

智能移动机器人最新发展状况及其未来趋势

【摘要】

关键词：人工智能、移动机器人、感知融合、自主导航、路径规划、发展趋势

一、人工智能与机器人

随着如今计算机和人工智能的发展，机器人的发展也迎来了前所未有的关注度。人工智能发展的动机就是希望机器能模仿人类的学习、思考、记忆和交流能力，其中机器学习的目的就是使机器模拟人类的学习行为。机器学习包括监督学习、非监督学习和增强学习三大类，介于监督学习和非监督学习之间还有弱监督学习。机器人在现实世界移动的过程良好地实践了机器学习的各种方法。由于环境的难以预测，机器人可以通过机器学习的方法，对环境输入做出处理与决策，以达到对环境的适应性。

人们通常把机器人划分为三代。第一代是可编程机器人。这种机器人一般可以根据操作人员所编的程序，完成一些简单的重复性操作。这一代机器人是从 60 年代后半叶开始投入实际使用的，目前在工业界已得到广泛应用。第二代是“感知机器人”，又叫做自适应机器人，它在第一代机器人的基础上发展起来的，能够具有不同程度的“感知”周围环境的能力。这类利用感知信息以改善机器人性能的研究开始于 70 年代初期，到 1982 年，美国通用汽车公司为其装配线上的机器人装配了视觉系统，宣告了感知机器人的诞生，在 80 年代得到了广泛应用。第三代机器人将具有识别、推理、规划和学习等智能机制，它可以把感知和行动智能化结合起来，因此能在非特定的环境下作业，称之为智能机器人。智能机器人与工业机器人的根本区别在于，智能机器人具有感知功能与识别、判断及规划功能。而感知本身，就是人类和动物所具有的低级智能。因此机器的智能分为两个层次：（1）具有感觉、识别、理解和判断功能；（2）具有总结经验和学习的功能。

近年来，作为机器人领域的一个重大分支，移动机器人已经随着机器学习的发展取得了较大的成果。机器人的研究，存在着两条不同的技术路线：一条是日本和瑞典所走的“需求牵引，技术驱动”，结合工业发展的需求，开发出一系列特定应用的机器人，从而形成了庞大的机器人产业；一条是把机器人作为研究人工智能的载体，即：单纯从技术上模仿人或动物的某些功能出发，研究有关智能的问题和智能机器人，如：美国、欧洲的一些大学及研究所进行的工作。由于人工智能和其他智能技术的发展尚落后于人们对它的希望，致使大部分研究成果处于实验阶段。移动机器人要想走向实用，必需拥有能胜任的运动系统、可靠的导航系统、精确的感知能力和具有既安全而又友好地与人一起工作的能力。移动机器人的智能指标为自主性、适应性和交互性。适应性是指机器人具有适应复杂工作环境的能力(主要通过学习)，不但能识别和测量周围的物体，还有理解周围环境和所要执行任务的能力，并做出正确的判断及操作和移动等能力。自主性是指机器人能根据工作任务和周围环境情况，自己确定工作步骤和工作方式。

除了移动机器人外，还有许多其他类型的机器人。例如拟人机器人、工业机器人、群体机器人甚至是纳米机器人。理想中的机器人是高度仿生的，在外貌和行为上可以代替人类或是其他生物，并且他们往往具有丰富的交互性。交互是智能产生的基础，交互包括机器人与环境、

机器人与人及机器人之间三种，主要涉及信息的获取、处理和理解。与传统的工业机器人相比，智能机器人在控制中需要有不断的通信和交互，这也是人工智能与机器人相结合的困难所在。

二、智能机器人的应用

作为智能的载体，移动机器人已经渗透到了所有领域。机器人可作为代替人类处理高难度或高危险性工作的工作，其应用场景十分丰富，如环境探测、建图、搬运、导航等，甚至是用作农业、航空、航海等工作。如苏联及美国等国家发射的火星探测车，是具有代表性的自主型移动机器人，拥有多类相机辅助其进行导航和避险；无人机应用与各种航空拍摄；水下机器人应用于水下拍摄；无人车应用于公共运输；农业机器人可代替人类进行农耕等。除此之外，智能机器人也出现于大众的生活当中，例如聊天机器人，玩具机器狗，做菜机器人、迎宾机器人和服务机器人等。机器人从传统的工业用途走向智能化是现代发展的一大趋势。

