



从固定机械臂到人形机器人： 移动机器人的演进历程





人工智能产业链联盟

星主： AI产业链盟主

 知识星球

微信扫描预览星球详情



从固定机械臂到人形机器人： 移动机器人的演进历程

Nicolas Lehment, CTO-SBS-SI

本文在撰写过程中得到了Iain Galloway、Joost van Dorn、Gerald Pekar、Peter van der Perk、Jari van Ewijk等专家的指导与支持。

目录

摘要	3
引言	3
三大核心议题	3
复杂性演进路径	3
地点导航与任务执行	8
应对新任务的复杂性	11
结论和行动倡议	12

摘要

本白皮书围绕移动机器人领域，探讨机器人技术的前沿进展与挑战，聚焦三大核心议题：机器人运动控制，复杂环境下的感知与导航，以及适用新任务的模块化与灵活性。全文以机器人系统从简易固定机械臂到高端人形机器人的演进脉络为主线，着重阐述具身人工智能（embodied AI）在实现机器人多功能化与敏捷性方面的重要价值。

文章系统梳理了自动导引车（AGV）、自主移动机器人（AMR）、漫游车、无人机、腿足机器人及人形机器人等各种机型，深入解析各种机型的控制系统、导航能力及为提高性能进行的AI集成。同时，文中还指出，为实现机器人系统的可扩展性与智能化，需要配备先进的实时控制器、功能安全机制及高效电源管理。

本文最后讨论了人形机器人在以人为中心的环境中的未来应用，并强调构建多功能机器人形态组合对于提升实用性和加速普及的重要意义。

引言

机器人技术一直是人类科技关注的焦点。尽管科幻文学中早期对机器人的描绘多为类人生物形态（如卡雷尔·恰佩克、艾萨克·阿西莫夫、E.T.A.霍夫曼笔下的经典形象），但1961年应用于汽车制造业的首台机械臂Unimate却是极为简化的工业设备。

经过计算机设计、控制理论、电机工程及传感技术的多年发展，机器人逐渐具备导航、交互与协作能力，能够完成更复杂的任务。如今，具身人工智能正成为新一代高机动性机器人的核心技术特征。本文总结了构建日益复杂的机器人系统的关键要素及其重要性。

三大核心议题：

- 机器人运动控制机
- 日益复杂环境下的感知与导航
- 适用新任务的模块化与灵活性（沟通、设计等）

本文暂不展开机械设计、任务管理及机器人软件开发等细分领域，如有兴趣，欢迎联系移动机器人团队进一步交流。

复杂性演进路径

以运动方式为分类维度，现代机器人可划分为几种不同类别，与操作机器人所需的控制与指令系统的复杂性形成显著的对应关系。随着各类技术的不断发展与完善，复杂性逐渐变得可控，其演进过程也可视为一部简明的机器人发展史。



图1：以运动方式为分类维度，现代机器人可划分为几种不同类别，与操作机器人所需的控制与指令系统的复杂性形成显著的对应关系。



图2：三轴固定机械臂，用于将物品或工具精准移动到工作空间内的特定位置

机器人最简单的形式可能是一个三轴固定机械臂或龙门起重机，用于将物品或工具搬运至工作空间内的特定位置。更为复杂的固定机器人通常采用“机械臂”结构，由5至7个依次相连的驱动关节构成，末端配有工具或夹具。这类机械臂已广泛应用于装配、取放、焊接、检验等工业领域。机械臂的运动轨迹在空间内的指定点之间预先规划与计算，由中央电机控制系统根据位置/扭矩曲线调度关节电机，将工具移至指定位置。

计算、电机控制与传感技术的最新进展，逐渐打破传统的集中式结构与僵化的调度，更轻量化的机器人能够在工作空间内灵活地操控工具或夹具。目前，这些系统采用由中央运动规划器引导的分布式电机控制系统。

需留意的是，路径规划、运动控制与电机控制是三个区别明显的概念：

- 路径规划是从工作空间层面考量任务，确定机器人需将工具（或自身）移动至何处，以完成指定任务。
- 运动控制将机器人在操作空间内的姿态与位置视作其关节位置的函数。为实现路径规划器要求的目标姿态，运动控制会计算电机所需执行的动作。
- 电机控制负责实时指令下达与状态监测，执行由运动控制系统计算出的动作指令。

