

Application Brief

휴머노이드 로봇의 모터 컨트롤



Kristen Mogensen

머리말

제조 및 서비스 산업에서 더 많은 부분의 자동화를 이루기 위한 수요가 높아짐에 따라 휴머노이드 로봇의 개발이 촉진되고 있습니다. 휴머노이드는 인간의 움직임을 더 잘 모방하기 위해 더 높은 수준의 DOF(자유도) 및 주변 환경에의 빠른 응답 시간(밀리초)을 지니면서 더 복잡해지고 정밀해졌습니다. **그림 1**은 휴머노이드 로봇의 일반적인 모터 및 모션 기능을 보여줍니다.

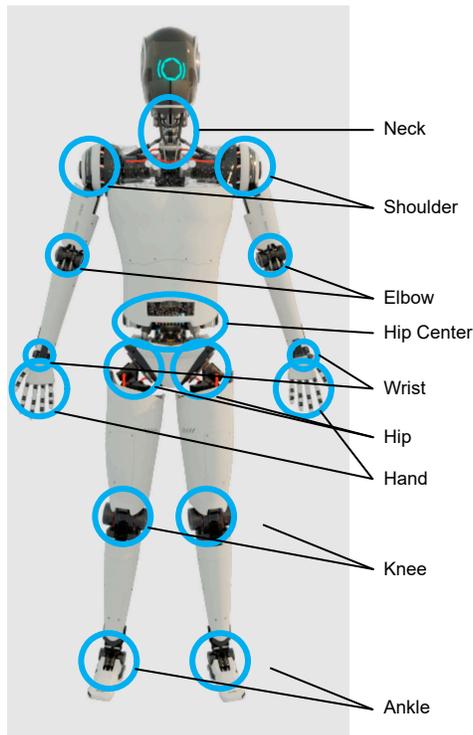


그림 1. 휴머노이드 로봇의 DOF에 위치 추가 표시

DOF가 높을수록 휴머노이드 로봇에서 필요한 전기 모터 드라이브가 더 많아짐을 의미합니다. 로봇 설계에서 드라이브의 위치에 따라 드라이브의 서로 다른 요구 사항이 정의됩니다. 다음은 주요 사양의 일부입니다.

- 통신 인터페이스 아키텍처
- 위치 감지
- 모터 유형
- 모터 컨트롤 알고리즘
- 전력계 요구 사항
- 전자 회로 크기
- 기능 안전 고려 사항

현재 코봇 및 산업용 로봇을 위한 표준은 있지만, 휴머노이드 로봇의 기능 안전 요구 사항을 정의하는 표준은 없습니다. 수요가 지속적으로 증가함에 따라 향후 표준 기구에서 휴머노이드 로봇 관련 안전 요구 사항을 지정할 것이라는 기대가 있습니다. 안전 요구 사항이 정의될 때까지 휴머노이드 설계자는 향후의 재설계 작업을 최소화하기 위해 현재 시스템 설계의 실사를 수행해야 합니다. ISO13482, ISO10218 및 ISO 3691-4는 미래 기대를 분명하게 보여줍니다.

통신 인터페이스 아키텍처

로봇의 드라이브 위치로 인해 케이블 연결을 최소화하면서 모든 드라이브와의 통신을 최적화하는 것이 중요합니다. 최적화를 달성하는 옵션은 여러 가지가 있습니다. 가장 일반적으로 사용되는 방법은 **그림 2** 및 **그림 3**에 표시된 데이터 체인 통신과 선형 버스 토폴로지입니다.

