

毫米波雷达传感 在机器人中的应用



Dennis Barrett
产品营销经理

Adrian Alvarez
德州仪器 (TI) 合作应用工程师

介绍

当脑海中浮现机器人的形象时，您可能会联想到巨大的机械手臂，工厂车间里盘绕的随处可见线圈和线束，以及四处飞溅的焊接火花。这些机器与大众文化和科幻小说中描绘的机器人大大不相同，展望未来机器人是人们日常生活中无处不在的助手。

如今，人工智能技术的突破正在推动服务型机器人、无人机和自动驾驶车辆相关机器人技术的发展，市场规模预计将从 2016 年的 310 亿美元增加到 2020 年的 2370 亿美元^[1]。

随着机器人技术的进步，互补传感器技术也在进步。就像人类的五官感觉一样，将机器人系统部署到不断变化、不受控制的环境中时，通过将不同的传感技术结合起来取得最佳效果。互补金属氧化物半导体 (CMOS) 毫米波 (mmWave) 雷达传感器是机器人感知方面一项相对较新的技术。

机器人传感器技术

机器人传感器技术包括力和扭矩传感器、触摸传感器、一维/二维红外 (IR) 测距仪、三维飞行时间激光雷达传感器、摄像机、惯性测量单元 (IMU)、GPS

等。CMOS 毫米波雷达传感器可精确测量其视野范围内物体的距离以及任何障碍物的相对速度。这些传感技术各有优缺点，如表 1 所示。

测量	检测范围	检测角度	距离分辨率	可检测信息	恶劣天气	夜间作业	检测性能
毫米波 	长	窄、宽	好	速度、距离、角度	好	有	强大、稳定
摄像机 	中	中	中	目标分类	差	无	计算物体坐标复杂
激光雷达 	长	窄、宽	好	速度、距离、角度	差	无	天气恶劣时性能差
超声波 	短	宽	好	范围	差	无	短程应用

表 1. 传感器技术比较。

与基于视觉和激光雷达的传感器相比，毫米波传感器的一个重要优势是不受雨、尘、烟、雾或霜等环境条件影响。此外，毫米波传感器可在完全黑暗中或在阳光直射下工作。毫米波传感器可直接安装在无外透镜、通风口或传感器表面的塑料外壳后，非常坚固耐用，能满足防护等级 (IP) 69K 标准。此外，TI 的毫米波传感器的体积小、重量轻，生产设计体积是微型激光测距仪的三分之一，重量是其一半^[2]。

检测玻璃墙

图 1 说明了玻璃墙和隔墙在现代建筑中的应用，而服务型机器人（例如真空吸尘或拖地机器人）需要感知这些表面以防止碰撞。事实证明，使用摄像机和红外传感器很难检测这些元素。但毫米波传感器可检测到玻璃墙的存在及其后面的物体。



图 1.现代建筑广泛使用的玻璃表面。

为演示这一功能，我们设置了一个简单的实验，使用德州仪器 (TI) IWR1443BOOST 毫米波传感器评估模块 (EVM)，在 80cm 远处放置一块玻璃。然后，我们玻璃后面 140cm 处的位置放置了一个墙板，如图 2 所示。

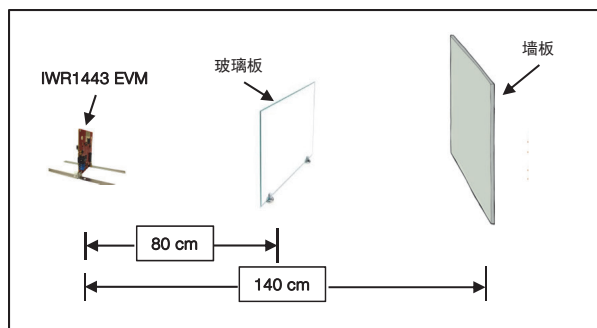


图 2.检测玻璃墙的测试装置。

使用与 EVM 配套的演示软件和 mmwave demo visualizer 中的可视化工具，如图 3 中显示的结果，清晰地证明了毫米波传感器可检测玻璃墙面及其背后的墙板。

