

# 机器人应用中的毫米波雷达传感器



Dennis Barrett  
产品营销经理

Adrian Alvarez  
德州仪器 (TI) 实习应用工程师

# 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的线圈和线束，以及四处飞溅的焊接火花。这些机器人与大众文化和科幻小说中描绘的机器人大大不相同，在后者中，机器人常以人们日常生活助手的形象示人。

如今，人工智能技术的突破正在推动服务型机器人、无人飞行器和自动驾驶车辆的机器人技术发展，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<sup>[1]</sup>。

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，通过将不同的传感技术结合起来，可在将机器人系统部署到不断变化、不受控制的环境中时取得最佳效果。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。这些感应技术各有优缺点，如表 1 所示。




传感器	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	短接	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。这些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. 现代建筑广泛使用玻璃表面。

为演示这一功能，我们设置了一个简单的实验，对 80cm 远处的一块玻璃使用德州仪器（TI）IWR1443BOOST 毫米波传感器评估模块（EVM）。

然后，我们在玻璃后面 140cm 处的位置放置了一个墙板，如图 2 所示。

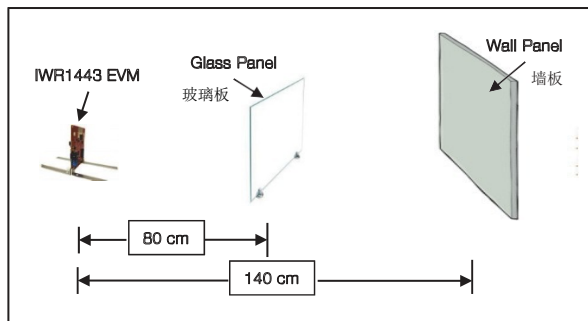


图 2. 设置用于检测玻璃墙的检测。

在毫米波演示可视化工具中使用 EVM 随附的演示软件和可视化工具，图 3 中显示的结果明确证明了毫米波传感器可检测玻璃墙面及其背后的墙板。

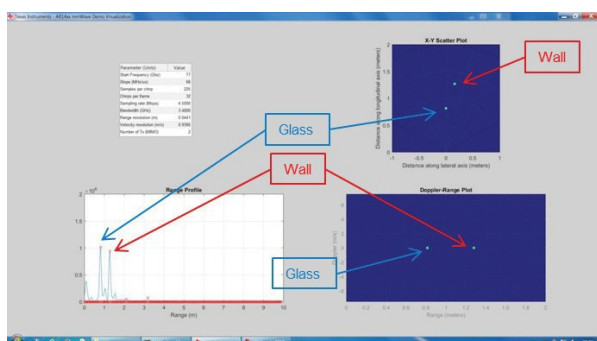


图 3. 显示玻璃板和墙板检测的试验结果。

## 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，则也可使用同一毫米波传感器来检测表面边缘，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。

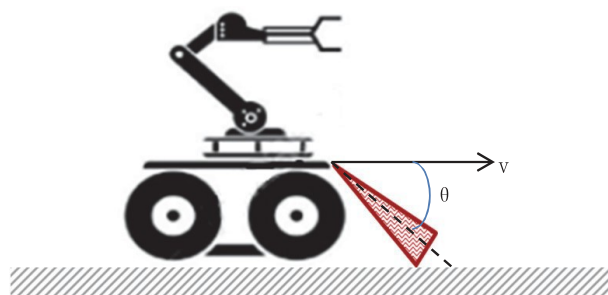


图 4. 机器人平台上的对地速度雷达配置。

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， $\lambda$  是发射信号的波长， $\theta$  是天线俯角，而  $f_d$  是多普勒频率（单位：Hz）。

扩展方程 1 能够补偿变量（例如，导致传感器俯仰、偏航和翻滚的非均匀地形）的速度测量误差，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。<sup>[3]</sup>

