

摘要

随着数字经济的快速发展,我国的“数字中国”建设也在如火如荼高速推进。构建数字经济、数字中国的一个核心底盘是将基础设施数字化。它包含两个含义:第一是将真实物理世界进行数字化复刻,实现城市基础设施的数字孪生;第二是采用无人机、机器人等智能化平台实现与城市基础设施的数字化交互,代替人工执行高危险性、高重复性的工作。数字孪生的实现离不开对三维空间精确、快速的感知与数据采集。小型多旋翼无人机因其在三维空间机动灵活的特性而成为三维感知和数据采集得天独厚的平台。比如,小型多旋翼无人机在一个尚未建图的建筑群区域起飞,如何以最快的速度感知三维场景,自主探索得出三维空间的基础稠密地图,并快速准确地采集建筑群的图像数据,最终通过三维重建绘制出一个完整的高精度三维实景模型,实现对该区域的三维高精度重建,为后期的数字孪生交互提供数字基础设施。也可以直接将采集到的图像数据结合关键点位信息直接生成巡检报告。上述问题越来越成为研究的重点。

真实三维空间环境复杂多变,小型多旋翼无人机载重量小、续航时间较短而且搭载的算力受限。如何提高多旋翼的三维感知能力,在有限的时间内提高它们进行三维场景探索的效率,最终高效采集到能够最优覆盖场景的图像数据成为核心挑战。针对这一挑战,本文首先搭建了多旋翼无人机及其自动机场的全自主飞行系统,并采用前馈控制理论优化了多旋翼无人机飞行的稳定性。面向这一系统,本文从多旋翼无人机三维全向深度感知展开研究,提出一种快速全向立体视觉深度感知算法,将它运用起来探索三维空间场景。基于此,本文进一步提出一种大规模三维空间探索的分层规划算法高效构建三维场景初步的稠密地图,最后通过最佳覆盖视点生成及多视角协同三维扫描路径规划算法,实现对三维场景的数据采集。本文的主要创新点包括:

第一,提出并搭建多旋翼无人机及其自动机场系统,为全向立体视觉深度感知算法的研究提供系统平台,为三维空间探索提供稳定的飞行平台,为多视角协同三维扫描提供多无人机自主起降与自动换电平台。

第二,提出一种快速全向立体视觉深度感知算法,用于解决多旋翼无人机对三维空间场景的深度信息感知视场角狭窄的问题,为三维空间探索与三维扫描提供快速、精确的全向深度感知能力。基于鱼眼球形摄像机特性,建立鱼眼相机空间最佳匹配模型,设计一个卷积神经网络模型,实现全向深度感知。在多个数据集上的实验结果表明,该算法比当前最好方法在深度感知误差上平均降低了 3%,并能够在嵌入式 GPU 平台上达到 25FPS 的性能。

第三,提出一种适用于大规模三维空间探索的路径分层规划算法,用于解决大规模三维空间探索完整性低和效率低下的问题。该算法根据全向深度感知的距离,分为顶层全局、中间层局部和底层运动学三层实现三维路径规划,高效完成大规模三维空间的探索与初步稠密地图的构建。在多个仿真场景与真实场景的实验表明,该方法不论在探索完整性、探索效率还是全局能量损耗上均优于当前最好方法,平均提升了 2-3 倍的性能。

第四,提出一种多视角协同三维扫描路径规划算法,实现高精度三维重建或巡检数据的高效采集。对三维空间场景的最优覆盖进行建模,提出基于包络法向筛选的目标覆盖视点生成算法,获得必要的视点信息,结合多旋翼无人机

动力学特性进行视点排序与路径规划，最终通过最优质量传输实现多无人机协同作业，实现多视角并行三维扫描的高效数据采集。在仿真测试集中将重建结果与基准模型进行对比实验，证明了该方法的有效性。在真实大规模建筑群场景中进行实际三维扫描实验，将采集到的数据输入到三维重建软件中进行重建和测评，实验结果表明，通过本文三维扫描路径规划算法采集到的数据，其三维重建结果在模型精度和完整性上与传统方法相比提高了 10%。

第五，将本文提出的面向多旋翼无人机的三维感知与数据采集方法应用到电力巡检中，结合三维空间探索建立的稠密地图对输电线路进行精细化三维数据采集与重建，结合电力目标的关键特征进行三维语义分割，构建语义高精度三维地图，并据此提出一种基于语义信息的三维路径规划方法，实现高效的电力目标物巡检与缺陷筛查。与传统方法在真实巡检中进行对比实验表明，本方法在巡检精度上得到了显著提升，使目标命中率提高了 3 倍。

综上所述，本文专注在面向多旋翼无人机的三维感知与数据采集方法研究，所提方法在仿真场景和真实场景均取得了显著的性能提升。

关键词：多旋翼无人机，三维感知，全向立体视觉，三维空间探索，路径规划