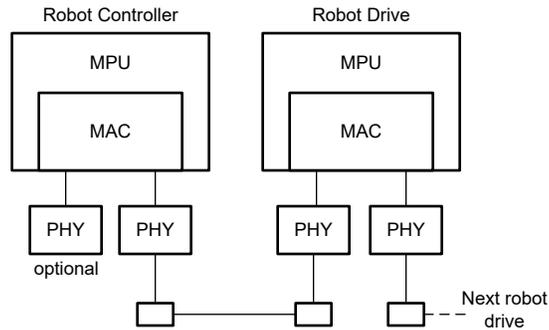


그림 2. 데이터 체인 통신

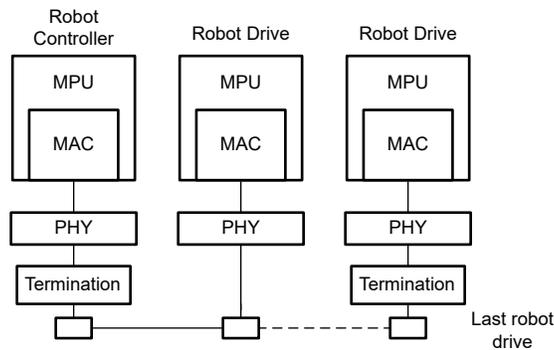


그림 3. 선형 버스 토폴로지

토폴로지를 선택한 후 드라이브의 적절한 응답 시간을 달성하려면 대역폭, 타이밍 및 지연 요구 사항을 고려해야 합니다. 응답 시간은 정의된 데이터 프레임 크기를 바탕으로 필요한 실시간 가능 통신 프로토콜이 무엇인지 결정할 수 있습니다. 통신 인터페이스의 대역폭 요구 사항은 노드 간에 필요한 통신 프레임 크기를 최소화하기 위해 분산형 모터 드라이브, 중앙 집중식 및 외부 로봇 모션 컨트롤러 간의 모터 컨트롤 알고리즘을 분할하는 방법에도 영향을 받습니다.

일반적으로 통신 시스템의 최소 대역폭 요구 사항은 약 8Mbit입니다. 그러나 진화하는 설계 추세로 인해 시스템 진단 및 안전 기능 관련 요구 사항이 높아지는 경향이 나타나고 있습니다.

일반적으로 휴머노이드 시스템에 사용되는 통신 인터페이스는 시스템 요구 사항에 따라 CAN-FD 또는 이더넷 기반 (EtherCAT 포함)입니다. TI는 이러한 통신 프로토콜을 지원하기 위해 설계된 PHY(물리적 계층) 트랜시버 및 임베디드 프로세서 모두 제공합니다.

CAN 트랜시버 및 **이더넷 IC**는 휴머노이드 시스템 개발에 사용되는 장치입니다.

위치 감지

휴머노이드 로봇의 모션을 위해서는 경로 계획을 정의하기 위한 모터 위치 데이터를 수신해야 합니다. 위치 데이터를 통해 휴머노이드 로봇의 움직임을 제어할 수 있습니다. 높은 정밀도로 움직임을 제어할 수 있으려면 모터의 정보를 캡처하기 위한 로터 위치 센서와 모터 드라이브를 통해 중앙 집중식 처리 컴퓨터로 정보를 효율적으로 전달하는 기능이 로봇에 있어야 합니다. 모터에 필요한 정밀도에 따라 다양한 로터 위치 센서가 사용됩니다. 다음은 가장 일반적으로 사용되는 인코더의 일부입니다.

- 광학 인코더
- 자기 인코더
- 증분 인코더
- SIN/COS 리졸버

이러한 인코더에는 드라이브에 연결할 수 있는 다양한 인터페이스가 있으며, 위치 제어를 수행하는 데 필요한 로터 각도 데이터를 제공합니다. 해당 인터페이스에는 특정 하드웨어가 필요하므로 모터 컨트롤 프로세서가 다음 인코더 구성 중 하나 이상을 지원해야 합니다.

- BiSS, Endat, Hiperface 또는 기타 디지털 절대 인코더와 같은 특수 직렬 인터페이스
- 리졸버 인터페이스를 위한 샘플 앤 홀드가 있는 ADC 컨버터
- 증분 인코더를 위한 직교 인코더 펄스
- 자기 인코더 인터페이스를 위한 직렬 인터페이스

모터 및 모터의 기어가 구현되는 방식에 따라 하나의 모터에 여러 인코더가 필요할 수 있습니다. TI는 인코더 인터페이스 시스템을 지원하기 위해 아날로그 및 프로세서 IC를 모두 제공합니다. [RS-485 및 RS-422 트랜시버](#) 및 [멀티 축 선형 및 각도 위치 센서](#)가 위치 감지 방법에 사용됩니다.

모터 유형

휴머노이드 로봇은 배터리로 구동되기 때문에 모터 드라이브는 효율성을 최대화하여 로봇의 작동 시간을 늘리도록 설계되었습니다.

높은 전력 레벨이 사용되는 경우 휴머노이드 로봇에는 PMSM 모터와 같은 모터를 통합할 수 있습니다. 브러시드 DC 모터는 손 및 손가락 제어와 같이 전력을 적게 필요로 하는 케이스에서 사용할 수 있습니다. 그러나 현재 설계 추세로는 향후 모든 모터가 브러시리스가 될 것으로 보입니다.

PMSM 모터에는 사다리꼴 또는 시누소이드 권선 방법을 사용할 수 있습니다. 선택된 권선 방법 및 제어 알고리즘은 모터가 얼마나 정밀하게 제어되는지에 영향을 미칩니다.

모터 설계에 있어서 또 다른 주요 주제는 FET를 더 빠르게 전환하는 옵션으로, 이를 통해 모터의 무게당 토크를 개선하는 새로운 설계 옵션이 나타납니다.

모터 컨트롤 알고리즘

모터 유형을 선택한 후 사용자는 모터를 제어하는 방법을 결정합니다. 모터 컨트롤은 일반적으로 [그림 4](#)에 표시된 것과 유사하지만, 제어 루프를 구현하는 여러 옵션이 있습니다. 이 그림은 필요한 아날로그 하위 시스템 및 프로세서 주변 기기를 보여줍니다.

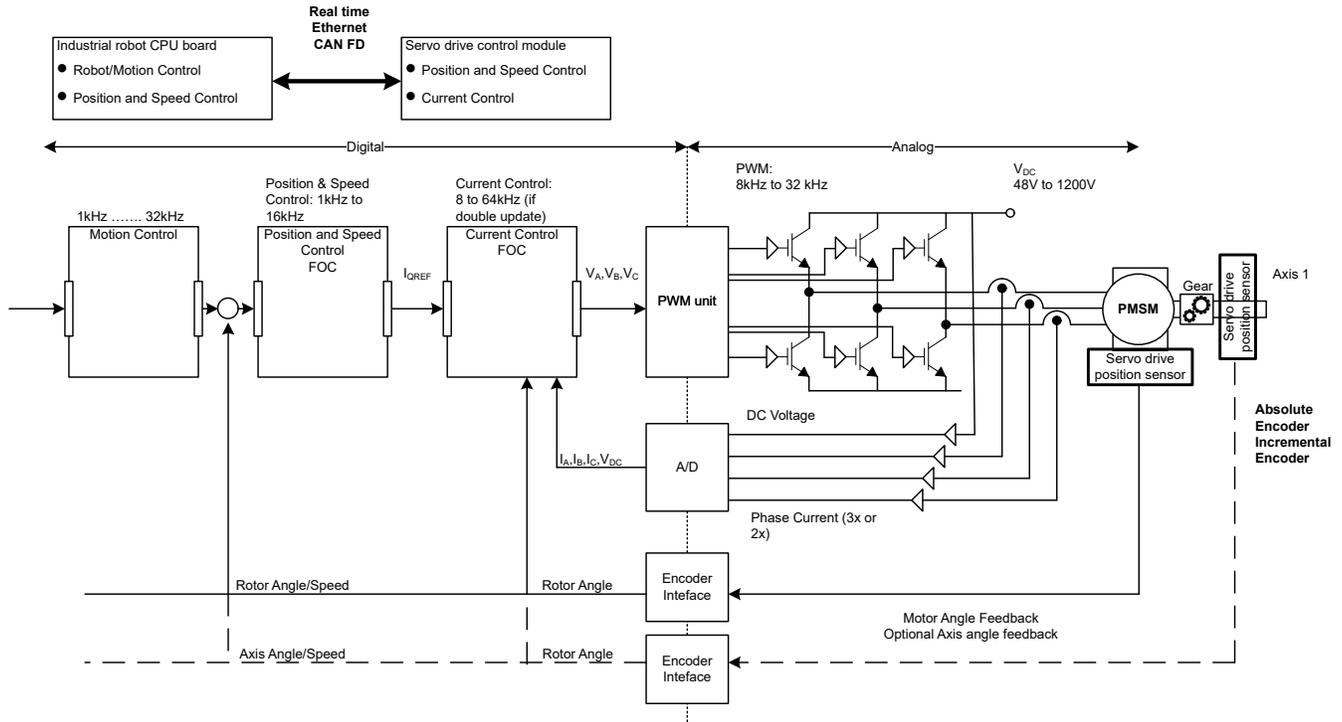


그림 4. 로봇 제어를 위한 실시간 통신 타이밍 요구 사항

그림 4를 일반 템플릿으로 사용하여 표 1에는 알고리즘 FOC 또는 블록 정류 장치를 선택할 때 필요한 주변 기기 및 성능이 열거되어 있습니다.

표 1. 모터 컨트롤 유형 관련 주변 기기 및 회로 요구 사항

모터 유형	브러시드 모터	사다리꼴 PMSM	시누소이드 PMSM
하프 브리지	×2	×3	×3
전류 감지	×1	×1	×2~×3
전압 감지 DC 링크	×1	×1	×1
각도 센서 정확도	≤ 1°	60°	≤ 1°
처리 성능	낮음	낮음	중간
효율성	낮음	중간	높음

TI는 알고리즘 및 각도 센서 요구 사항에 부합하는 여러 다양한 MCU를 보유하고 있으며, 중요한 요소는 IC의 크기 및 고성능 드라이브 시스템을 지원하는 실시간 기능입니다. **C2000 실시간 마이크로컨트롤러** 및 **ARM 기반 마이크로컨트롤러**가 모터 컨트롤 알고리즘에 사용됩니다.

전력계 요구 사항

로봇의 드라이브 위치에 따라 전력 레벨은 10W~4kW 사이이며, 대부분의 드라이브는 10W~1.5kW 사이입니다.

드라이브는 일반적으로 SELV 전압 범위 내에서 작동하며, 해당 값은 60V 미만입니다. 따라서 부품이 최대 60V까지 작동해야 합니다. 증폭기, FET 및 게이트 드라이브의 시스템에서 잠재적인 잡음의 영향을 줄이려면 최대 100V까지 작동하는 부품을 사용하는 것이 좋습니다. 드라이브의 전기 사양을 정의한 후 고려해야 하는 다른 설계 관련 사항이 있습니다.

PCB(인쇄 회로 보드)를 구현할 수 있는 물리적 크기가 바로 그것입니다. 소형 IC 및 고도로 최적화된 전력 밀도 설계는 작은 공간을 위한 설계 목표를 달성하는 데 중요합니다. 전력 밀도가 높으면 로봇에 잠재적 온도 제한이 야기되어 로봇의 외부가 55°C보다 높을 수 없게 됩니다. 55°C가 되면 30초 후에 3도 화상 수준의 피해가 발생합니다. 온도 관리 방법에는 팬 또는 액체와 같은 추가 냉각이 포함되면 안 됩니다.

온도 관리 및 공간이 균형을 이루면 크기당 와트 대비 전력계에서 균형을 유지하며, 이는 전력계 아키텍처에 영향을 미칩니다. 발생할 수 있는 한 가지 문제는 전력계가 더 높은 주파수에서 작동해야 하는 경우입니다. 이 문제는 일반적으로 MOSFET에

서 일어납니다. 하지만 GaN FET와 같은 새로운 기술은 MOSFET 기반 시스템에 비해 스위칭 성능도 개선합니다. 온도에 민감한 시스템의 경우 GaN FET는 MOSFET 기술에 비해 스위칭 손실이 최소화되기 때문에 이론적으로 효율이 더 높습니다. 주파수가 높아지면 충분히 높은 해상도에서 더 높은 주파수 스위칭을 얻는 데 필요한 신호를 지원하기 위해 MCU의 추가 기능이 필요하게 됩니다.

TI MOSFET 게이트 드라이버를 사용하는 고객은 가능한 최고의 속도로 MOSFET를 전환할 수 있고, TI 저전압 GaN FET를 사용하는 고객은 로봇의 위치별 최고의 FET 유형을 빠르게 비교하고 고려할 수 있습니다.

드라이브를 구현하기 위해서는 고성능 MOSFET 또는 GaN FET가 필요하므로 모터 효율성이 높아집니다. 정교한 알고리즘이 모터 FET의 손실 및 스위칭 요구 사항을 줄이는 데 도움을 줍니다.

휴머노이드 로봇은 일반적으로 48V 또는 약 39V~54V 사이에서 배터리로 작동하며, 배터리 충전은 보류됩니다. 사용되는 전압은 배터리 충전이 최소 사용으로 설정된 수준에 따라 다릅니다. 드라이브에 필요한 최대 전력이 39V에서 4kW였다고 말하기 전에 로봇 드라이브가 필요한 전력을 제공하기 위해서는 약 102Arms 전류로 최대 작동해야 한다는 것을 알 수 있습니다. 또한, 0A 주변의 정밀한 측정을 고려해 보면, FET의 데드 타임을 줄이는 경우 0A 주변의 전류 측정 선형성에 이점이 생겨 낮은 전류에서 더 정밀하게 측정할 수 있습니다.

전류 센싱 역시 원하는 성능 수준을 얻기 위해 전력계 요구 사항을 평가하고 적절한 전류 센싱 부품을 선택할 때 고려해야 하는 중요한 설계 관련 사항입니다.

TI는 위상 내 전류 센스 및 저압측 전류 센스 아날로그 옵션을 모두 제공하며, 시스템을 효율적으로 구현하는 방법에 관한 설계 지침도 제공합니다. 일반적으로 위상 내 전류 센싱은 항상 전류를 측정하기 위해 사용되며 측정 정밀도를 높입니다. 전류를 측정하는 옵션은 다음과 같이 세 가지 있습니다.

표 2. 위상 내 전류 측정을 위한 일반적인 위상 내 전류 센싱 옵션

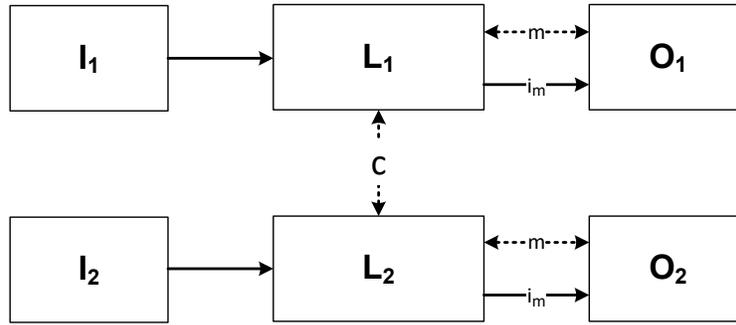
	전류 감지 증폭기	델타-시그마 모듈레이터	홀 센서
정밀도	중간	높음	낮음
현재 레벨	50A	50A	100A
PCB 난이도	중간	중간	낮음

전류 센스 증폭기 및 델타-시그마 모듈레이터의 경우 향상된 부품으로 인해 이러한 기술의 전류 레벨 사용량이 약 100A로 천천히 이동합니다.