## 机械臂周围的安全防护装置

随着机器人在服务能力或在灵活的低批量处理自动化任务中与人类发生更多的交互，必须确保它们不会对与之交互的人造成伤害，如图 5 所示。

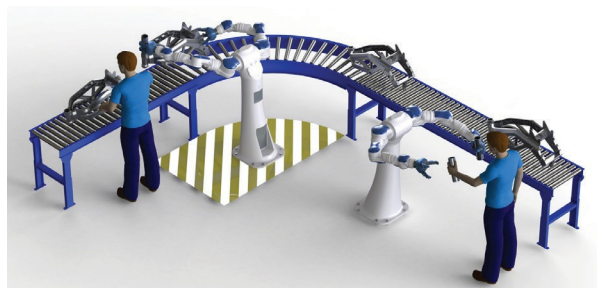


图 5. 未来的机器人将与人类有更多的交互。

在过去，常用方法是在机器人的工作区域周围打造一个安全屏障或排除区域，确保物理隔离，如图 6 所示。

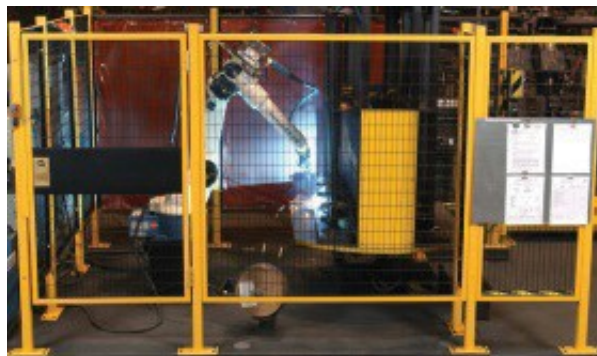


图 6. 带有物理安全笼的机械臂。

传感器使虚拟安全幕或气泡能够将机器人操作与非计划的人类交互分开，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受控制的照明，这会增加能耗、产生热量且需要维护。在尘土飞扬的制造环境

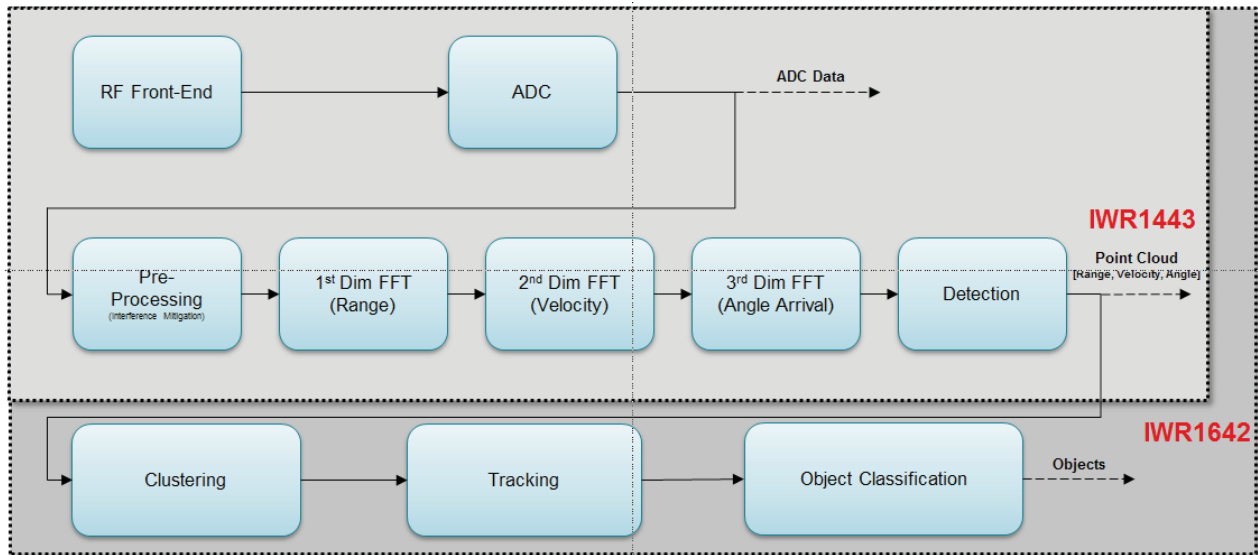


图 7. TI IWR 毫米波传感器处理链。

（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，并且可以极低的处理延迟（通常少于 2ms）下提供这种检测。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，以将数据流引入处理链，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。

走在毫米波传感器前面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的传感器，

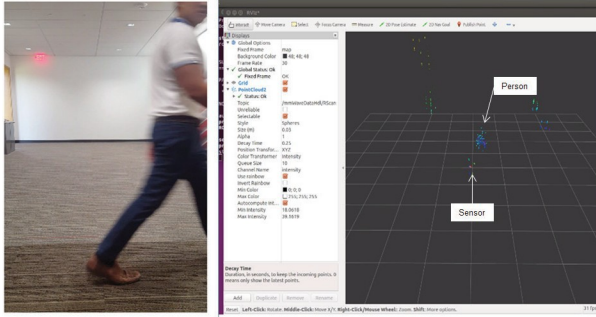


图 8. RVIZ 中显示的由 IWR1443BOOST EVM 捕捉的人体点云。

精确地映射房间内的障碍物并在标识的自由空间内进行



图 9. IWR1443 BOOST 安装在 Turtlebot 2 上的 EV M。

在 ROS 社区 Turtlebot 2 开发平台的 IWR1443BOOST EVM, 如图 9 所示。

通过对 EVM 实现基本驱动程序 (ti\_mmwave\_ropkg),

自主操作。存在几个机器人开源社区, 包括 [Robot OS \(ROS\)](#) 和 [Arduino](#)。为了快速演示如何在映射和导航应用中使用毫米波雷达, 我们选择了 Robot OS 和安装

