

Application Brief

人形機器人中的 mmWave 雷達感測與感測器融合



概覽

本應用簡介探討人形機器人中用於精確偵測物體與動作的 mmWave 感測、安全性及感測器融合。相較於視覺型感測器，mmWave 雷達在低能見度條件下表現出色，同時也能在惡劣天氣條件下提供低成本、低功耗的運作。

此應用簡介涵蓋哪些內容：

- **人形機器人感測的重要性**：比較人形機器人設計的感測器類型、規格與系統整合考量。
- **mmWave 雷達感測器簡介**：說明雷達 IC 功能，以及邁向 60GHz 與 77GHz 解決方案的演進。
- **mmWave 感測器的優點**：詳細說明雷達在成本、天氣彈性、距離和功能安全認證方面的優勢。
- **感測器融合**：示範多感測器整合如何克服單一感測器限制，進而提升環境意識。
- **雷達與攝影機感測器融合**：介紹使用 TI 的開發工具和機器人 SDK 的實作情況。

簡介

人形機器人（如圖 1 所示）正迅速從研究平台轉型為製造、物流及服務產業中的生產系統。對於系統整合商和 OEM 而言，核心工程挑戰的核心在於在非結構化環境中實現可靠的自動導航、實作可在各種操作條件下運作的穩健感知系統，以及滿足人機協作的功能安全要求。



圖 1. 現代人形機器人

重要設計考量包括 360 級環境意識的感測器選擇、多模感測器資料的即時處理、行動平台中的電源預算限制，以及系統級安全認證路徑。隨著人形機器人外型尺寸標準化，差異化程度也越來越取決於感測架構的複雜性。特別是，當個別感測器模式受到照明變化、空氣傳播的微粒或表面反射率變化等環境因素的影響時，仍能維持運作可靠性的能力。

感測在人形機器人中的重要性

就像人類仰賴感測來導航並與世界互動一樣，人形機器人也需要精密的感測系統來自主、有效地執行任務。表一顯示人形機器人中常見的感測器。

表 1. 人形機器人中常見的感測器類型

感測器類型	說明	系統應用	設計考量
攝像頭 (可視系統)	RGB、深度或紅外線攝影機可擷取視覺資訊，以進行物體辨識與場景理解。	導航、感知、物件操控、人機互動	照明相依性、影像處理的運算需求、影格率與解析度之間的取捨
mmWave 雷達	毫米波雷達使用 60-77 GHz 頻帶中的 RF 訊號來偵測物體的距離、速度和角度。	導航、碰撞閃避、存在偵測、手勢辨識	不受天氣/照明影響、功耗、角解析度限制、多雷達環境中的干擾管理
光達	雷射測距可建立環境的高解析度 3D 點雲。	導航、地圖繪製、障礙物偵測、定位	成本、機械可靠性 (旋轉與固態)、性能隨振動而降低，對反射/吸收表面的敏感度
觸覺感測器	力、壓力和接觸感測器為操縱任務提供觸摸反饋。	夾爪系統、接觸檢測、力控制、表面紋理識別	感測器密度與成本的比較、訊號調節複雜性、重複接觸下的耐用性、與控制迴路整合
聽覺系統 (麥克風)	麥克風陣列可擷取語音命令、環保意識和本地化的聲音。	人機互動、聲音來源定位、異常偵測	噪音抑制要求、波束成形複雜性、聲音回波挑戰、語音辨識處理需求

mmWave 雷達感測器簡介

相較於視覺型感測，雷達式感測器 IC 具備長距離偵測能力、高動作靈敏度及隱私保護特性，因此設計人員常將其用於位置與近接感測。雷達感測器具備高準確度，因此在汽車和工業市場也相當熱門，應用範圍包括盲點偵測、碰撞偵測、人員存在和動作偵測等。

近年來，60GHz 和 77GHz 雷達感測器已取代 24GHz 雷達感測器，可提供更高解析度、更佳準確度和更小的外形尺寸。60GHz 與 77GHz 雷達頻帶也實現了工業機器人和工廠或家庭中的行動機器人應用中的物體存在偵測等新應用。



圖 2. 工業機器人中嵌入式 mmWave 感測器

mmWave 感測器透過光達和攝影機的優點

mmWave 雷達技術通常用於取代光達、攝影機和其他光學感測器，因為其可節省成本，並且能夠在惡劣的天氣條件下正常運作，同時攝影機可能受到不良照明和天氣影響。雷達也具備廣泛的範圍和涵蓋範圍，可讓感測器偵測 100 公尺以上的物體。設計人員常在行動機器人應用中使用雷達來降低功耗，因為雷達的功耗可以低至 1.5mW，以進行存在偵測。然而，將雷達與光達、攝影機或其他光學感測器搭配使用，可提供互補的失效模式；當其中一種感測器因環境條件而效能降低時，例如霧氣影響攝影機、反射表面干擾光達，另一種感測器仍可維持偵測能力，進而提升整體系統可用性。

從功能安全的觀點來看，TI 的非接觸式雷達感測器（如 [IWR6843](#)）是係透過廣泛的硬體與軟體開發流程所設計，並具備 TÜV SÜD 的裝置認證。所有 TI 雷達感測器皆具備內建功能安全機制，提供 IEC 61508 所需的必要診斷範圍，以滿足元件層級高達安全完整性等級（SIL）2 的硬體功能。

TI 透過診斷軟體庫、編譯器資格套件、第三方作業系統、開發工具和其他文件提供功能安全資料，協助工程師簡化安全設計程序和系統級認證。

感測器融合

人形機器人中只使用一種感測器會導致限制，例如資料收集不完整或不準確。例如，攝影機在不良照明和偵測到透明物體時可能會難以感知深度。同樣地，光達感測器通常無法偵測到水或玻璃等透明物體。光達也容易受到反射表面的鬼影物體，以及深色亞光材料未偵測到。這些限制可能導致導航，對象操縱和環境相互作用方面的錯誤。

感測器融合透過整合多個感測器的資料，進而解決這些問題，讓您更準確、可靠且全方位地了解機器人環境。透過結合各種感測方式的輸入，人形機器人可以做出更知情的決策，提升其執行複雜任務的能力，例如在不平坦地形上駕馭、抓取不同形狀和尺寸的物體，以及在動態的真實環境中互動。

感測器融合的優點包括：

- 透過合併不同感測器的資料來提升準確度
- 冗餘設計，可確保其中一個感測器故障時仍能維持功能
- 通過更全面地觀察周圍環境，提高環境意識
- 更好地適應動態環境

雷達和攝影機感測器融合

雷達因其在嚴苛條件下具有耐用性，並在各種移動期間偵測物體時具有可靠性，因此常用於機器人系統中。TI 感測器 IC 的開發旨在幫助工程師提升其為開發系統所開發的機器人的準確度與意識。這些裝置可協助緩解單一感測器系統的缺點。

例如，[圖 3](#) 中的攝影機和雷達感測器模組使用 IMX219 攝影機和 [IWR6843ISK EVM mmWave 雷達感測器](#)。此模組採用物件級融合方法，可套用於攝影機視覺處理與雷達處理鏈，並著重於物件群集與追蹤，讓工程師能在三維環境中偵測並追蹤物件。



圖 3. 以 IMX219 和 IWR6843ISK 打造的攝影機與雷達感測器模組

總結

隨著人形機器人從受控環境轉換到實際部署，mmWave 雷達技術對於實現人機協作所需的可靠性和安全標準，變得越來越重要。

結合天氣獨立運作，功能安全認證與無縫感測器融合功能，將雷達定位為新一代人形機器人平台中的實用元件。現今針對雷達光學融合開發感測系統的工程師，為真正自動人形機器人奠定基礎，能夠在複雜環境中與人類安全運作。

其他資源

- TI 的 [人形機器人概覽登陸頁面](#)
- 隨選網路研討會：[機器人感測](#)
- 開發工具：[mmWave 感測器的雷達工具箱](#)
- 演示概述：[攝影機與雷達融合示範](#)
- 產品資料夾：[適用於單晶片 60GHz 封裝天線 \(AoP\) mmWave 感測器的 IWR6843AOP 評估模組](#)
- 評估模組：[D3 Engineering DesignCore® 雷達評估模組](#)
- 白皮書：[為工業機器人提供最佳功能安全](#)
- 功能安全手冊：[簡化汽車及工業的功能安全認證功能安全手冊](#)

註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的智慧財產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#)、[TI 的通用品質指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

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