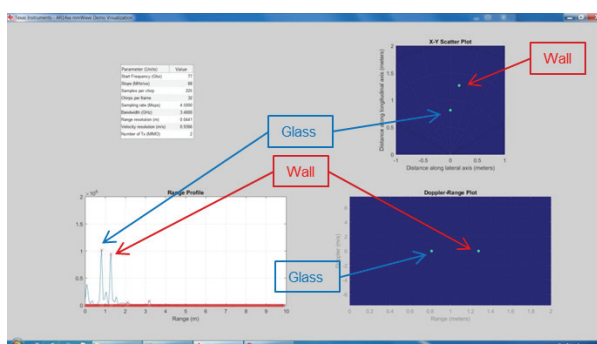


图 3.显示玻璃板和墙板检测的试验结果。

使用毫米波传感器测量对地速度

精确的里程计信息对于机器人平台的自主移动必不可少。可通过测量机器人平台上车轮或皮带的转动来获得此信息。然而，如果车轮在松散砾石、泥地或湿地等表面上打滑时，这种低成本方法显然无法轻松凑效。

更先进的系统可通过增加一个 IMU（有时通过 GPS 增强）来确保里程计非常精确。毫米波传感器可通过向地面发送线性调频信号并测量返回信号的多普

勒频移，为穿越不平坦的地形或底盘俯仰和偏航情况较多的机器人提供额外的里程计信息。图 4 显示了对地速度毫米波雷达传感器在机器人平台上的潜在配置。是将雷达指向平台前（如图所示）还是指向平台后（农用车辆的标准做法）需进行权衡。如果指向平台前，则可使用同一毫米波传感器既检测表面边缘，亦可避免不可恢复的平台损失，如从仓库装运台上跌落。如果指向平台后，则可将传感器安装在平台的重心点上，尽量减少俯仰和偏航对测量的影响，这在农业应用中是一个大问题。

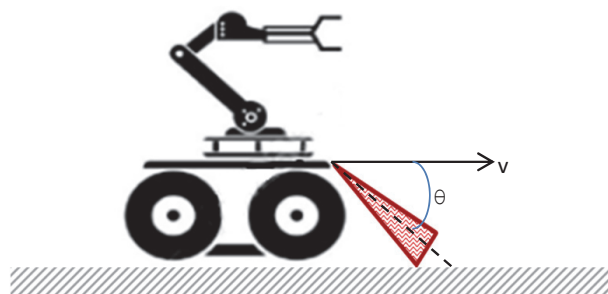


图 4. 机器人平台上的对地速度雷达结构。

方程 1 计算均匀理想条件下的速度：

$$f_d = (2V/\lambda) * \cos\theta \quad (1)$$

其中 V 是车辆的速度， λ 是发射信号的波长， θ 是天线俯角，而 f_d 多普勒频率（单位：Hz）。

扩展方程 1 能够使你补偿速度测量误差（例如由于不平坦地形导致传感器俯仰、偏航和翻滚而引入的误差），并引入转动速度分量。这些计算超出了本文的范围，但一般可在文献中找到它们。^[3]