在环境可控且已知的情形下，路径规划与运动控制可预先计算，或以低频运行。

随着工厂加速自动化进程，工程师已开始运用机器人在车间和仓库搬运货物与箱子。自动导引车（AGV）通过识别嵌入地面的磁条或光学标记，在预设站点之间进行导航。由于路径固定且地面平坦，AGV的电机控制与运动控制相对简单。

随着传感与计算能力的提升，AGV逐渐演变为具备自我定位与导航功能的自主移动机器人（AMR）。尽管运动与电机控制系统基本不变，但为了处理同步定位与地图构建（SLAM）、路径规划、任务调度以及更高层级的系统接口等任务，系统中需新增一个独立的计算模块。



图3：搭载单反相机的多旋翼无人机

漫游车与自主移动机器人（AMR）同属轮式机器人，但它们已突破仓库和工厂等结构化环境的限制，能够在动态的户外环境中执行货物运输或状态监测任务，甚至远赴火星。漫游车面临的主要挑战在于如何在不受控的广阔环境中进行导航；在这种环境下，避障与机载规划是任务成功的关键。我们将在“地点导航与任务执行”章节中更详尽地探讨导航方面的挑战。

需要指出的是，前文提到的所有系统（机械臂、AMR和漫游车）在设计上本身就具备稳定性——即使断电或运动控制功能失效，系统也会自动进入安全、稳定的静止状态。然而，随着嵌入式计算能力的提升，工程师开始突破固有稳定性的限制。在研发多旋翼无人机时，工程师成功地让本质上不稳定的系统实现了稳定。

这一成果得益于对原本独立的运动控制与电机控制系统的深度整合。运动控制成为维持特定位置与姿态所必需的实时关键功能。一旦运动控制回路中断，无人机将立刻坠落。由于功耗与重量的限制，路径规划等更高层级的功能在早期通常由人工操作完成，例如通过遥控器下达“以特定速度向前移动”等一般性运动指令。

理解身体运动控制与单个电机控制之间的紧密关联，为腿足机器人的设计奠定了基础。从波士顿动力公司的四足机器人Spot等广为人知的设计开始，工程师原本应用于单个转子的运动/电机控制回路扩展为运动链结构。可以这样理解：在无人机中，四个转子以不同的力向下推动空气。若要以稳定的速率上升，必须同时提高四个转子的转速。而机器狗站立时，至少两个（通常是三个）关节需以不同的扭矩和速度移动至特定位置并精准保持。因此，腿足机器人从相对简单的集成速度控制，转变为多个位置控制回路组成的互联运动链。在运动过程中，机器人的重心通过这些运动链的动态排列来保持平衡。



图4：四足机器狗

为了稳定控制这些运动链，需要位置编码器、电机、惯性测量单元（IMU）、陀螺仪和计算元件等所有相关组件之间实现低时延通信。此外，还需以低时延执行复杂的全身运动与电机控制算法，而这一能力的实现得益于机载计算能力的显著提升。

更为复杂的是，这些系统被设计用于应对具有挑战性的环境——毕竟，在平坦的仓库或医院地面，简单轮式结构已足够应对移动需求。腿部结构只有在轮式方案不再适用时才显现其价值，因此在运动规划中必须考虑环境因素（例如，确定机器人每只脚踏下的位置）。由于系统处于动态运动且本身不具备稳定性，运动规划必须以极低延迟执行，确保每只脚都能及时落在符合更高层级导航要求的合适位置。

当前许多腿足机器人仍通过“踩踏式”腿部运动规避这一挑战，这种模式在多数平坦地面场景中有效。但未来技术突破的关键在于开发近实时的运动规划器，以支撑复杂的运动与电机控制系统。

尽管仍面临诸多挑战，人形机器人如今已具备在林间小道上以双足行走的能力。然而，要实现人形机器人的完整构想，手臂部分也必须纳入考量。目前，许多演示系统聚焦于展现复杂的身体运动，以营造视觉上的强烈冲击。在这些系统中，手臂作为辅助元件集成至全身运动规划与执行框架中，力求达到实时协同。这一设计显著增加了计算复杂性，因为在腿部沿预定路径行走（或完成复杂的跳跃动作）时，手臂需要辅助维持平衡。



图5：由俄勒冈州立大学研发的步行机器人Cassie正与机械工程系研究助理Mikhail Jones一同在森林中漫步。

图片来源：[俄勒冈州立大学](#)

