

智能巡检机器人在公共管廊工程中的运用研究

宋鑫¹ 刘全²

1. 连云港港口控股集团徐圩有限公司 江苏连云港 222000

2. 江苏筑港建设集团有限公司 江苏连云港 222000

摘要:随着城镇化建设的发展,城市公共管廊日益成为城市重要的基础设施,其建设及维护对保障城市建设的安全至关重要,然而传统人工检查方式存在风险高、工作效率低等问题。为此,具备自主功能、执行力强、实时响应的智能巡检机器人成为解决该问题的有效工具。本文提出了智能巡检机器人在公共管廊工程中的应用思路,并对其在复杂环境下的技术难点,即适应能力、导航定位系统、操作精确度及稳定性以及人机协作效果等进行了较为详细的阐述,对其出现的问题提出了解决策略,如提高其环境适应能力、提升导航算法性能、改进控制体系结构、强化机器人应急响应能力等,为其能够被广泛应用于公共管廊领域提供了方法和科技基础。

关键词:智能巡检机器人;自动化巡检;导航定位;数据融合

引言

公共管廊是城市基础设施建设中承担着供水、电力、通讯等一系列功能的重要组成部分,但随着管廊系统的日益增长,对管廊巡查、维修服务也有了更高需求。面对传统的人工操作方法会有效率低、操作困难和具有危险性等特点,而智能巡检机器人替代传统巡检方式提出了“利用各种传感器、自主定位导航技术和智能化算法,完成具有高效和高安全性要求的巡检”的新方案。随着技术的不断更新,智能巡检机器人也成为了管廊管理的主要方式之一。本文主要研究了智能巡检机器人在公共管廊中的应用以及对机器人环境适应能力、导航定位、机器操控等方面存在的问题进行分析,提出了对应的解决方案,从而实现未来公共管廊更高效、自动化的巡检方式。

一、智能巡检机器人和公共管廊工程的概述

(一) 智能巡检机器人概述

智能巡检机器人是一种由多种传感器、控制系统、导航技术、智能决策规则组成的高级自动装置,能够在环境恶劣、危险或不适合人类作业的工作环境中自主完

成巡检工作,具备对环境的理解能力、信息收集能力、能识别感知和分析异常情况和路线规划等功能。它主要借助各个传感器(包括光学雷达、热像仪、气体探测装置等)对周边信息进行持续收集,根据收集的周边信息进行归纳、分析,并做出决策进行行动,这一过程是依靠人工智能技术和控制理念而存在的,具有自主导向、问题发现、适性调整的功能。智能巡检机器人已经广泛应用于工厂、城市基础设施、矿产等行业,在特定的管道网络等环境具有巨大的应用潜力。

(二) 公共管廊工程概述

公共管廊是城市重要基础设施之一,通常埋藏于地下,承担着整合和管理城市命脉般的供排水、电力、通讯、天然气等管道的职能。伴随城市化的发展,公共管廊规模不断增大,对巡查、维护和监测的需求也越来越高。由于其特殊的结构、环境条件,如空间狭小、水分大、温差变化大、存在有毒气体等,传统的纯人力模式存在极高的作业安全风险以及效率低下的问题。

智能化巡查机器人依靠科学技术的进步,在对管廊的维护上取得了至关重要的作用,能够实现自动化且精准、实时的巡查行为,对于高风险的人力巡查行为造成一定的人身安全危害进行了控制,从而使管廊维护工作带来了管理效益的提升。在公众管廊的巡查过程中,该机器人具备巡查管廊管道损坏的功能,能快速自动查找出管道锈蚀或者破损、渗漏问题,并将数据反馈,为管廊正常运转提供了数据支持。

作者简介:

1. 宋鑫(1991.08--),男,汉族,江苏连云港人,本科,研究方向:工程管理与技术;
2. 刘全(1983.07--),男,汉族,江苏连云港人,本科,研究方向:工程管理与技术。

二、智能巡检机器人在公共管廊工程中运用中面临的问题

(一) 环境条件复杂

管廊是城市重要的地下基础设施之一，且多在潮湿、照明不足、空间狭小的环境中开展作业，这对于机器人完成管廊巡检工作具有一定的挑战性。管廊内部一般较为狭小，影响机器人活动范围，特别是在管道、设施、支架等障碍物多的地方，极易发生撞击或卡壳现象，减缓巡检速度，影响巡检效率。这里经常处于潮湿、含水较高的环境中，容易影响机器人的电器器件运行准确度，进而增加设备损坏的风险。管廊内还可能存在着腐蚀性气体或有毒气体，影响机器人及其巡检人员人身安全，同时会对检测器工作稳定性造成干扰。机器人在不同复杂的工作环境下，需要通过提高高效感测器，并加强其结构化手段来应对解决这类难题。还有机器人运行系统也需要十分灵敏稳定，在小空间内良好活动，不能受卡住或碰撞而造成损伤。

(二) 导航与定位技术的局限性

巡检机器人要在复杂环境中高效率地完成任务，依赖于它的导航、定位能力。传统的定位方法，如GPS，不能简单应用，巡检机器人需要更加高阶的定位和导航技术，如激光雷达（LiDAR）、视觉SLAM、惯导系统（INS）等。但这些技术会受到地下环境的很大限制。激光雷达技术虽然可以提供高精度的三维环境信息，但是对于像金属管道等、平面的墙壁等特殊情况下，其回波效果较差，会出现信息缺失或是定位错误。在管廊应用上，图像SLAM技术影像受到弱光或是狭窄地区影响，进而影响建图定位精度。虽然惯导（INS）可以实时更新位置信息，但是误差会随时间的积累不断放大，因此通常要和其他定位手段结合使用。为了避免以上的局限性，可以采用多传感器融合的技术，通过激光雷达、视觉SLAM以及惯性导航技术本身的特性来弥补其他传感器的不足，从而实现更加精确的定位导航。

(三) 机器人控制系统精度不足与运动系统稳定性不高

机器人的操纵性对在复杂多变管道走廊场景中能够做到平稳运动和任务的顺利实施有极为重要的意义。但管道地面高低不平且存在其他因素的潜在干扰使得机器人也存在难以保证正常运行的问题，尤其是上坡、遇障碍物时，对机器人的稳定性和操纵准确性要求更高。精度不高的机器人控制系统会改变移动路径导致与预定路径偏离，这就会使检测的时间与质量受到非常负面的影响。同时其本身运作过程出现晃动或不稳定状态，在窄

通道或复杂的管道内很可能会影响其工作或引起故障。为使动作稳定性得到保证，需要为机器人安装相对精度较高的动作控制机制，例如使用动态姿态控制作为当前或实时的动作调控机制调节机器人姿态、速度。

(四) 人机协作效率低并存在高危风险

智能巡查机器人虽然可以在部分条件下完成自主巡查功能，但仍需要人工巡检员参与处理难度较大问题和系统故障。例如在遇到复杂场景或者系统发生故障的时候，需要人工巡查员参与并进行相关操作。但这种人机交互模式在公共区域管道这样危险的区域内应用会大大增加安全隐患，因为机器人和人可能处于同一个狭小空间内，那么就会提高两者产生碰撞或相互作用的风险，影响工作效率和安全。同时，机器人的智能化程度和自主性目前还很低，这意味着人工巡查员还必须持续监控机器人工作状况，通过人为干预或者给予指令执行。这会导致人机协同工作速率降低，无法充分运用其自动化的优势。如何对机器人和人之间采取高效工作方式以尽量降低风险也是智能巡视机器人技术所面临的难题之一。

三、智能巡检机器人在公共管廊工程运用中的策略

(一) 提升性能加强环境适应能力

加强智能巡检机器人的环境适应性是改进智能巡检机器人在公共管廊中应用效果的关键。机器人需要具备足够强的抗干扰能力和适应性来应对复杂、恶劣的工作环境，从而确保高效工作，实现长周期高强度的任务。可通过各类融合传感器进行信息整合处理，像激光雷达、红外探测仪、温度/湿度传感器和气体传感器等设备，对周围环境信息有更为详细的了解，可以提升应对有毒有害气体、气候变化等因素的能力。机器人硬件设计应选用防干扰的材料与保护结构设计，如外壳采用耐腐蚀等材质以抵御机器人运行过程中管廊内化学侵蚀物质侵害，同时机器人需要具有一定的密封性，防止潮湿和积尘等对内部元件的损坏。机器人要有适应性控制功能，即随着工作环境条件的变化，能自动调控工作方式和控制的方法。当遇到潮湿环境时，机器人可依据感知到的湿度值来自主调节轮速或行进方式，以减少因潮湿导致的不稳定性运动。通过以上方法，可以增强智能巡检机器人适应公共管廊特殊环境的性能，来保证巡检任务的正常、稳定进行。

(二) 优化导航算法与引入高精度定位技术

作为公共管廊巡检的机器人，其在复杂的公共管廊环境下，导航定位精度是顺利完成巡检任务的关键。所以要优化导航算法并引入高精度定位技术。可将视觉SLAM和激光SLAM结合起来使用，视觉SLAM和激光SLAM各有优势，视觉SLAM在识别人物障碍物和定位上

有比较高的效率，而激光SLAM在测量距离上有较高的精确度。此种组合能够使得在使用GPS困难的地下管道区域提供高度定位精度且较为稳定的位置服务。达到此种效果的方法包括使用加权平均或是卡尔曼滤波算法，优化处理视觉和激光定位数据，可用如下公式表示：

$$X_{fused} = \alpha \cdot X_{LIDAR} + (1 - \alpha) \cdot X_{VisualSLAM} \quad (1)$$

其中， X_{fused} 表示融合后的位置信息， X_{LIDAR} 和 $X_{VisualSLAM}$ 表示激光和视觉SLAM得到的预计位置， α 表示权重系数。

还可引入高精度IMU、传感器融合处理的技术，虽然IMU可以给用户实时提供速度和位置变化信息，但会有累积误差。通过与激光雷达、视觉SLAM、地面摄像头等传感器数据相结合，有效修正IMU漂移现象，提高定位精度。卡尔曼滤波器是常用的一种融合方法，经过预测与更新可实现多传感器数据综合处理，降低了定位误差的发生。基于随机采样的非线性滤波算法，可针对非高斯噪声和复杂环境实现高精度定位。在公共管廊作业环境中，粒子滤波算法可以有效改善定位系统的非线性特性，提高机器人作业的可靠性和准确性。通过以上科技的应用，未来智能巡检机器人的巡检任务有可能在公共场所实现更高精准定位导航，降低因定位错误而导致的巡检任务失败或发生碰撞的可能。

(三) 改进机器人结构与动态稳定性控制算法

对智能巡检机器人增加结构和运动控制上的改进，尤其是对于在狭窄空间、不平整的地面等恶劣环境下机器人的稳定性尤为重要。从外形设计上考虑，将机器人设计为模块化结构，可以根据作业需求进行变形，如能够伸缩的机器人手、可更换为轮子或者履带的移动底座，以适应各种环境条件。采用软质材料以及可伸缩部件将使机器人在管网中较曲折位置内穿行更加容易。在移动中，巡检机器人有可能在地形复杂、有限的空间中出现失稳现象。为了更好地控制机器人移动的稳定性，需要引入滑模控制（SMC）、模型预测控制（MPC）等动态稳定性控制方法进行控制，它们可以实时对机器人的运动路径和力矩进行调整，以避免失稳现象。可用以下公式表示：

$$\tau = K_{SMC} \cdot (X_{desired} - X_{current}) \quad (2)$$

其中， τ 表示控制输入， K_{SMC} 表示为滑模控制的增益矩阵， $X_{desired}$ 表示期望位置， $X_{current}$ 表示当前机器人状态。在复杂的工况中，机器人还可能受到振动或不平坦表面的干扰，利用自适应控制算法，可以实时识别这些干扰并对干扰进行一定的补偿，降低振动对机器人运

行的影响。

(四) 升级智能监控系统与强化机器人应急处理能力

要让智能巡检机器人有更高的监测能力和紧急处理能力，尤其是在一些故障或者突发事件中，能够第一时间做出反应保证任务的成功完成。机器人需要有更智能化的传感器系统，从而全面监测如电池电量、传感器工作的状态、运动部件的动力源等机器人各部件的运行状况。在监测到任何故障或性能下降时，开始智能分析，并向用户发出故障警告从而实现远程处理。

面对突发状况时，机器人必须迅速反应，敏捷躲避障碍物。借助深度学习技术中的视觉感知模块和实时避障算法，使机器人可以自主辨识出阻碍物体，并可以选择合适的路线躲避。同时要具备紧急停止和自我修复的功能，减少因设备问题导致巡检任务被打断。还要实现紧急情况下的远程协同，自身需具备接受操作者远程指令的能力，提升其反应速度和精度，采用图像实时传输和监测信息手段使操作人员能够及时介入并排除突发问题。

结语

伴随着城市化进程的不断推进，对公共管廊工程中的管理日趋迫切。智能巡检机器人自主化、高效化等优势代替了人工效率低的公共管廊巡检形式。但机器人在实际应用过程中还存在适应性、精准导航和系统稳定等技术问题。本文归纳了智能巡检机器人的工作原理，并从提升适应性、优化导航算法和强化紧急应对能力等方面，扩展其在开放区域的应用。但智能巡检机器人在公共管廊中的广泛运用还需要进一步的技术改进，在未来的发展中随着科技的进步，智能巡检机器人将更好地服务于公共管廊的高效和安全管理中。

参考文献

- [1] 腾云, 陈双, 邓洁清, 等. 智能巡检机器人系统在苏通 GIL 综合管廊工程中的应用 [J]. 高电压技术, 2021 (2): 9.
- [2] 高著海, 雷铭, 朱玲芬, 等. 巡检机器人在综合管廊智慧化上的应用 [J]. 中国建设信息化, 2024 (18): 54-57.
- [3] 李欢. 智能巡检机器人在综合管廊中的应用 [J]. 建材与装饰, 2020 (17): 2.
- [4] 季绍诗, 陈峰, 杜毅威. 巡检机器人在综合管廊的设计与应用 [J]. 建筑电气, 2021, 040 (011): 16-19.
- [5] 刘学功. 巡检机器人在综合管廊中的应用初探 [J]. 智能建筑, 2022 (6): 5.