机械臂周围的安全防护装置

无论是在服务能力、灵活的、低量的批处理自动化任务中，机器人与人类的交互越来越多，确保它们不会对与之交互的人造成伤害是至关重要的，如图 5 所示。

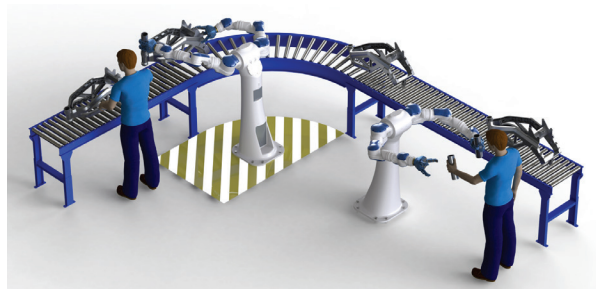


图 5. 未来的机器人将与人类更具互动性。

在过去，常用方法是在机器人的工作区域周围创建一个安全屏障或隔离区域，确保物理隔离，如图 6 所示。



图 6. 带有物理安全笼的机械臂。

传感器使得通过虚拟安全幕或气泡将机器人操作与非计划的人类交互分开成为可能，同时避免机器人与机器人发生由于密度和操作可编程性增加而导致的碰撞。基于视觉的安全系统需要控制照明，这会增加能耗、产生热量且需要维护。在尘土飞扬的制

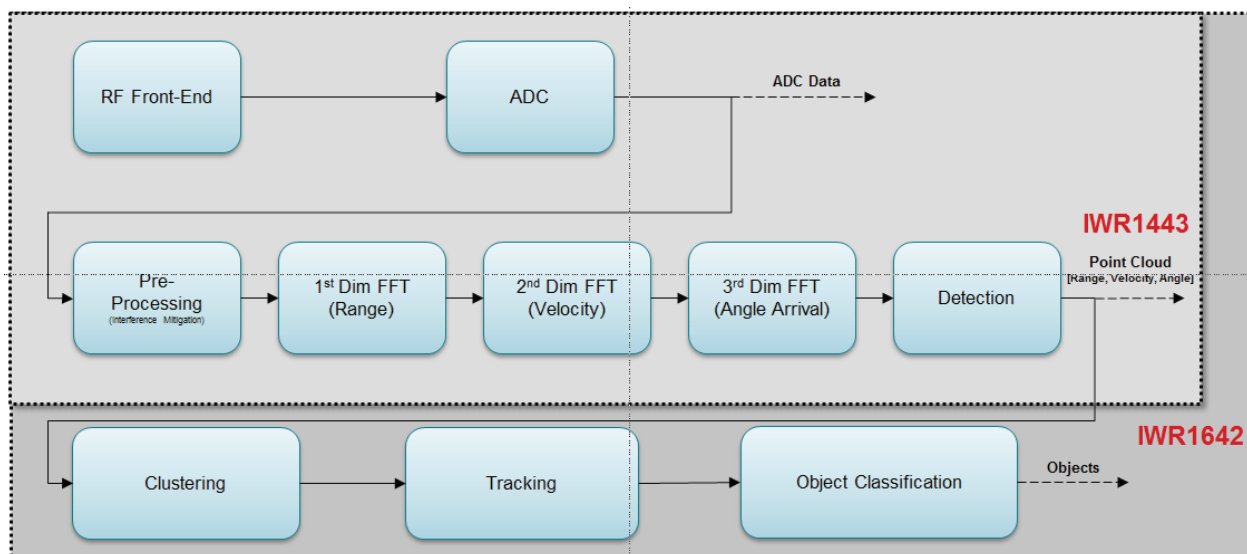


图 7. TI IWR 毫米波传感器处理链路。

造环境（如纺织或地毯编织）中，需要经常清洁和注意透镜。

由于毫米波传感器非常强大，无论车间的照明、湿度、烟雾和灰尘情况如何，都可检测物体，因此它们非常适合取代视觉系统，并且检测处理延迟非常低（通常少于 2ms）。由于这些传感器视野宽阔且探测距离较长，将其安装在工作区域上方可简化安装过程。只使用一个毫米波传感器即可检测多个物体或人员，减少所需传感器数量并降低成本。

毫米波传感器生成的点云信息

毫米波雷达传感器可通过模数转换器将射频 (RF) 前端模拟数据转换为数字表示形式。这种数字转换的数据需要高速外部数据总线，以将数据流输入处理链，然后经过一系列数学运算对在传感器视野范围内检测到的点生成距离、速度和角度信息。由于这些系统通常规模较大且成本高昂，因此 TI 试图将所