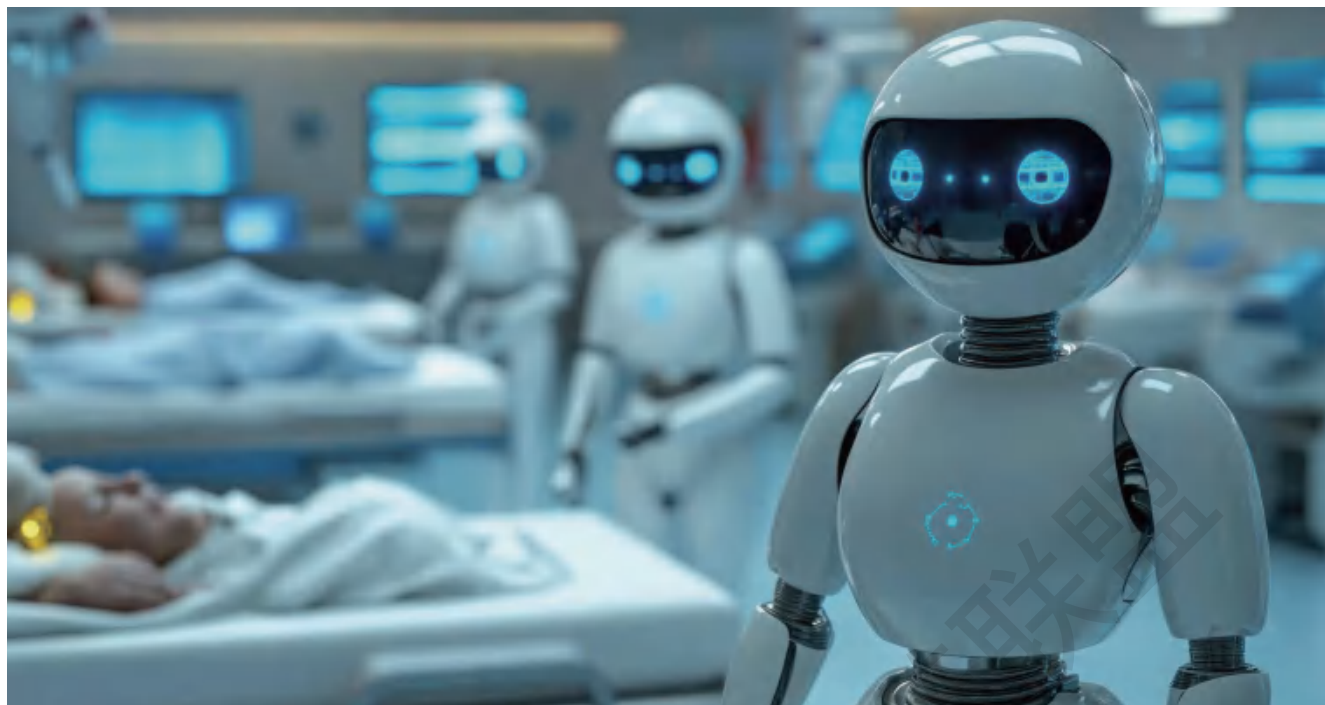


图6：医院场景中的人形机器人

目前研究与创新的前沿在于赋予人形机器人多物体交互能力，比如搬运不同重量的物品、使用手持工具对静止甚至动态的物体施力，以及转动头部捕捉全景与细节。上半身执行的动作必须通过全身运动与控制保持平衡。由于手臂上的接触力在任务过程中不断变化，为了维持整体平衡，运动规划系统必须与实时控制回路深度融合，以适应任务执行中动态变化的运动约束。

运动规划越来越依赖AI模型，具身人工智能正深刻影响系统设计，AI逐步成为保障系统稳定与平衡的核心部分。因此，对AI可靠性与实时性能的要求也变得至关重要。

机器人研发企业倾向于将关键计算任务集中于单一中央计算平台，同时通过嵌入机器人四肢与关节驱动器的微控制器（MCU）来执行单关节位置控制。这种架构既满足运动规划与控制的无缝集成需求，也便于在持续快速迭代过程中只需更新一个计算平台。

尽管人形机器人备受关注，但从经济实用性出发，轮式或多足结构仍然是主流地面移动机器人方案。

	AMR	无人机	腿足型	人形
路径规划	• 慢 (<10Hz)	• 快 (>10Hz, 通常由其他模块分担处理)	• 快 (约10Hz)	• 快 (约10Hz)
	• 密集环境, 大多以二维形式呈现	• 稀疏自然环境	• 复杂且密集的三维环境, 动态障碍物	• 复杂且密集的三维环境, 动态障碍物
	• 动态障碍物			
肢体运动规划	无	无	• 实时, 12+ 自由度	• 实时, 30+ 自由度
			• 动态平衡	• 动态平衡
运动控制	快, 2 自由度	实时, 4 自由度		• 手臂负载/接触力补偿
电机控制	• 实时	• 实时	• 实时	• 实时
	• 伺服控制	• 速度控制	• 伺服和扭矩控制	• 伺服和扭矩控制

表1：各类移动机器人原型的控制要求

地点导航与任务执行

目前，大多数轮式移动机器人的导航主要依赖于两类传感器。第一种是激光扫描仪，既能生成机器人周围水平地面的二维地图，又能触发关键的功能安全机制。第二种是摄像头，在有限的视野（FOV）内收集重要信息，比如用于标识位置或待取货物的二维码。

激光扫描仪和摄像头的数据会被输入到负责环境建图和导航的计算模块中。这个过程的第一阶段通常称为SLAM，可以通过全球或本地定位系统（如GPS、蓝牙® 标签、墙上的二维码）提供的数据进行增强，并结合已有

信息（如仓库地图）进一步提升精度。生成的地图随后用于规划通往环境中特定位置的路径，同时考虑其他机器人或箱子等临时障碍物。这个阶段称为导航，其复杂程度取决于作业区域的大小、其他车辆或人员的数量和速度，以及作用于机器人的操作限制等因素。在仓储物流中，广域导航通常由集中协调计算机处理，为整个机器人机群安排路径。

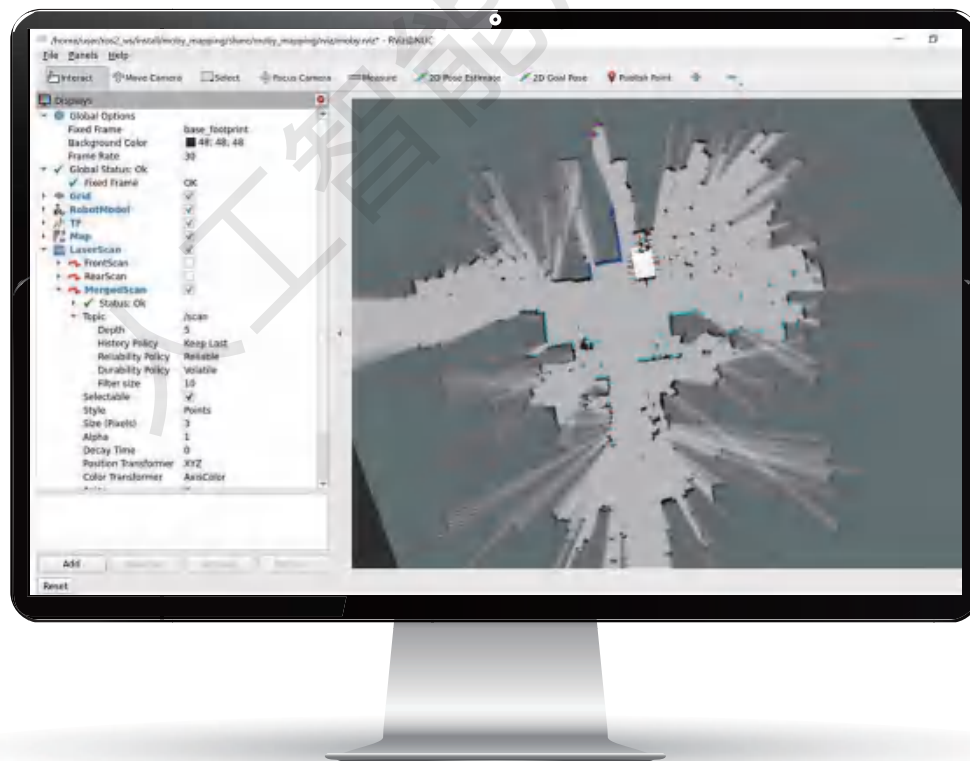


图7：通过SLAM算法基于二维激光扫描仪数据创建的地图

图片来源：Neuromeka

在工业或物流环境中运行时，固定机械臂和AMR都必须满足严格的安全要求。将机器人与人类用户严格隔离，或者使用经过安全认证的区域传感器（如激光扫描仪），可以满足功能安全需求，例如在人员接近时，于安全距离内停止运动并切断系统电源。虽然这些区域传感器也可用于导航任务，但它们会在车辆周围划定一个严格的安全区，确保无人会接触到正在移动的机器人。然而，其高昂的成本是工业机器人整体系统成本居高不下的重要因素。

即使在工厂和仓库等可控环境中，激光扫描仪和用于识别二维码的摄像头也可能无法完全满足所有任务要求。近年来，许多AMR供应商已开始将基本的人工智能功能集成到其机器人中，用于识别障碍物并辅助导航（例如判断挡路的是箱子还是其他机器人），或者添加深度感应摄像头，实现更精细的运动规划。

随着机器人进入餐厅、医院或城市街道等复杂、不可控的环境，对额外传感器和相关计算能力的需求会迅速增加。这正是机器人自20世纪60年代起最初被部署在受控环境中的一个关键原因。直到半导体技术和低功耗嵌入式计算方案取得突破，机器人技术才得以进入

更广泛的应用领域。可以说，手机市场对低功耗、高性能芯片技术的推动，是先进移动机器人出现的必要条件。

例如，如今的专业地面清洁机器人除了配备一套激光雷达（LIDAR）传感器外，通常还搭载6至12个摄像头。其中部分传感器具有双重功能：既用于导航，也用于执行特定任务。比如，前置摄像头可以识别宠物（触发路径规划覆盖以避让），或者检测污渍（将其添加到清洁任务列表中）。

当漫游车、腿足机器人或人形机器人离开自助餐厅或车间的平坦地面时，3D传感对于识别低垂的树枝、路面坑洼或楼梯等障碍物变得越来越重要。3D LIDAR、飞行时间（ToF）摄像头等类似技术至关重要。腿足机器人规划足部或附属肢体实现稳定运动的落点，也必需这些技术。随着这些传感器生成更高密度的地图，计算需求也相应增加。

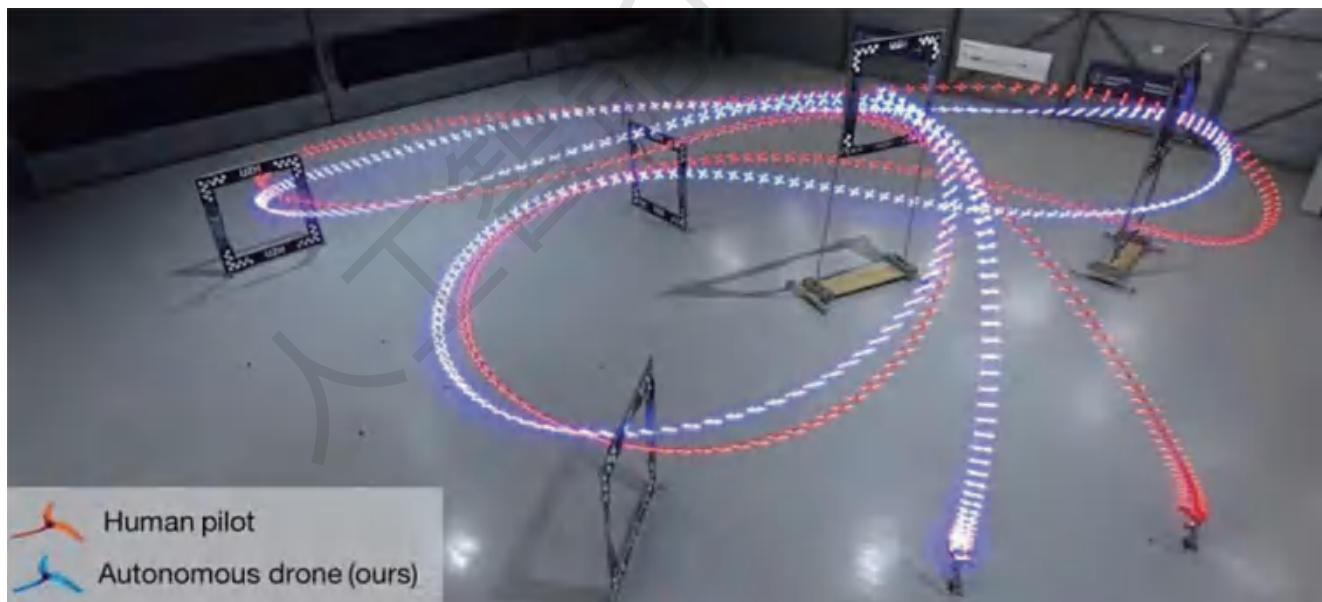


图8：在无人机竞速赛道上，自主导航与人类操作员的对比
图片来源：[HACKADAY](https://www.hackaday.io/)

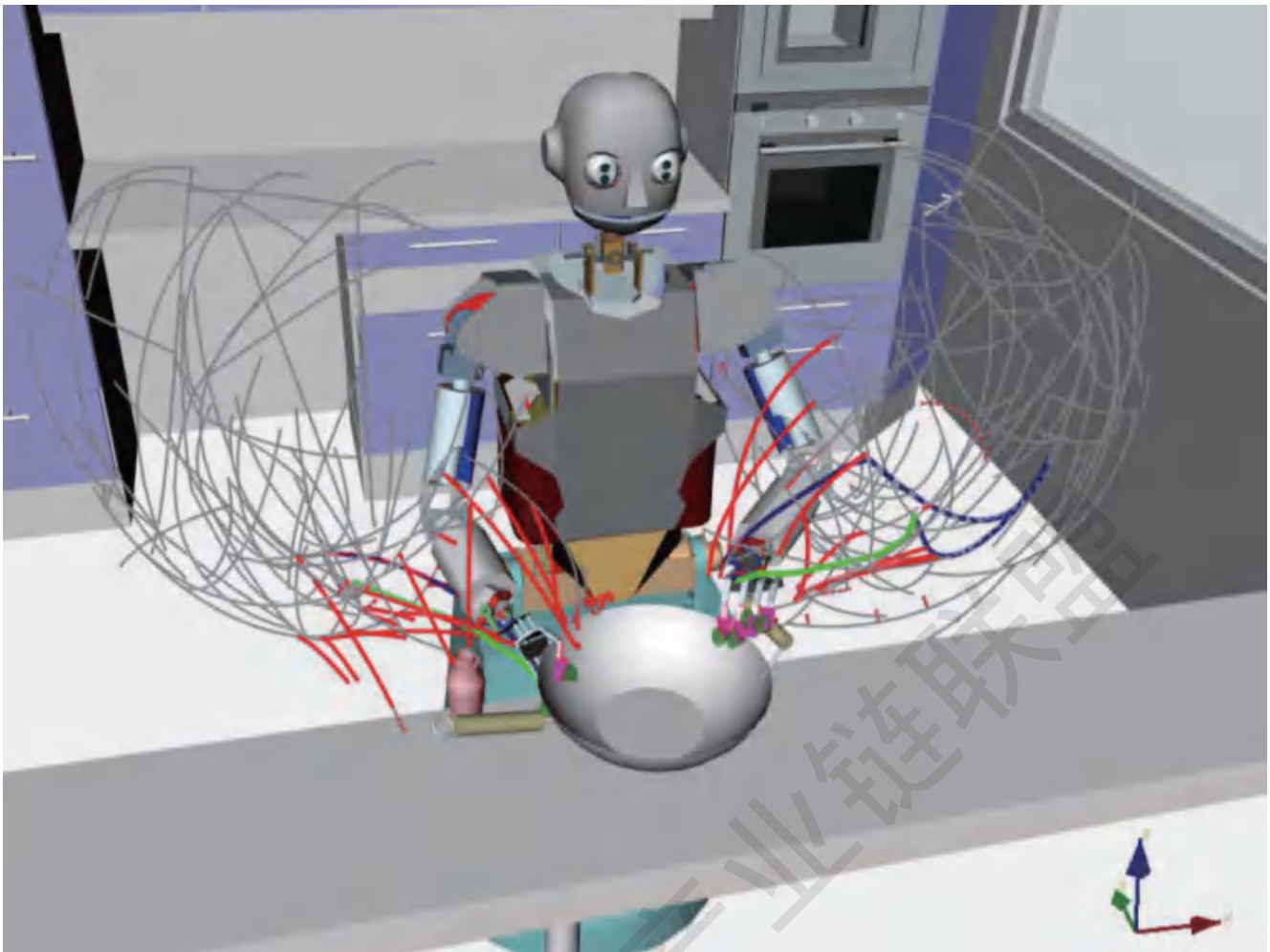


图9：KIT机器人在模拟环境中规划抓取动作

图片来源: [KIT H2T](#)

在工业、商业和家庭环境中，自主机器人操作的出发点是自动识别物体及其在机器人工作空间中的位置。这种能力源自于固定机械臂相对简单的料箱拾取操作，就在几年前，这还被视为一项重大挑战；而如今，这对于非结构化环境中的自主任务来说必不可少。例如，设想一个在餐厅中负责清理餐桌的服务机器人：一个配备了机械臂、引导摄像头和托盘的基础AMR，用于收集用过的杯子和玻璃杯。该AMR必须靠近餐桌，识别待清理的玻璃杯或马克杯，并在制定运动计划之前为每个物品确定合适的抓取点。

当前仍面临两大挑战：首先是检测和识别物体本身，其次是制定有效的抓取或与交互策略。现有解决方案虽然可行，但需要强大的算力，并且通常采用多个AI模型来处理物体检测、分类、跟踪和3D模型生成等子任务。

另一个常见的挑战是如何实现机器人感知自身位置和周围环境的传感器的同步和低时延。这对于飞行或腿足机器人尤其重要，因为视觉数据必须与来自陀螺仪和惯性测量单元（IMU）的输入相匹配。传感器的有效同步对于保持准确的态势感知和地图绘制至关重要。

例如，一个顶部安装有三个不同摄像头的四足机器人，它每走一步都会颠簸。其中一个摄像头可能是广角导航摄像头，而另一个可能是用于生成深度图的立体摄像头。如果没有精确的同步，尝试将立体摄像头生成的3D地图与广角视图对齐时将不可避免地出现位置误差，或者需要进行高成本的软件校正。由于这些功能与腿足机器人的运动规划直接相关，同步失败可能会导致机器人在障碍物或台阶上绊倒。



应对新任务的复杂性

随着机器人不再局限于高度专业化领域，它们需要具备与日益复杂的环境进行交互的能力。在最初阶段，这一转变体现在固定机械臂实现与工业现场总线系统的互操作性。起初，单个信号与传感器直接连接至机械臂控制器。但很快，厂商开始将机器人集成至总线系统，使其能够胜任更加复杂的工业装配或焊接任务。互操作性让机器人厂商吸引更广泛的客户群体，稳步降低成本并推动机器人应用的普及。

同样，如今用于厂内物流的移动机器人通过无线网络（通常使用Wi-Fi*或LTE）实现连接。对于大规模部署，多数厂商倾向于采用自定义机群管理协议，对接仓库管理系统（WMS）或制造执行系统（MES）。尽管已有尝试通过ROS2和MQTT等框架对机群编排进行标准化，但这些标准在实际应用中能否广泛落地仍未可知。

当移动机器人在工厂和仓库的预设环境之外运转、跳跃或飞行时，连接再次成为挑战。家用和酒店服务机器人预计将依赖本地连接基础设施（大概率是Wi-Fi，家用场景或许会扩展使用Matter协议）。与此同时，远程漫游机器人将需要全新的连接解决方案。

当机器人在与人类共享的空间中运行时，人机交互（HMI）的重要性日益凸显。面临的挑战包括：本地语音与视觉处理、任务场景中的手势解读（比如，指向需搬运的箱子或需避开的路径），以及权限判定（明确究竟由人类还是机器人来发出指令）。

结论和行动倡议

本白皮书所阐述的内容，仅代表近年来推动人形机器人快速发展的技术基础中的一小部分。本文作者对快速演进的移动机器人满怀热忱，而人形机器人只是其中的一种表现形式。希望读者能关注以下几个补充要点和尚待探讨的问题：

- 1.当前对人形机器人应用的预测主要集中在车间场景。
如前文所述，腿部结构仅在轮式机器人无法高效运作的环境中才具备实用价值。多数有足够预算引入人形机器人的现代工厂，已针对轮式机器人的顺畅运作进行了优化。因此，以人为中心的环境，如医院、家庭和餐厅，很可能成为人形机器人最先落地的场所。
- 2.尽管人形机器人常被视作机器人进化的巅峰形态，但在许多应用场景中，双足原型并不具备优势。举例来说，检查飞机机翼或船体内部等狭窄空间，更适合类似蜘蛛的机器人；而在崎岖地形中运送物资，则更适合四足机器人。开发多样化的机器人设计组合，灵活适配不同形态与应用场景，对于最大化实用价值与推广应用至关重要。
- 3.人们很容易将腿足机器人和人形机器人看作是“直立版”的软件定义汽车（SDV）。然而，这些机器人中的控制回路集成远比当前汽车所采用的系统复杂得多。维持平衡依赖于多个运动链，导致管理这些系统的难度大幅提升。尽管车辆架构的某些部分有望在机器人设计中复用，但设计者需关注新兴机器人架构中的结构性差异。

恩智浦深知下一波机器人创新浪潮是先进计算、传感、连接与AI融合的产物。人形机器人和自主系统不再受限于想象，而是推动着我们不断突破技术集成与适应性的边界。随着这些机器人在非结构化环境中的导航能力增强，能够更高效地与人类互动，并胜任多样化的任务，我们必须主动推动这一进程，让这个未来既触手可及又可持续发展。

我们致力于提供基础技术，包括高性能半导体、高效处理和先进的连接解决方案，赋能机器人工程师打造多功能、可靠且安全的系统，塑造未来世界。这不仅关乎技术本身，更是为了实现一个由机器人提升人类生活品质、保障安全、重塑行业并应对全球挑战的未来。

为加速实现这一愿景，我们诚邀广大合作伙伴、研究人员与创新者携手合作。无论您正在设计下一代自主机器人、研究AI驱动的运动规划，还是探索机器人在以人为中心的环境中的新应用场景，恩智浦都已准备好为您的探索之旅提供支持。

欢迎访问 nxp.com.cn/MobileRobotics 或联系我们的机器人团队，了解恩智浦如何助力将创意转化为突破性解决方案。

联系方式

主页: nxp.com.cn

网络支持: nxp.com.cn/support

美国/欧洲或未列明区域：

NXP Semiconductors USA, Inc.
Technical Information Center, EL516
2100 East Elliot Road
Tempe, Arizona 85284
+1-800-521-6274 或 +1-480-768-2130
nxp.com/support

欧洲、中东和非洲地区：

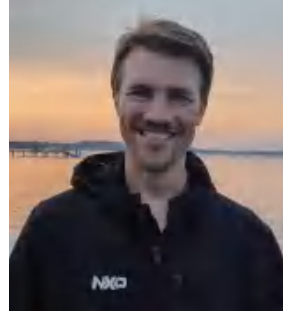
NXP Semiconductors Germany GmbH
Technical Information Center
Schatzbogen 7
81829 Muenchen, Germany
+44 1296 380 456 (英语)
+46 8 52200080 (英语)
+49 89 92103 559 (德语)
+33 1 69 35 48 48 (法语)
nxp.com/support

日本：

NXP Japan Ltd.
Yebisu Garden Place Tower 24F,
4-20-3, Ebisu, Shibuya-ku,
Tokyo 150-6024, Japan
0120 950 032 (国内免费电话)
nxp.com/jp/support

亚太地区：

恩智浦半导体香港有限公司
技术信息中心
香港新界大埔
大埔工业区
大景街 2 号
+800 2666 8080
support.asia@nxp.com



Nicolas Lehment
CTO-SBS-SI

工学博士Nicolas Lehment任职于恩智浦首席技术官 (CTO) 团队，负责协调研究活动，并针对工业、家用及商业应用场景中的机器人技术、机器学习/人工智能 (ML/AI)、功能安全及连接性等战略议题提供技术指导。加入恩智浦前，他曾为ABB和Smartray设计尖端计算机视觉与机器人系统。其研究成果覆盖 ML驱动的视频分类、人体姿态跟踪及协作机器人等领域，并因此获得慕尼黑工业大学博士学位。

nxp.com.cn

恩智浦和恩智浦标志是NXP B.V.的商标。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。© 2025 NXP B.V.
文档编号: MOBILEROBOTSWP REV 0

AI人工智能产业链联盟

#每日为你摘取最重要的商业新闻#

更新 · 更快 · 更精彩



Zero

AI音乐创作人

水墨动漫联盟创始人

百脑共创联合创始人

人工智能产业链联盟创始人

中关村人才协会秘书长助理

河北北大企业家分会秘书长

墨攻星辰智能科技有限公司CEO

河北清华发展研究院智能机器人中心线上负责人

中关村人才协会数字体育与电子竞技专委会秘书长助理



主要业务:AI商业化答疑及课程应用场景探索, 各类AI产品学习手册, 答疑及课程



欢迎扫码交流

提供: 学习手册/工具/资源链接/商业化案例/
行业报告/行业最新资讯及动态



人工智能产业链联盟创始人

邀请你加入星球, 一起学习

人工智能产业链联盟报 告库



星主: 人工智能产业链联盟创始人

每天仅需0.5元, 即可拥有以下福利!

每周更新各类机构的最新研究成果。立志将人工智能产业链联盟打造成市面上最全的AI研究资料库, 覆盖券商、产业公司、科研院所等...

知识星球

微信扫码加入星球 ▶