现代智能机器人基本能按人的指令完成比较复杂的工作，如深海探测、作战、侦察、搜集情报、抢险、服务等工作，模拟完成人类不能或不愿完成的任务，不仅能自主完成工作，而且能与人共同协作完成任务或在人的指导下完成任务，在不同领域有着广泛的应用。智能机器人按照工作场所的不同，可以分为管道、水下、空中、地面机器人等。管道机器人可以用来检测管道使用过程中的破裂、腐蚀和焊缝质量情况，在恶劣环境下承担管道的清扫、喷涂、焊接、内部抛光等维护工作，对地下管道进行修复；水下机器人可以用于进行海洋科学研究、海上石油开发、海底矿藏勘探、海底打捞救生等；空中机器人可以用于通信、气象、灾害监测、农业、地质、交通、广播电视等方面；服务机器人半自主或全自主工作、为人类提供服务，其中医用机器人具有良好的应用前景；仿人机器人的形状与人类类似，具有移动功能、操作功能、感知功能、记忆和自治能力，能够实现友好的人机交互；微型机器人以纳米技术为基础在生物工程、医学工程、微型机电系统、光学、超精密加工及测量（如扫描隧道显微镜）等方面具有广阔的应用前景。在国防领域中，军用智能机器人得到前所未有的重视和发展。近年来，美英等国研制出第二代军用智能机器人，其特点是采用自主控制方式，能完成侦察、作战和后勤支援等任务，在战场上具有看、嗅等能力，能够自动跟踪地形和选择道路，具有自动搜索、识别和消灭敌方目标的功能。在未来的军事智能机器人中，还会有智能战斗机器人、智能侦察机器人、智能警戒机器人、智能工兵机器人、智能运输机器人等，成为国防装备中新的亮点。无人作战飞行器（UCAVs），是无人机的升级形式，可以完成各种任务，包括战斗。无人战斗机有自主飞行，自主挑选航线和目标，并且有自主做大部分决策的能力。BAE雷神是由英国研发的一种无人作战飞行器，可以不用飞行员跨大洲飞行，并且有新的手段以逃避侦查。在服务工作方面，世界各国尤其是西方发达国家都在致力于研究开发和广泛应用服务智能机器人，“服务机器人”这个词不太明确。国际机器人联合会给出了一个初步的定义，“服务机器人是指这样一类机器人，其通过半自主或完全自主运作，为监护人类健康或监控设备运行状态提供有帮助的服务，但不包含工业性操作。”以清洁机器人为例，随着科学技术的进步和社会的发展，人们希望更多地从繁琐的日常事务中解脱出来，这就使得清洁机器人进入家庭成为可能。日本公司研制的地面清扫机器人，可沿墙壁从任何一个位置自动启动，利用不断旋转的刷子将废弃物扫入自带容器中；车站地面擦洗机器人工作时一面将清洗液喷洒到地面上，一面用旋转刷不停地擦洗地面，并将脏水吸入所带的容器中；工厂的自动清扫机器人可用于各种工厂的清扫工作。

三、智能机器人的关键技术与难点

机器人是多学科交叉的产物，集成了运动学与动力学、机械设计与制造、计算机硬件与软件、控制与传感器、模式识别与人工智能等学科领域的先进理论与技术。同时，它又是一类典型的自动化机器，是专用自动机器、数控机器的延伸与发展。智能机器人主要有以下几个模块：（1）感知、（2）决策、（3）执行。

在感知模块中，多传感器的信息融合是一大热门课题。信息融合是指将多个传感器所提供的的环境信息进行集成处理，形成对外部环境的统一表示。它融合了信息的互补性，信息的冗余性，信息的实时性和信息的低成本性。因而能比较完整地，精确地反映环境特征，从而做出正确的判断和决策，保证了机器人系统快速性，准确性和稳定性。环境拥有大量不同类型的数据，随着传感器的发展日臻完善，多传感器的融合可以使机器人对环境的探测精度提高。传感器可广义地分为内部传感与外部传感。对于机器人内部的测量主要是针对其组件的位置、速度、角度、加速度等参数。对外部信息的测量主要包括视觉图像、距离、压力、温度和外部相对位置的测量等。具体对于智能机器人而言，其感知系统包括视、听、触、嗅觉和本身的运动感知。目前移动机器人的多传感器融合技术的研究方法主要有：加权平均法，卡尔曼滤波，贝叶斯估计，D-S 证据理论推理，产生规则，模糊逻辑，人工神经网络等。

导航技术是移动机器人的一项核心技术之一。它是指移动机器人通过传感器感知环境信息和自身状态，实现在有障碍的环境中面向目标的自主运动。目前，移动机器人主要的导航方式包括：磁导航，惯性导航，GPS 导航，环境地图模型匹配导航，路标导航，视觉导航，味道导航，声音导航，神经网络导航等。磁导航是机器人导航技术中比较成熟的技术，目前已广泛应用于制造工业领域。磁导航主要原理是在路径上埋设电缆，当电流通过电缆时会产生磁场，通过电磁传感器，对磁场的检测来感知路径信息，从而实现机器人的导航。该方法优点是抗干扰能力强，技术简单，实用，缺点是成本高，可变性、可维护性较差。惯性导航是使用陀螺仪和加速度计分别测量移动机器人的方位角和加速率，从而确定当前的位置，根据已知地图路线，来控制移动机器人的运动方向以实现自主导航。惯性导航的优点是不需要外部参考，缺点是它具有误差累加，不适合长时间精确定位。GPS 导航是一种以空间卫星为基础的高精度导航系统，适合室外全局导航与定位，但是它存在信号障碍，多径干扰等缺点。因而在实际中，它一般都结合其它导航技术一起工作。环境地图匹配导航是机器人利用传感器感知周围环境信息，然后构造局部地图，并与其内部事先存储的完整地图进行匹配，以确定自身位置，并根据预先规划的一条全局路线，采用路径跟踪和避障技术，实现自主导航。它一般要涉及到地图构造和地图匹配两大问题。路标导航就是移动机器人利用传感器输入信息来识别出环境中特殊标记，以实现导航和定位。根据路标不同，可分为自然路标导航和人工路标导航。自然路标导航是机器人根据对工作环境中的自然特征的识别实现导航。优点是不改变工作环境，且方法灵活，但路标探测的准确性和鲁棒性是研究的主要问题。人工路标导航是机器人识别认为放置的特殊标志实现导航。该方法优点是易于实现，且稳定性较好，但是它认为改变了机器人工作环境。视觉导航主要是通过摄像头对障碍物和路标信息拍摄，获取图像信息，然后对图像信息进行探测和识别实现导航。它具有信号探测范围广，获取信息完整等优点，是移动机器人导航的一个主要发展方向。但是视觉导航的边缘锐化，特征提取等图像处理方法计算量大，实时性差始终是一个瓶颈问题。解决该问题的关键是设计一个更加快速优化的图像处理算法，用硬件或并行运算来实现图像处理，从而解决视觉导航实时性问题。味觉导航是通过化学传感器感知气味的浓度和气流的方向实现机器人的定位和导航。由于气味传感器具有灵敏度高，响应速度快以及鲁棒性好等优点，因而它可以用于移动机器

人搜索空气污染源或找出不合格的化学药品等。目前尽管味觉导航技术不成熟，大多处于实验阶段，但它具有很好的应用前景和研究价值。声音导航一般应用于光线很暗或物体不在视野范围内时，视觉导航方式失效的场合。与视觉导航相比，声音导航具有无方向性，时间分辨率高，能在黑暗中工作等优点，缺点是空间分辨率低。神经网络导航是一种仿效生物神经系统的智能导航方法。它具有自适应和学习能力，不足是神经网络学习训练需要一定时间，实时性始终是问题。

移动机器人的定位与地图构建已经有了一些实用的解决方法，然而在很多环境中机器人不能利用全局定位系统进行定位，而且事先获取机器人工作环境的地图很困难，甚至是不可能。这时机器人需要在自身位置不确定的条件下，在完全未知环境中创建地图，同时利用地图进行自主定位和导航。这就是移动机器人的同时定位与地图创建（SLAM）问题。在 SLAM 问题上，有以下几个难点：（1）需要进行计算机器人位姿和环境中的特征标志的位置，这就形成了超多维的数学问题。（2）需要进行对特征标志和观测值进行匹配，数据关联的复杂度和标志的个数成指数关系，搜索空间与环境的复杂程度以及机器人的定位误差有关，计算量大。

（3）观测误差、里程计误差和数据关联误差三个方面互相影响，每次观测的位置误差趋向于观测误差与特征标志的位置误差之和。然而在 SLAM 中，由于机器人的位置和环境中的特征标志的位置都是未知的，观测信息不能有效纠正里程计的误差，机器人的位置误差随着机器人的运动距离而增大。而机器人的位置误差的增大将导致错误的数据关联，从而增大特征标志的位置误差；反过来，特征标志的误差又将增大机器人的位置误差。因此，机器人的位置误差与特征标志的位置误差密切相关。它们之间的相互影响使机器人和特征标志的位置估计产生累计误差，难以保证地图的一致性。至此，近年来机器人领域的研究者对 SLAM 进行了大量的研究，特别是在降低计算复杂度、提高鲁棒性等方面取得了很大的进展。实现方法如下：（1）基于卡尔曼滤波器，包括系统状态预测和更新两步，同事还需要进行地图信息的管理，增删特征标志。实际的机器人运动和观测模型是非线性的，因此通常采用拓展卡尔曼滤波器（Extended Kalman Filter），通过一阶泰勒展开来近似表示非线性模型。卡尔曼滤波器已经成为实现 SLAM 的基本方法。其协方差矩阵包含了机器人的位置和地图的不确定信息。当机器人连续地观测环境中的特征标志时，协方差矩阵的任何子矩阵的行列式呈单调递减。从理论上讲，当观测次数趋向于无穷时，每个特征标志的协方差只与机器人起始位置的协方差有关。卡尔曼滤波器的时间复杂度是 $O(n^3)$ ，由于每一时刻机器人只能观测到少数的几个特征标志，基于卡尔曼滤波器的 SLAM 的时间复杂度可以优化为 $O(n^2)$ ， n 表示地图中的特征标志数。其他降低 SLAM 时间复杂度的方法有局部子地图法、去相关法、分解法等。其中，FastSLAM 方法将 SLAM 分解为机器人定位和特征标志位置估计两个过程，使用粒子滤波器（Particle Filter）代表机器人的一条可能运动路径，利用观测值计算粒子权重。对于每个粒子来说，机器人的运动路径是确定的，因此特征标志之间相互独立，特征标志的观测信息只与机器人的位姿有关，每个粒子可以采用 n 个卡尔曼滤波器分别估计地图中 n 个特征的位置。假设需要 k 个粒子实现 SLAM，则 FastSLAM 的时间复杂度为 $O(kn)$ ，通过利用树型的数据结构进行优化，其时间复杂度可以达到 $O(k \log n)$ 。FastSLAM 方法的另一个主要优点是采用粒子滤波器估计机器人的位姿，可以很好地表示机器人的非线性、非高斯运动模型。为了增强系统的鲁棒性，还可以使用多机器人协作。

在完成定位与建图后，需要进行路径规划，按照某一性能指标搜索一条从起点到目标点的最优或次最优的无碰路径。全局路径规划常用方法有：可视图法，栅格法，自由空间法等。（1）可视图法是将机器人看作一个点，把机器人，目标点和障碍物各顶点进行连线，要求机器人和障碍物顶点之间，目标点和障碍物各顶点之间，以及各障碍物顶点与顶点之间的连线均不

能穿越障碍物。利用优化算法删除一些不必要的连线以简化可视图，缩短搜索时间。(2) 栅格法是将机器人工作环境分解为一系列具有二值信息的网格单元，每个栅格有一个累积值，表示在此方位中存在障碍物的可信度。一般通过优化算法完成路径搜索，常用的路径搜索算法有：A*算法，遗传算法等。(3) 自由空间法采用预先定义的如广义锥形和凸多边形等基本形状构造自由空间，并将自由空间表示为连通图，通过搜索连通图来进行路径规划。该方法的优点是灵活，起始点和目标点的改变不会造成连通图重构，但算法的复杂度与障碍物的多少成正比，且不是任何情况下都能获得最优路径。此外，局部路径规划算法有人工势场法、遗传算法、神经网络法等。

四、机器人发展趋势预测

日本工业机器人协会对下一代机器人的发展进行了预测，提出智能机器人技术近期将沿着自主性、智能通信和适应性三个方向发展。(1) 自主化。机器人从被操纵作业向自主学习、自主作业方向发展。(2) 信息化。机器人从被单向控制向自己存储、自己应用数据方向发展，像计算机、手机一样替代其它设备成为信息终端。(3) 网络化。机器人从独立个体向相互联网、协同合作方向发展。以前机器人应用的主要领域是汽车、电子制造产业等，未来机器人将更多地应用于食品、化妆品、医药等产业，以及更广泛的制造领域、服务领域和中小企业。为此，未来要研发体积更小、应用更广泛、性价比较高的机器人。在机器人现有应用领域，要发展能够满足柔性制造的频繁切换工作部件简便的机器人。机器人供应商、系统集成商和用户之间的关系要重新调整。研制世界领先的自主化、信息化和网络化的机器人。机器人概念将发生变化。以往机器人要具备传感器、智能控制系统、驱动系统等三个要素，未来机器人可能仅有基于人工智能技术的智能控制系统。