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设置障碍并使 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。

我们使用从 OctoMap 和 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。这证明了使用一个面向未来的毫米波传感器快速在 ROS 环境中进行基本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

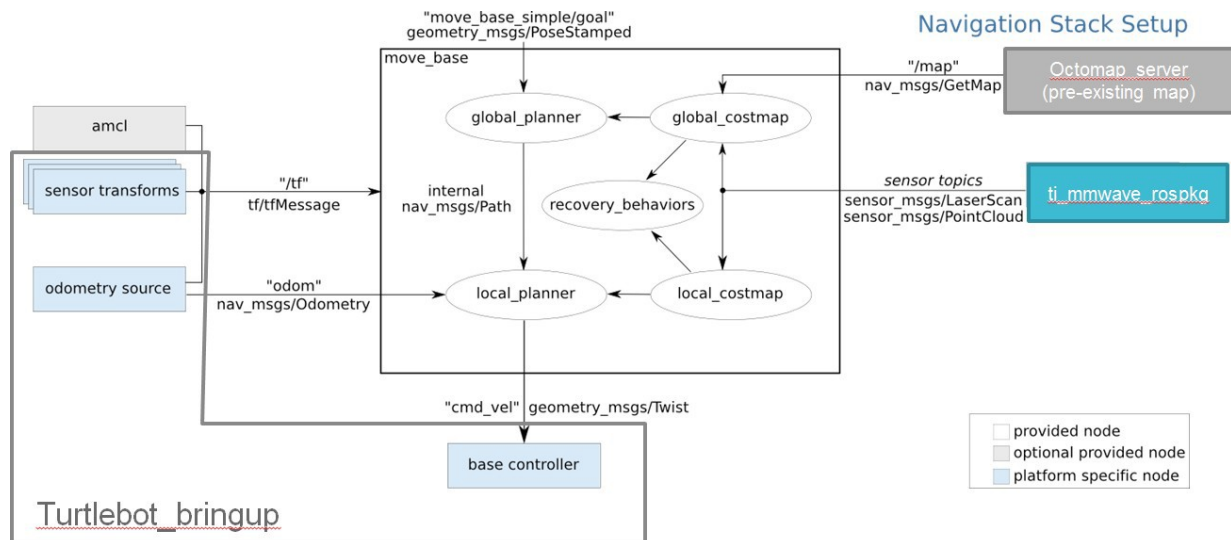


图 10. 与配备有 IWR1443BOOST 的 Turtlebot 2 配合使用的 ROS 库导航堆栈。

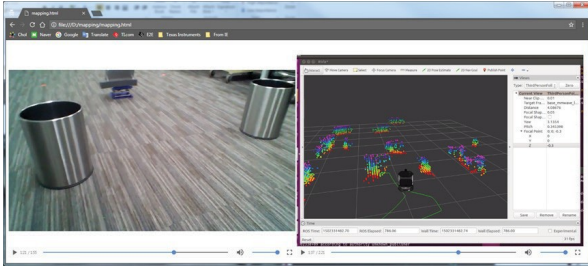


图 11. 使用 OctoMap 库在 ROS 中生成栅格地图。

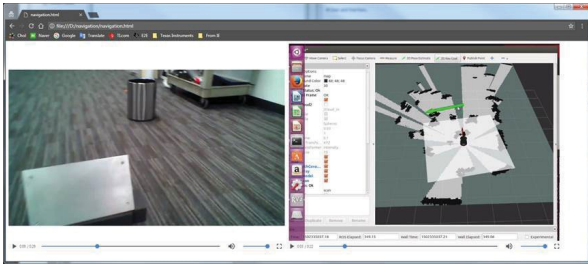


图 12. 使用 IWRI443BOOST EVM 栅格地图和 ROS move\_base 库，使 Turtlebot 2 进行自主导航

毫米波传感器将补充或取代已确立的机器人传感技术。

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，这在车轮在潮湿表面打滑时有助于增强机器人里程计。

- 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。没有通风口或透镜，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耐用性。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。

The platform bar is a trademark of Texas Instruments. All other trademarks are the property of their respective owners.

© 2017 Texas Instruments Incorporated



ZHCY119



## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品；(2) 设计、验证并测试您的应用；(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司