- [전류 센스 증폭기](#)
- [델타-시그마 모듈레이터](#)
- [홀 센서](#)
- [GaN FET 전력계](#)
- [게이트 드라이버](#)

기능 안전

향후 설계를 계획할 때 기능 안전 인증을 간소화하는 장치를 선택하는 것이 중요합니다. ISO13482, ISO10218 및 ISO 3691-4 표준은 미래의 휴머노이드에 기대하는 바를 분명히 보여줍니다. 클래스 C 표준(ISO10218 및 ISO3691-4)은 모두 ISO13849를 참조하며, 시스템이 PLd여야 함을 명시합니다. 하지만 ISO3691-4는 아키텍처를 구현자의 재량에 맡기고 ISO10218은 CAT3 아키텍처를 요구합니다. 이러한 표준에서 최악의 시나리오를 고려할 때 최소한 CAT3 PLd 안전 고려 사항을 휴머노이드 로봇과 관련하여 참작해야 합니다. [그림 5](#)에 표시된 안전 아키텍처는 CAT3 시스템을 구현할 때 준비해야 합니다.



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

그림 5. IEC13849-1:2015 그림 10의 이미지

TI는 고객이 안전 지원 시스템을 구축할 수 있도록 [광범위한 안전 문서](#)와 함께 많은 장치를 제공합니다.

예제 시스템

그림 6의 블록 다이어그램은 1.5kW 시스템 설계를 위해 TI 제품을 사용하여 제안된 솔루션을 보여주며, 다음과 같은 제품을 사용할 수 있습니다.

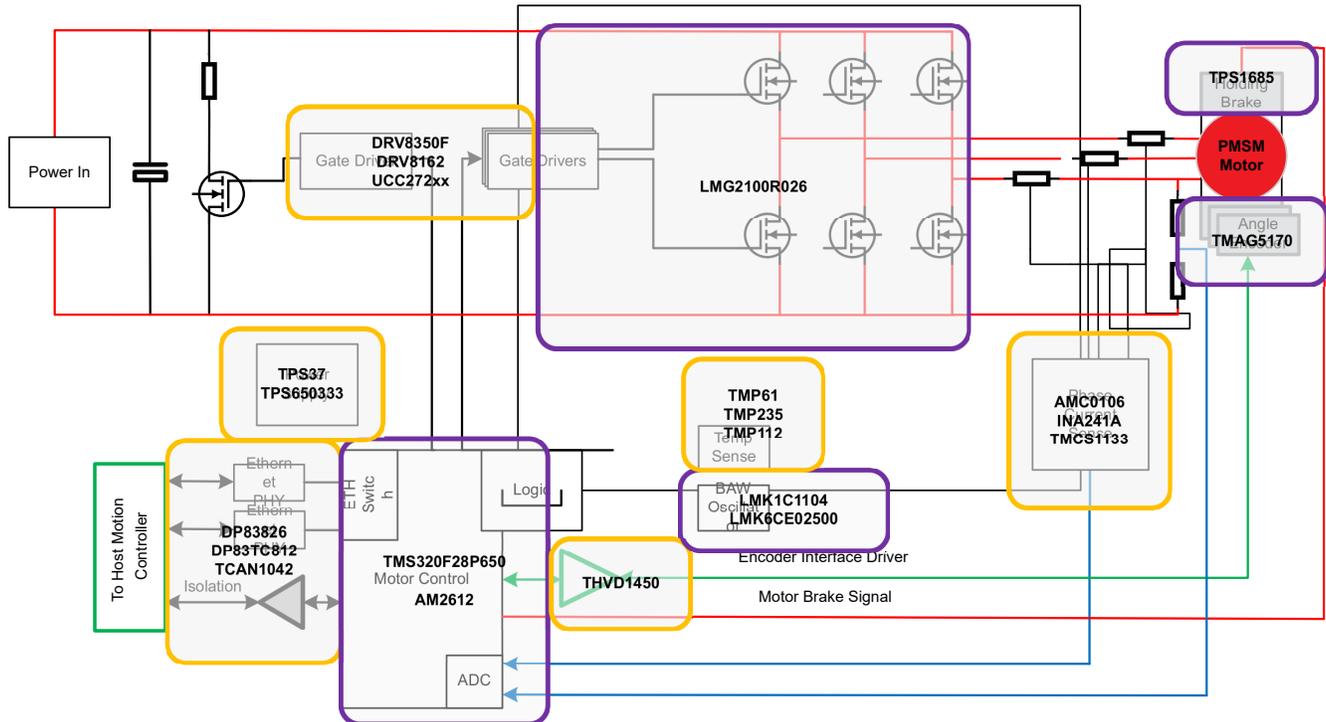


그림 6. 시스템을 구현할 수 있는 잠재적 부품을 보여주는 모터 드라이브 솔루션

추가 부품 정보에 관해서는 다음 TI 설계 및 EVM을 참조하여 시스템 성능 수준 결과를 확인하세요.

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

요약

휴머노이드 로봇 드라이버를 설계하려면 정밀도, 유연성 및 혁신이 필요합니다. 텍사스 인스트루먼트는 엔지니어가 로봇 환경과 원활하게 상호 작용할 수 있는 로봇을 제작하기 위한 다양한 설계 사양을 충족하도록 광범위한 통합 회로 포트폴리오를 제공합니다. 다양한 평가 모듈(EVM), 레퍼런스 디자인 및 안전 인증 장치를 제공하는 TI는 개발 프로세스를 간소화하여 시장 출시 시간을 단축하고 확신을 갖고 기능 안전 인증을 획득하도록 지원합니다. TI와 협력하여 더 스마트하고, 빠르고, 안전한 로봇을 위한 비전을 실현하세요.

상표

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

중요 알림 및 고지 사항

TI는 기술 및 신뢰성 데이터(데이터시트 포함), 디자인 리소스(레퍼런스 디자인 포함), 애플리케이션 또는 기타 디자인 조언, 웹 도구, 안전 정보 및 기타 리소스를 "있는 그대로" 제공하며 상업성, 특정 목적 적합성 또는 제3자 지적 재산권 침해에 대한 묵시적 보증을 포함하여(그러나 이에 국한되지 않음) 모든 명시적 또는 묵시적으로 모든 보증을 부인합니다.

이러한 리소스는 TI 제품을 사용하는 숙련된 개발자에게 적합합니다. (1) 애플리케이션에 대해 적절한 TI 제품을 선택하고, (2) 애플리케이션을 설계, 검증, 테스트하고, (3) 애플리케이션이 해당 표준 및 기타 안전, 보안, 규정 또는 기타 요구 사항을 충족하도록 보장하는 것은 전적으로 귀하의 책임입니다.

이러한 리소스는 예고 없이 변경될 수 있습니다. TI는 리소스에 설명된 TI 제품을 사용하는 애플리케이션의 개발에만 이러한 리소스를 사용할 수 있는 권한을 부여합니다. 이러한 리소스의 기타 복제 및 표시는 금지됩니다. 다른 모든 TI 지적 재산권 또는 타사 지적 재산권에 대한 라이선스가 부여되지 않습니다. TI는 이러한 리소스의 사용으로 인해 발생하는 모든 청구, 손해, 비용, 손실 및 책임에 대해 책임을 지지 않으며 귀하는 TI와 그 대리인을 완전히 면책해야 합니다.

TI의 제품은 [ti.com](https://www.ti.com)에서 확인하거나 이러한 TI 제품과 함께 제공되는 [TI의 판매 약관](#) 또는 기타 해당 약관의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다.

TI는 사용자가 제안했을 수 있는 추가 또는 기타 조건을 반대하거나 거부합니다.

주소: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated