 方式と比べて 10 倍高速に演算可能な統合型三角関数アクセラレータを搭載し、より高精度かつ高応答なモーター制御性能を実現します。AM13E23x マイコンは IEC 61508 SIL 2 準拠をターゲットとしています。

電力段要件

ヒューマノイド ロボットの出力レベルは 4kW から 10W まで変化する可能性があり、ロボットのドライブ配置に応じて、ほとんどのドライブが 10W から 1.5kW の間にあります。

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は、プリント基板 (PCB) の実装に使用できる物理的サイズ、温度管理、電流センシングなどの他の設計上の検討事項があります。

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制約のバランスをとるには、電力段設計を最適化して電力密度を最大化する必要があり、これが電力段アーキテクチャに直接影響を与えます。スイッチング周波数を高くすると受動部品を小型化でき、電力密度が向上しますが、特に MOSFET において熱的な課題が生じます。GaN FET は、MOSFET テクノロジと比較してスイッチング損失がきわめて小さいため、温度に敏感なシステムで利点があり、結果として高い理論効率をもたらします。しかし、スイッチング周波数を高くするには、高周波数でも精密な制御を維持するために、マイコンによる高解像度 PWM シグナリングのサポートが必要になります。

表 3 に、ヒューマノイド ロボット アプリケーションにおける MOSFET と GaN FET テクノロジの主な特性を示します。

表 3. モータードライブにおける MOSFET と GaN FET の比較

特性	MOSFET	GaN FET
スイッチング速度	中	高
スイッチング損失	より高く	より低く
電力効率	良	非常に良好
電力密度	中	高
代表的なアプリケーション	汎用ドライブ	高周波、スペース制約が厳しいアプリケーション

ヒューマノイド ロボットはバッテリー駆動であり、通常は 48V の公称電圧を使用し、バッテリーの充電状態に応じて動作範囲は約 39V ~ 54V です。最小動作電圧の 39V において、4kW のドライブは最大電力を供給するために約 102A_{rms} を必要とします。低トルク動作時の 0A 近くからピーク電力時の 100A 以上までに及ぶこの広い電流範囲では、全動作スペックにわたって正確な電流検出が要求されます。FET のデッド タイムを短縮することで、低電流時の測定直線性が向上し、動作範囲全体でより正確な検出が可能になります。

TI は、ヒューマノイド ロボットの関節における多様な電力およびスペースの要件に対応するために、ゲートドライバ、ディスプレイ GaN FET、および統合電力段型ソリューションを提供しています。統合型ソリューションは、FET、ゲートドライバ、電流検出、および保護機能を組み合わせることにより、EMI を最小限に抑えながら設計の複雑さと PCB フットプリントを削減します。これらのソリューションを使用して、エンジニアは特定の関節位置や電力レベルに応じて MOSFET および GaN FET テクノロジを迅速に評価できます。

主要な TI デバイスには以下が含まれます。

- **DRV7167A**: BLDC モーター ドライバ アプリケーション向けの、コンパクトな 7.00mm × 4.50mm パッケージに収められた、100V 統合型 GaN ハーフ ブリッジ。
- **DRV8378**: 70V 対応、電流検出機能内蔵の統合型 3 相電力段。FOC、正弦波、または台形波制御をサポート。

電流検出

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、相内電流検出は、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 4. 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

	電流センス アンプ	デルタ シグマ変調器	ホール センサ
性能	高 / 中	高	中
サイズ	中	中	小型

電流は通常、すべてのテクノロジーで最大 200A まで対応可能ですが、コンポーネントの放熱性能によって制限されます。

- [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](#)
- [ダートドライバ](#)

詳細については、以下の技術コンテンツを参照してください。

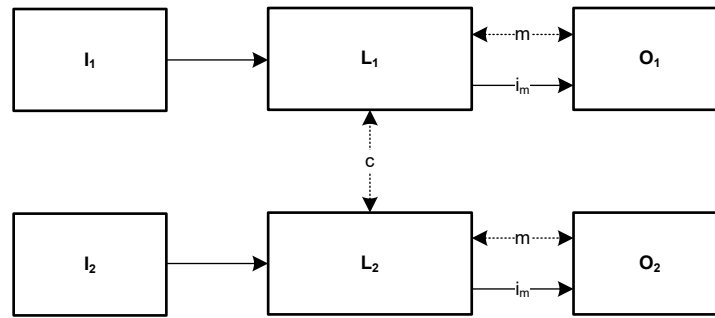
[「48V ロボット / サーボドライブ向け、高分解能、小型フォーム ファクタの位相電流検出」](#)

[「3 相モータードライブにおけるシャント ベース電流検出用アンプの選択」](#)

機能安全

標準化団体は、ロボットの移動性に対処することを目的とした ISO 25785-1 のように、ヒューマノイドに関する安全要件の規定を継続すると予想されます。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。

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。

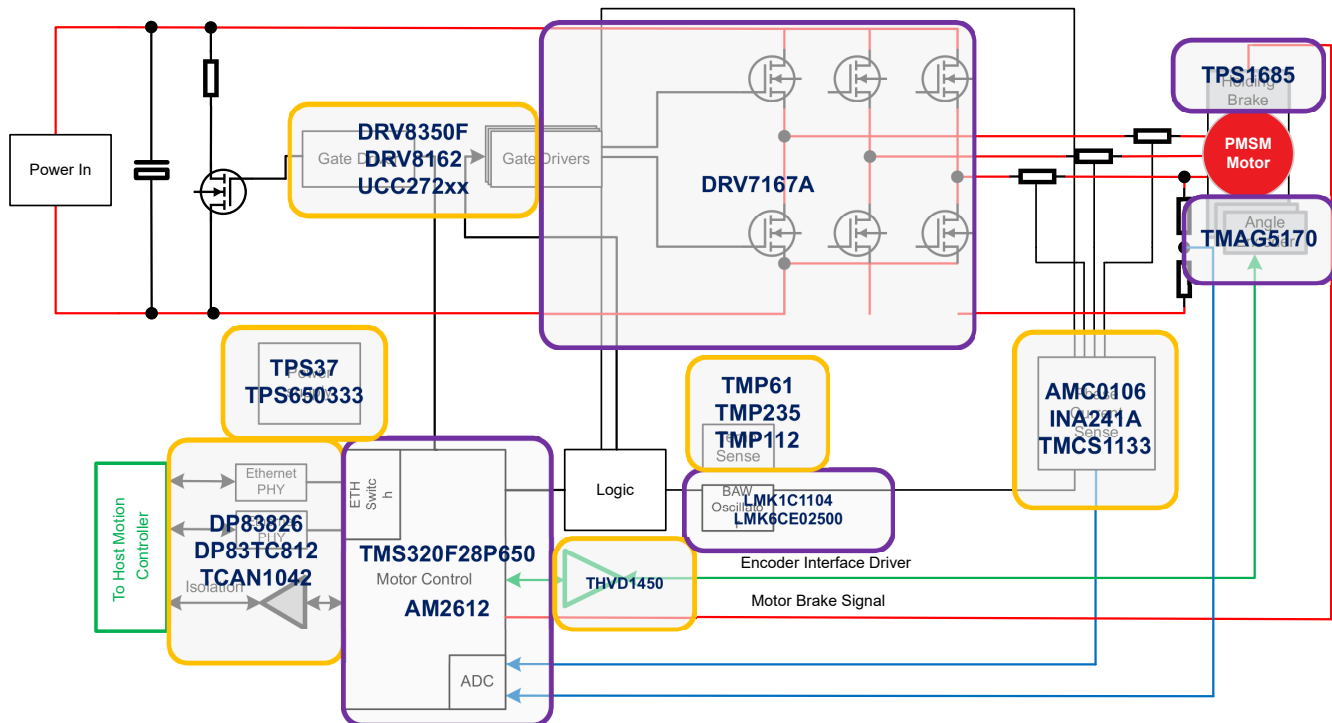


図 6. システムを実装する可能性がある部品を示すモータードライブ ソリューション

以下の TI の設計および評価基板を参照して、これらのデバイスの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](#)
- [TIDA-010979](#)
- [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。TI 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。設計者は 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できます。

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

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](#)、[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 © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月