Technical Article

휴머노이드가 실제 세계에서 듣고 말하는 데 도움을 주는 오디오 기술의 발전

Jonathan Huang, Ramsey Foote, and Christian Greeff, Texas Instruments

휴머노이드 로봇이 실험실을 벗어나 공장, 병원, 가정으로 이동하고 있습니다. 이러한 환경은 시끄럽고, 어수선하며, 예측 불가능할 수 있습니다. 로봇이 명령을 안정적으로 알아듣고 자연스럽게 응답할 수 있도록 하는 것은 로봇 설계에서 가장 어려운 엔지니어링 과제 중 하나입니다. 오늘날 마이크 어레이, 빔포밍 및 고효율 증폭의 발전으로 이것이 가능해지면서, 기계적인 느낌을 줄이고 보다 인간적인 느낌을 주는 오디오 상호 작용의 문이 열리고 있습니다.

마이크 기반 오디오 입력은 휴머노이드가 음성 명령을 수신하고 이에 따라 행동할 수 있게 해주며, 터치스크린이나 사전 프로그래밍된 루틴 없이도 인간과의 상호 작용을 더 자연스럽고 직관적으로 만들어 줍니다. 또한 온보드 마이크는 로봇이 경보음, 외침 또는 충돌 경고음와 같은 주변 환경의 오디오 신호를 모니터링할 수 있게 해주어 실시간으로 상황을 인식한 행동을 가능하게 합니다. 그림 1과 같이 시끄러운 실제 환경에서 이를 구현하기 위해서는 음원을 분리하고 원거리 오디오를 명확하게 포착할 수 있도록 특정 방향으로 수신을 집중시키는 신호 처리 기술인 마이크 어레이와 빔포밍이 필요합니다.

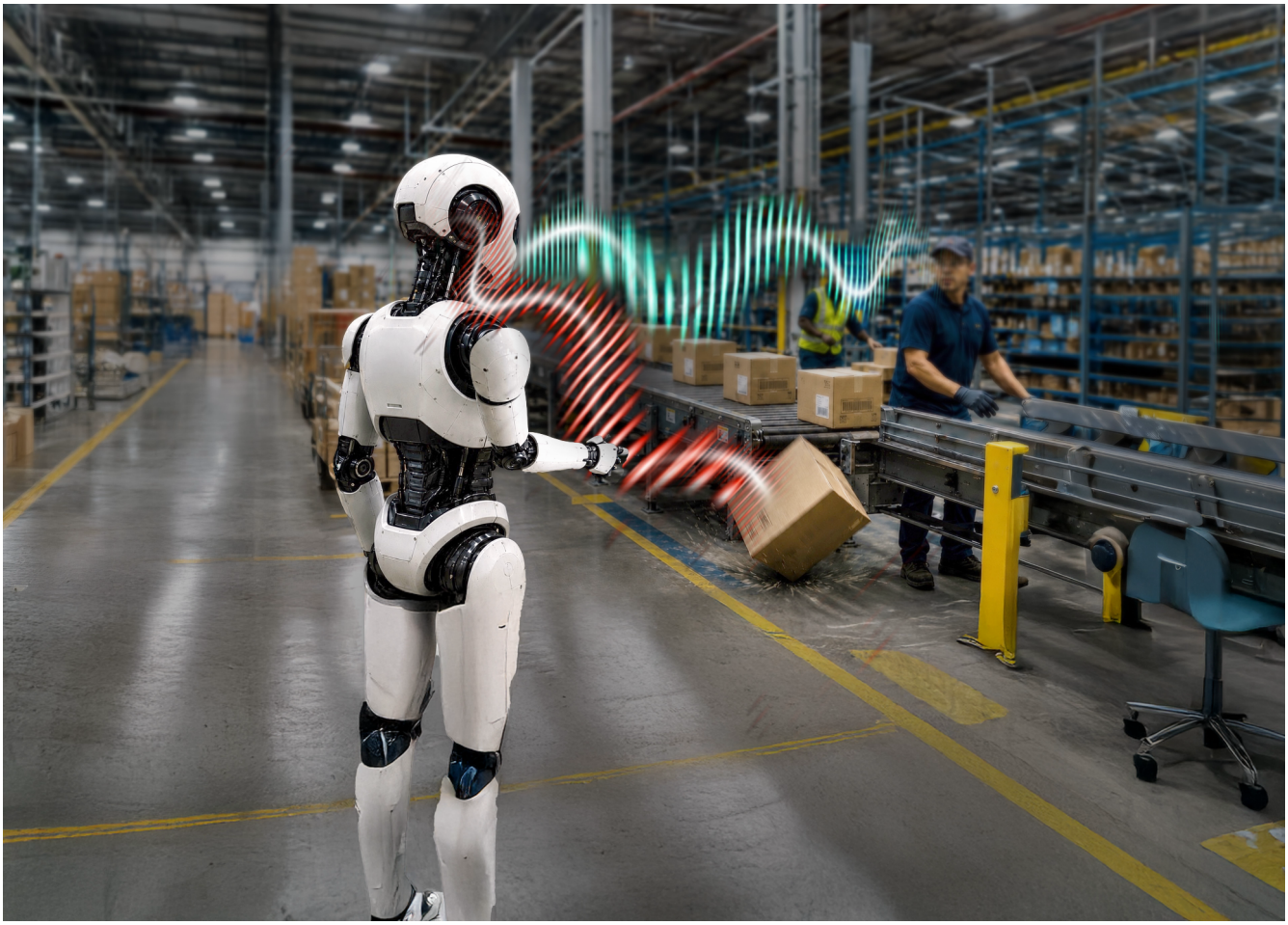

그림 1. 휴머노이드 로봇이 공장 근로자에게 안전하지 않은 상황을 음성으로 경고하는 모습

스피커 출력 역시 안전을 위해 매우 중요합니다. 휴머노이드는 사용자에게 응답하거나, 상태 업데이트를 제공하거나, 비상 경보를 방송하는 등 선명한 고품질의 음성을 내어 근처에 있는 사람들이 상황을 인지하고 적절하게 대응할 수 있도록 해야 합니

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

다. 또한 명확하고 이해하기 쉬운 출력은 양방향 상호 작용이 더욱 자연스럽게 느껴지게 하여 협업 환경에서 인간과의 신뢰를 쌓는 데도 도움이 됩니다. 로봇이 오디오 신호를 저하시키지 않으면서 동시에 듣기와 말하기를 수행하게 하려면 입력 오디오와 출력 오디오가 동시에 활성화될 때도 입력 오디오를 깨끗하게, 출력 오디오는 명료하게 유지해주는 기술인 잡음 억제 및 음향 반향 제거 기술을 시스템에 적용해야 합니다.

이러한 기능을 모두 구현하려면 아날로그 및 디지털 입력을 지원하는 마이크 통합부터 배터리 소모 없이 출력 전력을 극대화하는 고효율 클래스 D 증폭기에 이르기까지 완전한 오디오 신호 체인이 필요합니다.

이러한 기능이 구현되는 방식

녹음 경로 알고리즘

실제 환경에서 효과적으로 소통하는 휴머노이드 로봇은 일반적으로 빔포밍에 의존하며, 이는 로봇 헤드 주변에 위치한 4개 이상의 마이크로 구성된 마이크 어레이를 사용합니다. 빔포밍 알고리즘은 각 마이크의 오디오 데이터를 처리하여 가장 강력한 오디오 신호의 방향을 식별합니다. 방향이 식별되면 알고리즘이 각 마이크의 입력에 정확하게 계산된 시간 지연을 적용하여 수신 패턴을 원하는 음원 방향으로 전자적으로 유도합니다. 설계자는 인간의 음성이나 기타 정의된 소리와 같은 특정 프로필을 대상으로 추가 조정을 적용할 수 있습니다.

빔포밍을 이용하면 마이크 어레이가 특정 방향의 오디오에 집중하면서, 다른 위치에서 나는 불필요한 소리를 걸러낼 수 있습니다. 또한 다중 마이크 접근 방식은 채널 간에 신호를 합산하여 원거리 오디오 포착 성능을 개선함으로써 모든 마이크에 공통적인 오디오는 강화하고 상관 관계가 없는 잡음은 줄입니다. 빔포밍된 오디오 신호에 적용된 잡음 억제 알고리즘은 신호가 호스트 프로세서에 도달하기 전에 전체 오디오 품질을 더욱 개선합니다.

고전력, 고효율

휴머노이드 로봇은 공간과 열 관리 측면에서 제약이 큰 경우가 많습니다. 고전력 모터 및 프로세서가 공기 흐름이 제한적인 좁은 공간에 밀집되어 있어 고온에서도 작동할 수 있는 고효율 증폭기가 필요합니다. 그림 2에 나와 있는 것처럼, 외부 히트 싱크가 필요 없는 집적 회로(IC)는 이러한 협소한 설계에서 확실한 이점을 제공합니다. TI의 TAS6511-Q1은 50W의 출력 전력을 제공하고 최대 125°C의 작동 온도를 지원하는 모노 증폭기로, 이 모든 기능이 패드다운 4mm x 4mm QFN 패키지에 담겨 있습니다. 아날로그 입력 증폭기를 사용하는 설계의 경우, 아날로그 입력 클래스 D 증폭기인 TPA3132D2가 모노 스피커 출력에 50W를 지원하며 I2C 구성이 필요하지 않습니다. 더 작은 인클로저 또는 주변 소음이 적은 환경 등 더 낮은 출력이 필요한 경우에는, TAS6501-Q1이 15W의 출력 전력을 지원합니다.

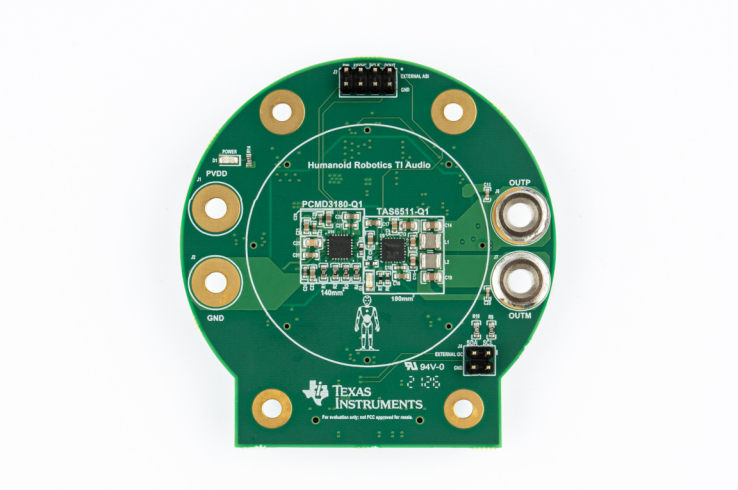

그림 2. TI의 휴머노이드 로봇 오디오 서브시스템 레퍼런스 설계(TIDA-060054)의 PDM-TDM 오디오 컨버터 및 오디오 증폭기

이러한 기능은 현재 어떻게 구현되고 있는가

마이크 어레이 통합 장치

주변 환경에서 오디오를 효과적으로 처리하려면 휴머노이드 로봇이 모든 마이크 데이터를 온보드 호스트 프로세서가 처리할 수 있는 통합된 형식으로 모아야 합니다. TDM(시분할 멀티플렉싱) 오디오 버스가 일반적인 구현 방식으로, 마이크 어레이와 프로세서 사이의 공통 언어 역할을 합니다.

English Document: SSZTDD6
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

이를 구현하려면 마이크가 소리를 포착하는 방식과 호스트 프로세서가 이를 수신하고자 하는 방식 사이의 간극을 해소해야 합니다. 아날로그 마이크는 아날로그 데이터를 기록하고, 디지털 마이크는 PDM(펄스 밀도 변조) 방식으로 기록하는데, 둘 다 호스트 프로세서가 요구하는 TDM 형식이 아닙니다. 마이크와 프로세서 사이에 위치한 오디오 컨버터가 이러한 입력을 통합하고 TDM으로 변환함으로써 그림 3와(과) 같이 시스템 수준에서 원활한 실시간 오디오 처리를 가능하게 합니다.

TI는 두 신호 유형 모두에 대한 솔루션을 제공합니다. TLV320ADC3140은 아날로그 마이크용 고성능 오디오 ADC이며, PCMD3180은 디지털 마이크용 PDM-TDM 오디오 컨버터입니다. 둘 다 모든 마이크 입력이 TDM 형식으로 호스트 프로세서에 도착하도록 합니다.

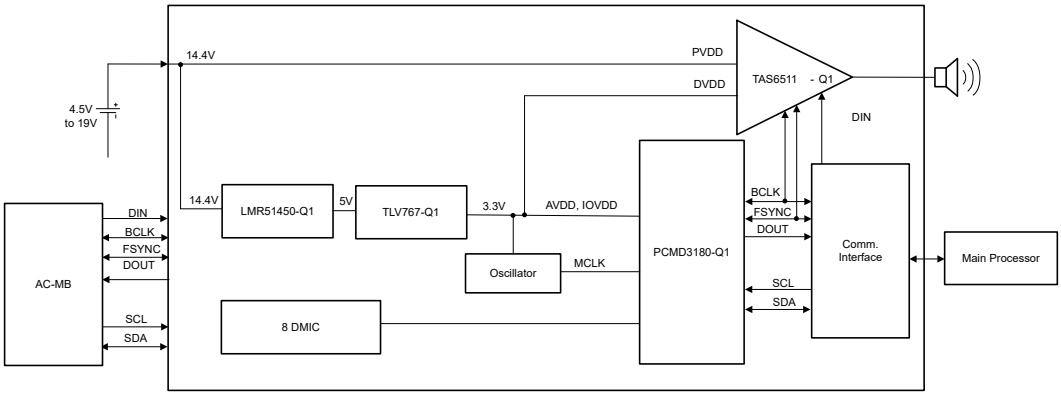

그림 3. 휴머노이드 로봇의 일반적인 오디오 블록 다이어그램

작은 솔루션 크기와 낮은 BOM 비용

일부 휴머노이드 로봇에서는 오디오 시스템이 머리 유닛에 내장되어 있으며, 마이크와 스피커는 가슴 부근의 메인 프로세서로 데이터를 전달하기 전에 매우 협소하게 제약된 공간 내에 들어가야 합니다. 이렇게 공간이 제약된 환경은 선택하는 IC의 크기 및 통합성에 상당한 요구 조건을 부과합니다.

PCMD3180 오디오 컨버터, TAS6511-Q1 클래스 D 증폭기 및 TAC5212 저잡음 오디오 코덱에 사용된 4mm x 4mm QFN(쿼드 플랫 무연) 칩과 같은 낮은 프로파일의 소형 IC 패키지는 보드 공간을 많이 차지하지 않고 나란히 배치될 수 있습니다. 약간 더 큰 5mm x 5mm QFN 장치인 TPA3132D2 클래스 D 증폭기는 외부 I2C 구성 없이 작동합니다.

패드다운(하단 접점) 패키지를 사용하면 부피가 큰 히트 싱크가 필요하지 않으므로 장치가 열을 방출하면서도 머리 유닛의 제한된 공간 내에 들어갈 수 있습니다. TAS6511-Q1은 2.1MHz 스위칭 주파수에서 작동하여 출력 필터 인덕터의 크기를 10µH에서 3.3µH로 크게 줄여주므로, 효율성이나 출력 품질을 저하시키지 않고 전체 오디오 신호 체인을 작게 유지할 수 있습니다.

고효율 및 낮은 소비 전력

배터리 사용 시간은 휴머노이드 로봇 설계에서 가장 중요한 고려 사항 중 하나입니다. 모터 드라이버, 호스트 프로세서, 인지 센서, 오디오 및 기타 시스템의 호스트가 모두 동일한 전원에서 동시에 전력을 소모하므로, 모든 부품은 에너지 소비를 최소화해야 합니다. 고효율과 낮은 유휴 전력 소비는 휴머노이드 로봇을 실제 환경에서 사용 가능하게 만드는 기초입니다.

TI는 오디오 포트폴리오 전반에 걸쳐 이를 직접 해결합니다. PCMD3180 컨버터는 유휴 상태에서 2.5mW만 소모하며, TAS6511-Q1 증폭기는 동일한 상태에서 전력 소비가 0.5W 미만입니다. 이는 최대 출력이 필요하지 않을 때 오디오 시스템의 배터리 소모를 최소화합니다. 최대 출력 시 TAS6511-Q1은 50W 출력 전력에서 동급 최고 수준인 90% 효율성을 제공하여 배터리 소모를 최소화합니다.

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

턴키 솔루션

많은 휴머노이드 로봇 회사는 오디오 개발에 직접 투입할 수 있는 설계 엔지니어링 리소스가 제한되어 있습니다. 모션, 인지 및 AI 등 여러 분야에 리소스가 분산되어 있으므로, 오디오 부품은 빠르게 찾을 수 있고 쉽게 구현할 수 있어야 합니다.

TI는 이를 염두에 두고 오디오 포트폴리오를 설계합니다. PDM-TDM 컨버터, 클래스 D 증폭기 및 오디오 코덱을 포함한 각 IC는 애플리케이션 노트, 평가 모듈 및 TI의 오디오 구성 소프트웨어인 Pure Path Console을 통한 지원과 함께 제공됩니다. 설계자는 심도 있는 오디오 전문 지식 없이도 이러한 리소스를 활용하여 오디오 시스템을 빠르게 구성, 테스트 및 디버깅할 수 있습니다.

결론

휴머노이드 로봇이 통제된 환경에서 벗어나 공장, 병원, 가정으로 이동함에 따라, 정밀한 오디오 품질은 로봇이 사람과 얼마나 잘 어우러져 작동하는지를 좌우하게 될 것입니다. 실제 소음이 있는 환경에서 명확하게 듣고, 지능적으로 반응하며, 안전하게 소통할 수 있는 능력은 로봇의 유용성과 신뢰성을 결정하는 기초입니다. TI의 작고 효율적이며 통합하기 쉬운 오디오 기술은 로봇 설계 팀이 공간, 전력 또는 개발 시간을 희생하지 않고도 이러한 과제를 해결할 수 있는 도구를 제공하므로, 설계자가 다음 단계, 즉 사람들이 생활하고 일하는 곳에서 안전하게 작동하는 로봇을 만드는 일에 집중할 수 있도록 합니다.

추가 리소스

- **부품 찾기:** PCMD3180, TAS6511-Q1, TAC5212, TPA3132D2의 제품 페이지 및 TI의 로봇 제품 개요를 살펴보세요.
- **설계 최적화:** Pure Path Console을 다운로드하고 TAC5212 및 PCMD3180의 전력 소비 관련 애플리케이션 노트를 살펴보세요.
- **전문가에게 묻기:** TI 오디오 E2E 포럼에 오디오 설계 관련 질문을 게시하세요.

작성자 소개

Jonathan Huang

Jonathan Huang은 오디오 컨버터를 전문으로 하는 TI의 제품 마케팅 엔지니어입니다. 조지아 공업 대학에서 전기공학 학사 학위를 취득했습니다. 여가 시간에는 새로운 요리법을 시도하거나 해외 여행을 즐깁니다.

Ramsey Foote

Ramsey Foote는 오디오 컨버터를 전문으로 하는 TI의 시스템 엔지니어입니다. 일리노이 대학 어배너-샴페인에서 전기공학 석사 학위를 취득했으며, 여가 시간에는 오디오 장비 설계와 암벽 등반을 즐깁니다.

Christian Greeff

Christian Greeff는 휴머노이드 로봇 솔루션을 전문으로 하는 TI의 로봇 시스템 엔지니어입니다. 플로리다 농업 기계 대학에서 전기공학 학위를 받았습니다. 또한 전기 자전거, 전기 고카트, 맞춤형 전동 스키 리프트 윈치, 20kW 전기 개인 항공기 등의 개인 프로젝트를 설계합니다.

상표

모든 상표는 각 소유권자의 자산입니다.

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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 비침해에 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 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 TI의 판매 약관 , TI의 일반 품질 지침또는 ti.com 이나 해당 TI 제품과 함께 제공되는 기타 조건의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다. TI가 명시적으로 제품을 사용자 정의 또는 고객 정의용으로 지정하지 않는 한, TI 제품은 범용의 표준 카탈로그 장치입니다.

TI는 사용자가 제안할 수 있는 어떠한 추가적이거나 상이한 조건도 반대하며 이를 거부합니다.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

최종 업데이트: 2025/10/25

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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, TI’s General Quality Guidelines, or other applicable terms available either on 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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025