有这些功能集成到一个单片 CMOS 器件上，以减小尺寸，降低成本和功耗。额外的数字处理资源现可进行聚合、跟踪和分类等任务的数据后处理，如图 7 所示。

在毫米波传感器前面走动的人会产生多个反射点。可在常用的机器人操作系统可视化 (RVIZ) 工具中，将检测到的所有点映射到相对于传感器的三维区域中（如下一页的图 8 所示）。此映射会收集四分之一秒内的所有点。收集到的点信息密度可提供高保真度，可清晰看到腿和手臂的运动，因此物体分类算法会将其归类为一个移动的人。三维区域中开放空间的清晰性对于移动机器人来说也是非常重要的数据，可确保它们能够自主操作。

使用毫米波传感器映射和导航

使用 IWR1443BOOST EVM 检测到的物体点信息，然后就可以演示如何使用毫米波雷达作为唯一

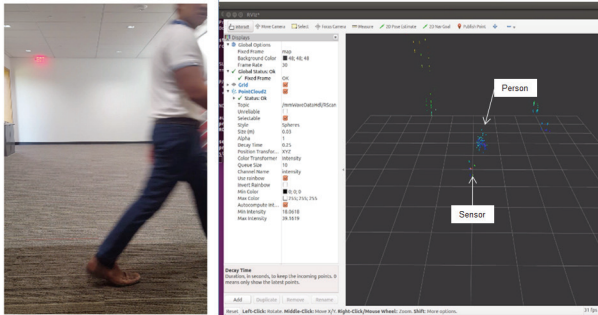


图 8. RVIZ 中显示的由 IWR1443BOOST EVM 捕捉的人体点云。

的传感器，精确地映射房间内的障碍物并在标识的



图 9. IWR1443 BOOST EVM 安装在 Turtlebot 2。

自由空间内进行自主操作。存在几个机器人开源社区，包括

[Robot OS \(ROS\)](#) 和 [Arduino](#)。

为了快速演示如何使用一个毫米波雷达进行映射和导航的应用，我们选择了 Robot OS 并

且将 IWR1443BOOST EVM 安装在 ROS 社区的 Turtlebot 2 开发平台上，如图 9 所示。

执行一个与 EVM 匹配的基本驱动程序 (ti_mmwave_

rospkg)，我们使用 OctoMap 和 move_base 库将点云信息集成到导航堆栈中，如图 10 所示。

我们在内部办公环境中放置障碍，并驱使 Turtlebot 2 通过该区域，使用 OctoMap 库建立一个三维栅格地图。下一页的图 11 是使用 RVIZ 的栅格屏幕截图。

我们使用基于 OctoMap 中的 move_base 生成的地图，输入最终目的地和姿势位置，如下一页的图 12 屏幕截图中的绿色箭头所示。Turtlebot 2 成功高效地导航到了选定的位置，然后旋转到适当的姿势，避开其路线中静态和动态障碍物。这证明了使用一个前向毫米波传感器在 ROS 环境中进行快速自主机器人导航的效果。

结论

毫米波传感器最初非常昂贵且尺寸较大，并需要多个分立组件。然而，由于现在 TI 将射频、处理和内存资源集成到一个单片 CMOS 芯片上，可以说毫米波传感器将补充或取代已确立的机器人传感技术。

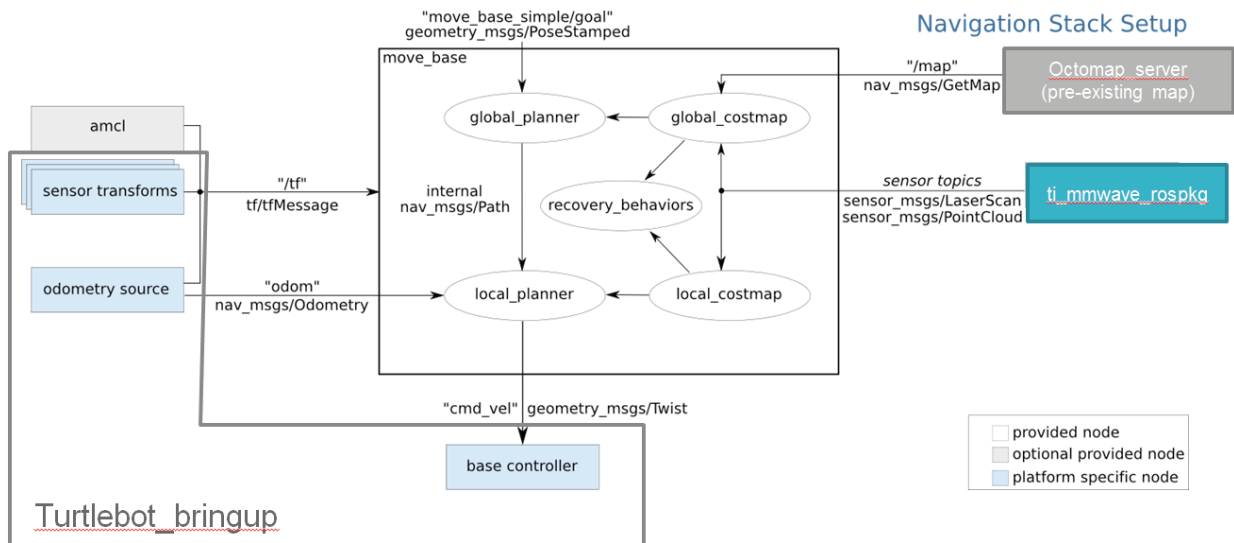


图 10. 与配备有 IWR1443BOOST 的 Turtlebot 2 配合使用的 ROS 库导航堆栈。

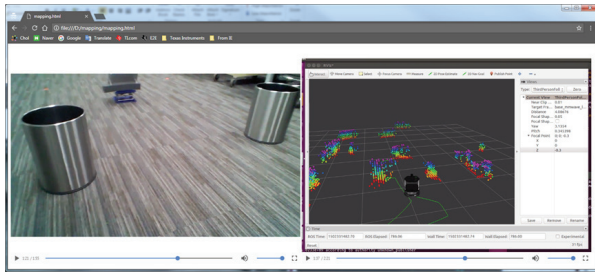


图 11.使用 OctoMap 库在 ROS 中生成栅格地图。

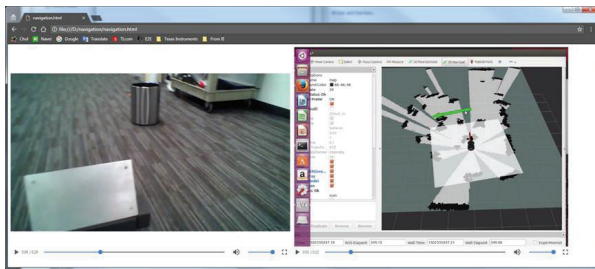


图 12.使用 IWR1443BOOST EVM 栅格地图和 ROS move_base 库，使 Turtlebot 2 进行自主导航

总之，以下是毫米波传感器与其他技术对比的优势：

- 毫米波传感器对环境条件（如阳光直射、阴影或水的光反射）不敏感。
- 毫米波可检测玻璃墙、隔墙和家具，而基于光的传感解决方案则可能无法做到。
- 毫米波提供物体的多普勒速度信息，这有助于车轮在潮湿表面打滑时增强机器人里程计。

- 基于毫米波的传感器机械复杂度较低，从而减少了制造校准和误差校正过程。没有开口或透镜，它们可直接安装在塑料外壳后。集成校准意味着在线制造复杂性更低。广阔的视野使得不再需要机械旋转传感器机制。
- TI 的高度集成单片 CMOS 毫米波传感器使所有处理都可在传感器内发生。与基于视觉的系统相比，这降低了材料成本、缩小了尺寸并减少了中央控制器处理器每秒所需的百万条指令。

毫米波传感器技术提高了机器人的智能化操作，同时在实际环境中增强了鲁棒性。这项技术的应用将进一步加快机器人系统的快速采用。

参考文献

1. Tractica. “[《机器人市场预测》](#)。” 17 年第 2 季度。
2. Barrett D.、D. Wang、A. Ahmad 和 V. Mahimkar. “[《使用毫米波传感器提高无人机安全性和生产力》](#)。” 德州仪器 (TI) 白皮书，SPYY001，2017 年。
3. Fleming W.J. 和 A.K.Hundiwal. “[《雷达对地速度传感器》](#)。” 第 35 届 IEEE 车辆技术会议，1985 年，第 262–272 页。

重要声明：本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

平台标识是德州仪器 (TI) 的商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产。

IMPORTANT NOTICE FOR TI DESIGN INFORMATION AND RESOURCES

Texas Instruments Incorporated ("TI") technical, application or other design advice, services or information, including, but not limited to, reference designs and materials relating to evaluation modules, (collectively, "TI Resources") are intended to assist designers who are developing applications that incorporate TI products; by downloading, accessing or using any particular TI Resource in any way, you (individually or, if you are acting on behalf of a company, your company) agree to use it solely for this purpose and subject to the terms of this Notice.

TI's provision of TI Resources does not expand or otherwise alter TI's applicable published warranties or warranty disclaimers for TI products, and no additional obligations or liabilities arise from TI providing such TI Resources. TI reserves the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its TI Resources.

You understand and agree that you remain responsible for using your independent analysis, evaluation and judgment in designing your applications and that you have full and exclusive responsibility to assure the safety of your applications and compliance of your applications (and of all TI products used in or for your applications) with all applicable regulations, laws and other applicable requirements. You represent that, with respect to your applications, you have all the necessary expertise to create and implement safeguards that (1) anticipate dangerous consequences of failures, (2) monitor failures and their consequences, and (3) lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate actions. You agree that prior to using or distributing any applications that include TI products, you will thoroughly test such applications and the functionality of such TI products as used in such applications. TI has not conducted any testing other than that specifically described in the published documentation for a particular TI Resource.

You are authorized to use, copy and modify any individual TI Resource only in connection with the development of applications that include the TI product(s) identified in such TI Resource. NO OTHER LICENSE, EXPRESS OR IMPLIED, BY ESTOPPEL OR OTHERWISE TO ANY OTHER TI INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT, AND NO LICENSE TO ANY TECHNOLOGY OR INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT OF TI OR ANY THIRD PARTY IS GRANTED HEREIN, including but not limited to any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information regarding or referencing third-party products or services does not constitute a license to use such products or services, or a warranty or endorsement thereof. Use of TI Resources may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

TI RESOURCES ARE PROVIDED "AS IS" AND WITH ALL FAULTS. TI DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES OR REPRESENTATIONS, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING TI RESOURCES OR USE THEREOF, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ACCURACY OR COMPLETENESS, TITLE, ANY EPIDEMIC FAILURE WARRANTY AND ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

TI SHALL NOT BE LIABLE FOR AND SHALL NOT DEFEND OR INDEMNIFY YOU AGAINST ANY CLAIM, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY INFRINGEMENT CLAIM THAT RELATES TO OR IS BASED ON ANY COMBINATION OF PRODUCTS EVEN IF DESCRIBED IN TI RESOURCES OR OTHERWISE. IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY ACTUAL, DIRECT, SPECIAL, COLLATERAL, INDIRECT, PUNITIVE, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR EXEMPLARY DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF TI RESOURCES OR USE THEREOF, AND REGARDLESS OF WHETHER TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

You agree to fully indemnify TI and its representatives against any damages, costs, losses, and/or liabilities arising out of your non-compliance with the terms and provisions of this Notice.

This Notice applies to TI Resources. Additional terms apply to the use and purchase of certain types of materials, TI products and services. These include; without limitation, TI's standard terms for semiconductor products (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>), [evaluation modules](#), and [samples](http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm) (<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>).

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated