

移动柔性扫描机器人综合实验平台研制

许丽^{1,2}, 范崇山¹, 王鸿鹏^{1,2}, 刘景泰^{1,2}

(1. 南开大学 人工智能学院, 天津 300350; 2. 南开大学 虚拟仿真实验教学中心, 天津 300350)

摘要: 为了更好地开展研究探索性实验, 培养机器人相关专业学生解决复杂问题的工程实践能力, 设计开发了一种移动柔性扫描机器人实验平台。文章阐述了该实验平台的硬件结构和软件设计, 并进行了运动学建模分析。依托该实验平台, 学生可以开展运动控制、路径规划、三维重建等实验任务, 进行控制算法和数据融合算法的验证与创新。该实验平台灵活性、适应性强, 可激发学生的学习兴趣, 具有一定的推广价值。

关键词: 实验平台; 机器人; 三维扫描; 运动学建模

中图分类号: G642.0; TP242 文献标识码: A 文章编号: 1002-4956(2022)08-0137-04

Development of comprehensive experimental platform for mobile flexible scanning robot

XU Li^{1,2}, FAN Chongshan¹, WANG Hongpeng^{1,2}, LIU Jingtai^{1,2}

(1. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Virtual Simulation Experimental Teaching Center, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to better carry out research and exploratory experiments and cultivate the engineering practice ability of robot related majors to solve complex problems, a mobile flexible scanning robot experimental platform is designed and developed. This paper describes the hardware structure and software design of the experimental platform, and carries out kinematic modeling and analysis. Relying on the experimental platform, students can carry out experimental tasks such as motion control, path planning and three-dimensional reconstruction, and verify and innovate control algorithms and data fusion algorithms. The experimental platform is flexible and adaptable, can stimulate students' interest in learning, and has certain promotion value.

Key words: experimental platform; robot; three-dimensional scanning; kinematic model

近年来, 机器人技术迅速发展, 对专业人才的实践能力要求越来越高^[1], 但高校相关的实验教学环节相对薄弱^[2], 实验平台功能单一、程序固化、开放度低, 实时性与可观测性不强^[3-4]。学生大多仅能在简单场景下进行智能体或机器人的控制实验, 难以开展复杂、实时的智能化实验任务。

针对以上问题, 以移动机器人、柔性操作臂和三维扫描仪三种典型设备为基础, 创新融合设计了一种移动柔性扫描机器人综合性实验设备。与目前市场上类似产品多采用移动机器人平台、串联机械臂和工业

相机相比, 本实验平台需要进行异构多机器人平台联合建模, 并以移动机器人为基础坐标系, 传递至机械臂和双目视觉扫描仪, 再根据视觉投影原理得到被测对象的位姿, 能够实现自主规划、自主移动、三维点云与彩色纹理精准绘制等功能, 支撑机器人建模、运动控制、路径规划、三维重建等多重实验任务。该实验平台有助于推动学生自主设计实验方案, 探索控制算法, 提高解决复杂工程问题的能力^[5], 也是自制实验教学仪器设备在高校创新人才培养和学科建设等方面发挥作用的很好事例^[6]。

收稿日期: 2022-02-21

基金项目: 天津市科技重大专项 (18ZXZNGX00340); 天津市教学成果奖重点培养项目 (PYGJ-023)

作者简介: 许丽 (1987—), 女, 内蒙古通辽, 硕士, 实验师, 研究方向为虚拟仿真技术, xuli@nankai.edu.cn。

通信作者: 王鸿鹏 (1979—), 男, 山西晋中, 博士, 副教授, 研究方向为人工智能与智能机器人技术, hpwang@nankai.edu.cn。

引文格式: 许丽, 范崇山, 王鸿鹏, 等. 移动柔性扫描机器人综合实验平台研制[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(8): 137-140.

Cite this article: XU L, FAN C S, WANG H P, et al. Development of comprehensive experimental platform for mobile flexible scanning robot[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(8): 137-140. (in Chinese)

1 实验平台总体设计

1.1 实验平台功能设计

移动柔性扫描机器人综合实验平台集成了机器人控制、规划和感知功能,可伸展移动至难以扫描的地方,实现对复杂目标进行自动化扫描和自动拼接功能,完成数据融合、三维重建等任务,可获得大量高精度的实验数据,用于数据分析和对比。

1.2 实验平台硬件结构

如图 1 所示,实验平台中的移动平台模块选用差速两轮驱动移动底盘。该移动底盘配备完善的机器人操作系统开发功能,易于研究实现。底盘上方装载的柔性六轴机械臂及其控制机柜,共同构成移动机器人抓持平台,提供三维空间移动能力。在机械臂的末端固定三维扫描仪,在最大限度地保证对物体多角度数据采集的同时,具有移动性强、扫描空间大、自动化程度高等特点。

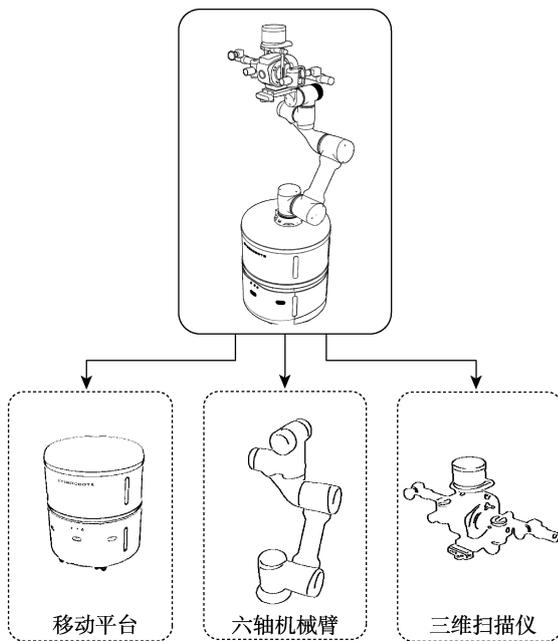


图 1 移动柔性扫描机器人综合实验平台结构图

差速两轮驱动移动底盘负载为 60 kg,最大速度为 0.7 m/s,最大爬坡角度为 5°,包含供电模块、驱动模块和智能控制模块,操作灵活,稳定可靠,地面适应能力强。机械臂选用六自由度柔性协作机器人,有效负载为 7 kg,有效工作半径为 814 mm,自重为 22 kg,重复定位精度达±0.03 mm,有 6 个旋转关节,包含本体模块和控制器模块。使用 TCP/IP 协议搭建局域网通信,上位机通过 Wi-Fi 连接到通信系统,实现对移动柔性扫描机器人的位姿控制和数据处理^[7]。通过路由器的两个 RJ45 接口,用网线分别连接移动底盘和机械臂的控制单元,即可根据规划的运动轨迹控制末端扫描仪到达指定位置和姿态。

三维扫描仪采用激光定位非接触式扫描方式,搭载 500 万像素高清工业相机,采集幅面在 60 mm×45 mm 至 600 mm×450 mm 之间无级可调,单幅测量精度为 0.007 mm,扫描距离在 100~1250 mm 之间可调。点云拼接方式选用无标记点非特征拼接^[8],便于扫描大型对象或多个目标物体,可搭载激光雷达和相机等视觉设备获取深度、色彩信息,通过数据融合提高扫描质量^[9-10],实现了在一定空间范围内对任意目标的扫描。扫描仪以刚性连接方式安装在机械臂末端的法兰上,上位机通过两根 USB3.0 数据线与扫描仪相连,进行数据传输。

1.3 实验平台软件设计

为了充分发挥实验平台硬件的功能,除了平台本体通信外,需在上位机中进行软件环境搭建和数据模型构建,并进行任务的分配处理。上位机安装配置各模块的底层硬件驱动和软件,使用 Python 编写移动平台和机械臂通信接口,发送命令控制实验平台的运动,对外提供一致性服务^[11]。三维模型可视化界面由扫描控制软件提供,实时显示扫描状态。

模型构建过程如下:①上位机发送指令控制实验平台围绕待扫描物体按预设轨迹运动,扫描软件控制扫描仪进行三维扫描,获得物体粗糙三维模型;②根据现有模型优化控制算法参数,计算移动平台新一轮的运动轨迹和机械臂末端位姿,再次进行扫描,通过数据融合和处理细化三维模型^[12];③根据最新获得的三维模型重复上一步操作,使用模型评价函数进行效果评价,直至最终获得理想的模型和效果。

2 实验平台的运动学分析

基于本文设计的实验平台进行运动学建模分析,包括移动底盘运动学建模、六轴机械臂运动学建模和移动柔性扫描机器人运动学分析。

2.1 移动底盘的运动学建模

移动底盘在世界坐标系下的坐标表示为 (x, y, ϕ) , x, y 表示移动底盘世界坐标系下的位置, ϕ 表示移动底盘的姿态 (X_C (移动平台前进方向) 正方向与 X_W (世界坐标系 X 轴) 正方向的夹角),可得移动底盘在世界坐标系下的位姿变换矩阵为:

$${}^W_B T = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & x \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式 (1) 中, W 表示世界坐标系, B 表示自身坐标系。

如图 2 所示,图中 R 表示轮子半径, L 表示两轮距离, v 、 ω 分别表示底盘中心点的线速度和角速度, ω_L 、 ω_R 分别表示底盘左轮、右轮的角速度。可得移

动底盘运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $v = \frac{\omega_L + \omega_R}{2} \cdot R$, $\omega = \frac{\omega_R - \omega_L}{L} \cdot R$ 。

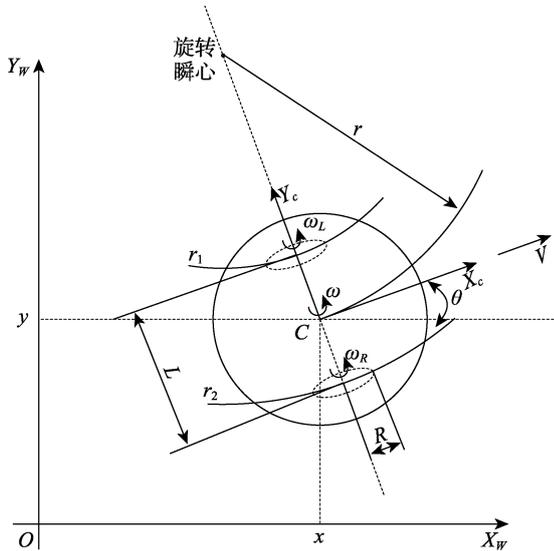


图 2 移动底盘运动坐标系

2.2 六轴机械臂的运动学建模

图 3 是针对柔性六轴机械臂各个轴建立的连杆坐标系示意图。

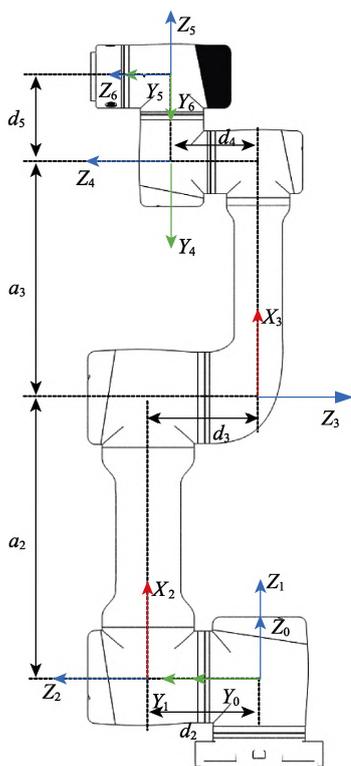


图 3 机械臂连杆坐标系

根据机械臂连杆坐标系建立机械臂 DH 参数表, 如表 1 所示, 其中 a_2 、 a_3 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 是已知的机械臂连杆长度参数, 由机械臂使用说明书直接给出。

表 1 机械臂 DH 参数表

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	$a_{i-1}/(\text{m})$	$d_i(\text{m})$	$\theta_i(^{\circ})$
1	0	0	0	θ_1
2	-90	0	d_2	θ_2
3	180	a_2	d_3	θ_3
4	180	a_3	d_4	θ_4
5	90	0	d_5	θ_4
6	-90	0	0	θ_5

注: 表头从左至右依次为: 关节轴序号、连杆扭角、连杆长度、连杆偏距、关节转角。

根据建立的机械臂 DH 参数表, 可将机械臂正运动学方程表示如下:

$${}^0T = {}^0T(\theta_1) \cdot {}^1T(\theta_2) \cdot {}^2T(\theta_3) \cdot {}^3T(\theta_4) \cdot {}^4T(\theta_5) \cdot {}^5T(\theta_6) \quad (3)$$

其中, iT 表示关节 $i-1$ 与关节 i 之间的位姿变换矩阵, θ_i 表示关节角, $i=1 \sim 6$ [13]。

2.3 移动柔性扫描机器人运动学分析

移动柔性扫描机器人末端扫描仪在世界坐标系中的位姿变换矩阵如下:

$${}^W T = {}^W T_B \cdot {}^B T_0 \cdot {}^0 T_6 \cdot {}^6 T_T \quad (4)$$

其中, ${}^W T_B$ 表示移动底盘在世界坐标系下的位姿矩阵,

${}^B T_0 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & P_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 表示机械臂基座在移动底盘下的位姿

矩阵; ${}^6 T_T = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & P_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 表示末端扫描仪工具在机械臂

第 6 个关节坐标系下的位姿矩阵。

移动柔性扫描机器人系统具有冗余自由度。在世界坐标系下, 若要求末端扫描仪到达的位姿是 P_d , 逆运动学分析就是要设置合理的约束条件, 使求出的系统状态量满足末端工具到达指定的位姿。合理的约束条件不仅需要考虑到机械的稳定性和末端工具的灵活性, 还需要考虑到求解过程的难易程度。

将移动底盘坐标 (x, y) 、方向角 ϕ 以及机械臂的 6 个关节角度 $\theta_1 \sim \theta_6$ 作为系统状态量, 可得如下系统状态量与期望位姿的关系:

$${}^W T(x, y, \phi, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = P_d \quad (5)$$

机械臂末端扫描仪位姿具有 6 个自由度, 分别是 3 个转动自由度和 3 个平动自由度。末端扫描仪 3 个转动自由度由移动底盘的转动自由度 ϕ 和机械臂第 1、4、5、6 关节的转动自由度 $(\theta_1, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ 实现; 3 个平动自由度由移动底盘平动自由度 (x, y) 和机械臂第 2、3 关节转动自由度 (θ_2, θ_3) 实现。

从移动柔性扫描机器人机械特性和便于逆运动学求解出发,由于机械臂第1关节转动自由度 θ_1 和移动底盘转动自由度 ϕ 均绕同一个轴的Z向旋转,两者运动可以等效,故设计的第一个约束条件为: $\theta_1=0^\circ$,不足的部分用 ϕ 补足。为了保证移动柔性扫描机器人的稳定性,使机械臂重心投影在世界坐标系的 (x,y) 平面时被包含于移动底盘在世界坐标系的 (x,y) 平面的圆形投影内,设计的第二个约束条件为: $\theta_3=2\times(\theta_2+90^\circ)$ 。考虑到如果对 θ_4 、 θ_5 进行约束,则会减小机器人的灵巧空间区域,又考虑到即使保证机械臂第6轴的灵活性,其对末端扫描仪工具产生的作用不大,所以采用 $\theta_6=0$ 的约束。根据求出的 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 ,并用 ${}^W_B T(x,y,\phi)=P_d \cdot {}^B_7 T^{-1}$ 求解 ϕ 值,这样就可以由目标位姿矩阵 P_d 计算出各个系统的状态量,用来控制机器人系统。

3 实验平台应用

移动柔性扫描机器人综合实验平台已面向我校人工智能学院自动化、智能科学与技术两个专业本科生开放使用,服务于专业核心课程“机器人学导论”和“人工智能技术”的实验教学,所研制的样机实物及重建效果如图4所示。

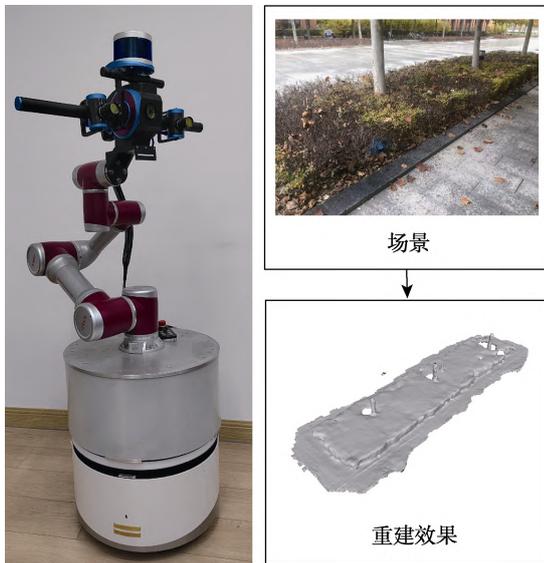


图4 移动柔性扫描机器人综合实验平台的应用

以大型对象、工作环境为参照,要求学生编写移动机器人的路径规划代码,并结合三维扫描仪通信接口改进扫描控制模块,实操实验平台完成扫描任务,验证是否实现自动化扫描。扫描结束后,将扫描得到的有效数据通过标准格式点云模型呈现出来,验证

采集效果并进行分析评价。

4 结语

本移动柔性扫描机器人综合实验平台,将移动机器人运动载体、柔性机械臂和三维扫描仪共同开发集成为具有空间运动能力的智能化感知与建模设备,能够满足机器人相关专业综合设计型和探索型实验项目对实验平台的要求。该平台可扩展实现彩色点云重建、三维模型生成、虚拟现实场景模型生成等功能,拥有较好的推广应用价值,同时具备较大的成果转化潜力,有望用于解决自然环境下高精度三维重建及效果优化问题。

参考文献 (References)

- [1] 吴峰华,李婷雪,李连德,等.产学研用一体化机器人学科建设[J].实验室研究与探索,2019,38(8):189-196,208.
- [2] 周萌,曹政才,吴启迪.新工科背景下基于“五位一体”的机器人技术教学改革研究[J].高等工程教育研究,2020(4):66-70.
- [3] 郭东亮,保延翔,刘树郁,等.综合性大学自动化专业机器人实践教学体系探索[J].实验室研究与探索,2017,36(3):212-216,230.
- [4] 吴越文,郝正航,陈卓,等.基于实时仿真器的开放式机器人实验平台[J].实验技术与管理,2017,34(1):114-118,123.
- [5] 朱海荣,吴瑜.基于工程教育专业认证的机器人创新实验平台开发[J].实验技术与管理,2018,35(11):32-37.
- [6] 中国高等教育协会.关于举办全国高校教师教学创新大赛:第六届全国高等学校教师自制实验教学仪器设备创新大赛的通知[EB/OL].(2020-07-30)[2022-02-24].<https://www.cahe.edu.cn/site/content/13529.html>.
- [7] 李志敏,林雅洁,张岩,等.基于地面移动机器人的相机标定实验设计[J].实验技术与管理,2020,37(12):89-93.
- [8] 王智,薛慧艳,孙迪,等.基于视觉追踪技术的三维点云自动拼接方法及精度分析[J].测绘通报,2020(增刊1):164-167.
- [9] 刘晓文,徐工,杨晓琳.地面三维激光扫描与近景摄影测量技术集成应用[J].山东理工大学学报(自然科学版),2018,32(5):53-57.
- [10] 庄庭达,李海,王浩楠,等.多传感器融合双臂移动机器人仿真系统与实验[J].机械设计与研究,2021,37(4):9-14,25.
- [11] 杨亮,李文生,傅瑜,等.基于ROS的机器人即时定位及地图构建创新实验平台研制[J].实验技术与管理,2017,34(8):99-103.
- [12] 司垒,王忠宾,谭超,等.轮式巡检机器人实验教学平台设计[J].实验技术与管理,2021,38(4):104-109,115.
- [13] 冷舒,吴克,居鹤华.机械臂运动学建模及解算方法综述[J].宇航学报,2019,40(11):1262-1273.