



新工科背景下机器人工程专业综合性仿真 实验设计

司鹏举, 付主木*, 冀保峰, 陶发展, 闫永义

(河南科技大学信息工程学院, 洛阳 471023)

摘要: 基于机器人仿真工具箱仅能开展简单的模拟验证内容, 亟须设计综合性创新实验以培养学生的学习能力和工程实践能力。该文综合计算机视觉与机器人理论知识, 设计包括图像分割与边缘检测、正逆运动学、路径规划的图像轮廓绘制的综合性仿真实验, 旨在培养学生解决复杂机器人领域问题的能力, 引导学生形成机器人学科独有的思维方式。该实验设计对于新工科背景下机器人工程专业学生培养具有重要的理论意义和实用价值。

关键词: 机器人工程; 运动规划; 运动学; 综合性实验; 新工科

中图分类号: TP249

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230353

Design of Comprehensive Simulation Experiment for Robot Engineering under the Background of New Engineering Disciplines

SI Pengju, FU Zhumu*, JI Baofeng, TAO Fazhan, YAN Yongyi

(School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Based on Matlab Robotics Toolbox, only simple simulation and verification can be carried out. It is urgent to design comprehensive innovation experiments to cultivate learning ability and engineering practice ability of students. By integrating computer vision and robot theoretical knowledge, a comprehensive simulation experiment of image contour rendering including image segmentation and edge detection, forward and inverse kinematics, and path planning is proposed. The purpose of the experiment is to cultivate students to solve problems in the field of complex robots, and guide students to form a unique way of thinking in the field of robotics. It has important theoretical significance and practical value for the cultivation of students majoring in robotics under the background of new engineering construction.

Key words: robot engineering; planning; kinematics; comprehensive experiment; new engineering

新工科建设, 是一项持续深化工程教育改革的重大行动计划, 主要是为应对新经济的挑战, 从服务国家战略、满足产业需求和面向未来发展的高度^[1-3], 在“卓越工程师教育培养计划”的基础上, 提出的一项持续深化工程教育改革的重大行动计划。机器人工程是顺应国家建设需求、符合国际发展趋势的典型新工科专业和多领域交叉的前沿学科, 具有很强的新颖性、综合性和实践性^[4-5]。

机器人是集控制、通信、计算机、人工智能、机械、材料和仿生学等多学科交叉的产物, 在创意、设计、硬件、软件等方面均能对具备理

论实践相结合的多技术融合创新人才培养形成良好的支撑作用^[6-10]。机器人工程作为普通高等院校的新工科专业之一, 着力于培养机器人专业学生的综合实践能力和解决复杂工程问题的能力, 具有知识难度较高、综合性较强等特点, 对于国家主动应对新一轮科技革命与产业变革、支撑“中国制造 2025”制造强国战略有着至关重要的作用。为加深学生对机器人工程专业课程理论的理解, 培养学生的工程设计和实践能力, 各高校均设置了匹配理论课程的实验内容, 满足面向工程教育专业认证的学生培养要求^[11-13]。

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(62201200); 河南省高等教育教学改革研究与实践项目(研究生教育类)(2023SJGLX178Y, 2024SJGLX0319); 河南科技大学高等教育教学改革研究与实践项目(2024BK068); 河南科技大学实验技术开发基金项目(SY2324016)。

作者简介: 司鹏举, 博士, 副教授, 主要从事智能机器人、无人机方面的研究。E-mail: sipengju@haust.edu.cn

*通信作者: 付主木, 博士, 教授, 主要从事无人驾驶、新能源汽车方面的研究。E-mail: fuzhumu@haust.edu.cn

纵观各高校机器人工程专业的实验课程形式, 主要体现为机器人生产现场参观、机器人搬运/抓取实验设计, 以及机器人教学平台开发等^[14-16]。然而, 由于教育模式僵化、教学内容陈旧和教学机器人昂贵等因素影响, 传统人才培养模式不能顺应大规模的高等教育体系, 造成大学生的自主创新能力总体水平偏低, 主要表现为创新积极性不够、创新灵感缺乏以及综合创新能力不强等。面向“中国制造”转向“中国智造”的国家战略发展要求, 亟须大量多元化交叉创新人才的不断涌现。

本实验综合机器人工程专业前期“机器人动力学控制”和“数字图像处理与机器视觉”等理论课程内容, 针对性设计了基于图像轮廓绘制的

综合性仿真实验。该实验基于机器人仿真工具箱 (MATLAB robotics toolbox), 结合机器人技术与计算机视觉知识, 包括图像分割、机器人运动学、机器人轨迹规划等内容。该实验的开展能够提高学生的学习兴趣和学习效果, 使学生掌握机器人的基础理论和专业知识, 成为富于创新精神和实践能力的应用研究型高级专门人才, 为机器人工程专业开展工程教育专业认证奠定基础。

1 实验总体设计

本文结合计算机视觉和机器人运动学内容, 设计了基于计算机视觉与机器人运动规划的综合实验, 实验框架如图1所示。

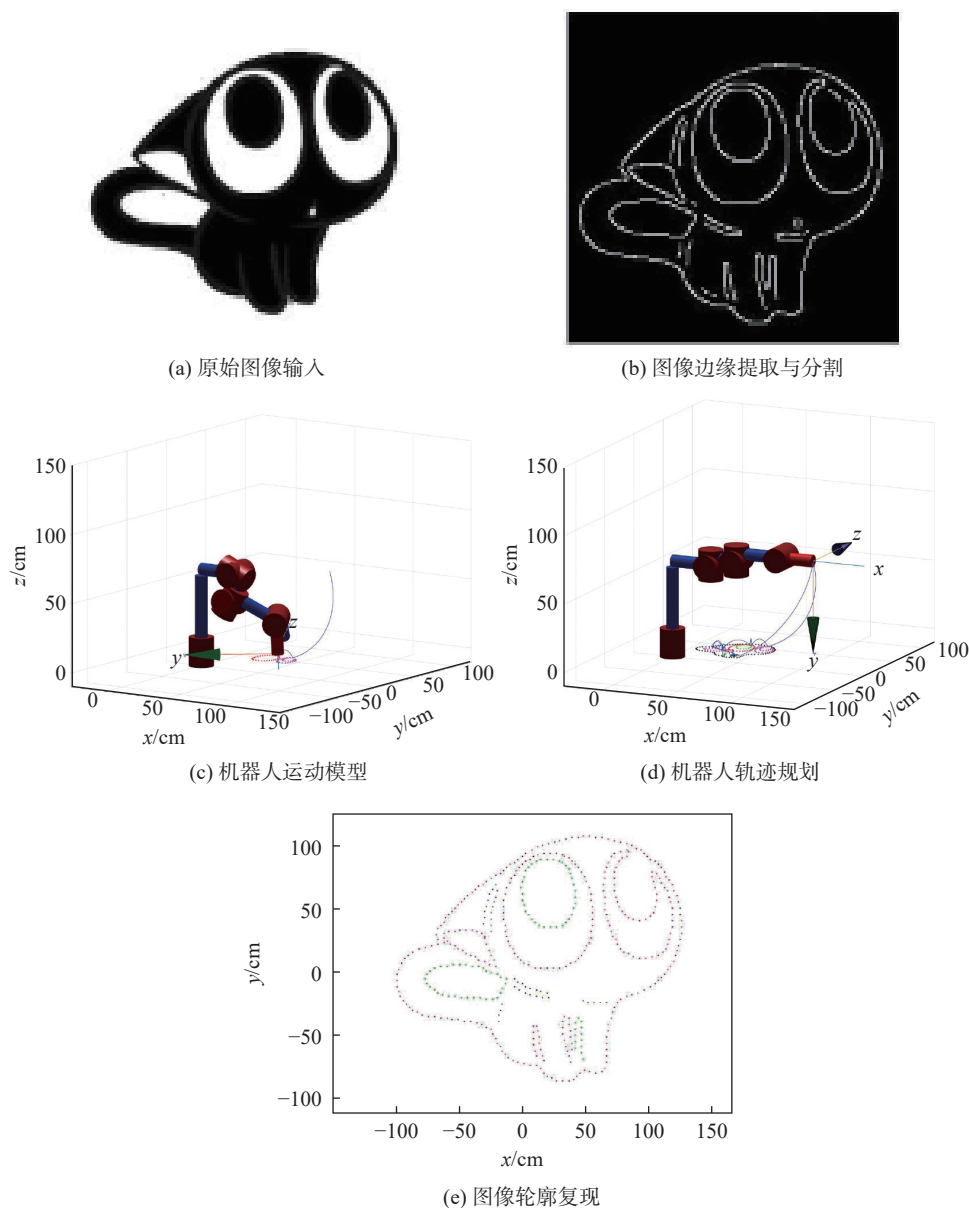


图1 综合性实验框架

首先, 基于采集的图像数据探索图像边缘提取与分割算法; 其次, 利用机械臂空间变换和 D-H(Denavit-Hartenberg)约定方法, 研究机器人齐次变换、雅克比矩阵等机器人运动学内容; 然后, 调整机械臂仿真参数, 分析机械臂末端执行器的运动轨迹与前端机械臂各关节参数的关系; 最后, 探究不同关节的机器人轨迹规划方法, 设计基于启发式的机械臂轨迹优化策略, 准确复现系统输入的采集图像。

2 对应分析变换

图像边缘特征提取与分割是计算机视觉领域中最基本的内容^[17]。为准确绘制图像的边缘轮廓, 学生可采用包括梯度算子、拉普拉斯边缘算子、高斯拉普拉斯(Laplacian of Gaussian, LoG)边缘算子等不同的方法识别出图像中的有效轮廓信息。本实验以 Canny 算子说明图像边缘提取步骤, 并通过区域生长法进行边缘线段的分割。

Canny 算子是一种多级边缘检测算法, 分为高斯滤波、梯度检测、非极大值抑制和双阈值过滤 4 个步骤, 其目标是找到一个最优的图像边缘。由于 Canny 算子得到的是边缘像素点, 其数学表达是离散的边缘坐标矩阵。因此, 采用区域生长法对边缘像素点进行连接, 形成一系列连续的图像边界线段。区域生长法依据一定的规则将像素从小区域逐渐聚合为大的区域, 在处理图像边界时随机选取边界矩阵中灰度值不为零的一点为种子节点, 根据相邻原则逐渐串联边界点, 直到独立边界结束, 最终获得图片所有独立边界信息。

进一步针对图像边缘特征提取与分割产生将噪点误判为边界点现象, 在具体程序设计中, 可通过添加线段点阈值人为控制连续线段的长度, 设定最小连续阈值, 在小于设定阈值时删除相应的线段, 清除噪声线段, 获得更好的边界轮廓效果。

图像边缘特征提取与分割结果如图 2 所示。其中, 图 2(d)中的相同且连续的颜色点代表识别出的独立线段, 不同颜色代表不同连续线段。

3 机器人运动模型

本实验引入机器人运动学相关理论知识, 建立机器人正、逆运动学模型, 并通过蒙特卡洛算法获取机械臂工作空间云图, 从而基于 MATLAB

机器人仿真工具箱构建机械臂 3D 模型, 验证机械臂正、逆运动学模型的正确性, 为后续的机械臂轨迹规划建立基础。

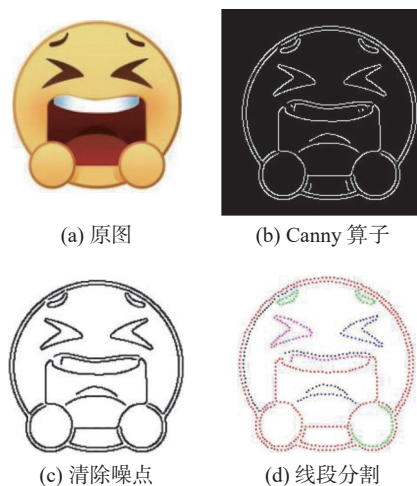


图 2 图像边缘特征提取与分割示例

机器人运动学是在不考虑引起运动的力与力矩的情况下描述机械臂的运动, 将机械臂关节位置、末端执行器的位置与姿态联系起来, 可分为正运动学和逆运动学问题。机器人运动学的主要目的是分析机械臂的工作空间。

机械臂的工作空间是机械臂末端执行器能够到达的空间区域, 是机械臂工作能力的重要体现。由于机械臂在运动过程中受限于机器人的机械结构, 关节的活动范围一般小于 360° , 因此在机械臂建模时, 生产原件的放置要包含在机械臂工作空间内。六自由度机器人模型在初始参数下的机械臂工作空间平面投影如图 3 所示。

实验采用蒙特卡洛算法求解机械臂工作空间。蒙特卡洛算法是一种随机概率算法, 通过对每一个关节在可移动范围内随机产生角度, 组成一定量组关节参数, 进而基于正运动学获取机械臂可到达的末端位置, 反映其工作空间。蒙特卡洛算法实现有如下 2 个步骤。

1) 对六轴机械臂的各个关节在其转动角度范围内随机取数, 求取各关节角度参数:

$$q_i = q_{i\min} + (q_{i\max} - q_{i\min})\text{rand}(1) \quad (1)$$

式中: $q_{i\max}$ 为关节变量上限, $q_{i\min}$ 为关节变量下限, $i=1, 2, \dots, 6$ 。

2) 通过随机关节角度参数获取机械臂末端空间位置。如果产生足够多组的关节角度参数, 可生成机械臂末端位置云图。

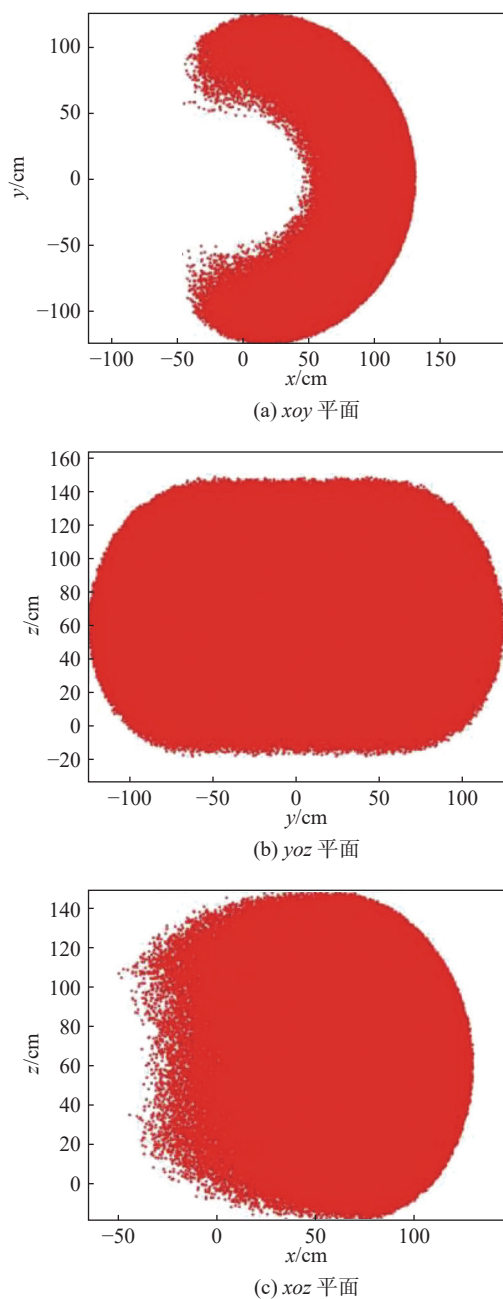


图 3 机械臂 workspace 平面投影图

4 机器人路径规划及优化

机械臂路径规划是机器人末端节点按照一定算法得到的路径运动过程, 实现点到点的运动轨迹, 是机械臂控制的重要基础^[18]。同时, 针对基于图像轮廓的提取与分割构建的独立闭合和非闭合连续线段, 需要提出机械臂运动轨迹优化方案, 优化机械臂移动总路径。

4.1 机械臂轨迹规划

为解决图像绘制中各个线段端点间连接问题, 快速找到一条轨迹平滑的最优路径, 可从关

节空间轨迹规划和笛卡尔空间轨迹规划两方面进行分析。

1) 关节空间轨迹规划主要分析机械臂关节运动时间函数, 实现轨迹运动的位置、速度和加速度方程的插值。如果已知轨迹起点和终点处的速度, 可建立三次多项式插值方程。如果考虑初始与目标点的加速度, 可增加初始与目标点的加速度, 建立五次多项式插值方程。

2) 笛卡尔空间轨迹规划是基于直角坐标系进行坐标插值, 并通过逆运动学计算机械臂各个轴的关节角, 直接对机械臂末端轨迹进行规划。但是由于逆运动学求解结果不唯一, 得到的关节角解也不唯一, 只需选取其中一个可行解即可。

本实验主要采用直线插补和二次曲线插补方式。其中, 直线插补是已知起点(P1)与终点(P2)空间坐标位置时, 末端轨迹按照直线最短原则运动; 二次曲线插补则反映了机械臂末端(Pe)具有快速转移到新线段(Po)上绘制轮廓的能力。两种笛卡尔空间轨迹规划方式如图 4 所示。

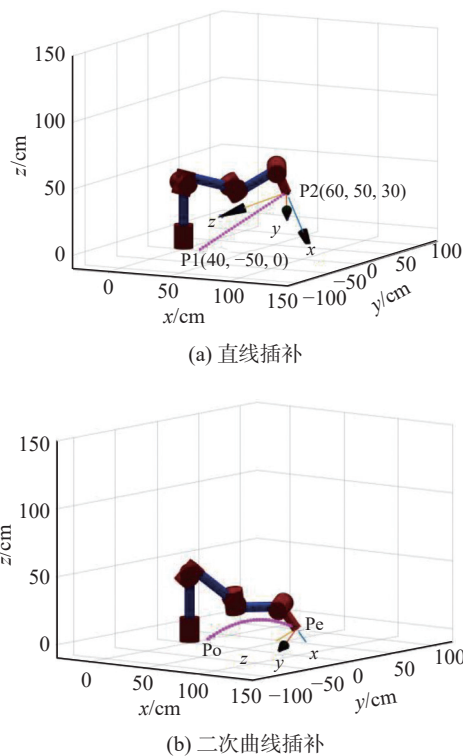


图 4 笛卡尔空间轨迹规划

4.2 机械臂轨迹优化

轨迹规划实现了点到点的运动规划, 在探索优化机械臂运动轨迹时, 学生可设计不同的优化方法。

实验以蚁群算法示例呈现如何解决线段连接轨迹优化问题^[19]。蚁群算法是一种模拟自然界蚁群觅食过程衍生出的一种仿生模拟算法，具有分布式并行运算特性和强鲁棒性，是一种寻找优化路径的概率型算法，能够有效地应用在路径规划问题中。

基于图像边缘提取与分割算法构建了多条连续闭合曲线与非闭合线段，规定连续闭合曲线的起点作为一个节点，非闭合线段的两个端点都作为节点。线段连接问题可规约为有条件限制的旅行商问题，即将线段的两个端点作为两个捆绑的节点。应用蚁群算法时，当某个端点被选择后，下一个节点设置为线段的另一端点。具体算法流程如图 5 所示。

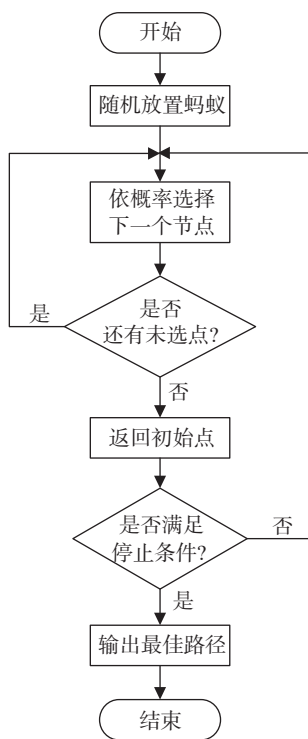


图 5 基于蚁群算法的机械臂轨迹优化流程图

基于蚁群算法绘制的卡通图片俯视图如图 6 所示。其中，相同颜色点表示连续轮廓线段，细线表示机械臂在各个线段之间的二次曲线插补连接轨迹。

5 实验开展结果

为提高学生参加综合性实验的兴趣和成就感，激发学生的学习积极性及创新思维，开展实验时，鼓励学生采用不同的方法开展综合性实验

分析和测试。具体而言，学生可采用自己感兴趣的图像作为输入，在图像边缘提取与分割，根据已经掌握的图像处理方法，尝试不同的图像边缘提取与图像分割算法。机器人运动学主要包括正运动学与逆运动学，需要学生掌握机器人空间变换和 D-H 约定等方法；在开展机器人轨迹优化之前，需要掌握关节空间和笛卡尔空间坐标轨迹规划方法，鼓励学生设计不同的优化方案开展轨迹规划。

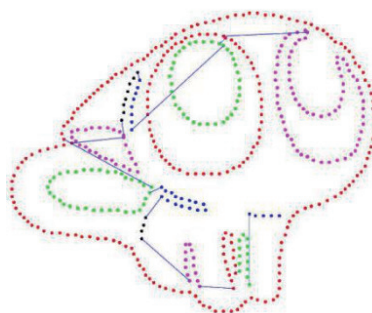


图 6 基于机械臂轨迹规划的绘制俯视图

该综合性实验已在河南科技大学机器人工程专业本科生中开展，学生需完成机器人动力学控制、数字图像处理与机器视觉课程的学习。为检验每位学生的实验效果，输入图像采用学生自己的人脸图像，并在课程报告中给出实验效果。

6 结束语

本实验具有开放性和综合性的特点，可以开展图像处理、机器人运动学、轨迹规划、算法验证等实验。通过实验，使学生有效掌握图像处理技术和机器人运动规划方法，深刻理解相关课程的理论知识，培养了在系统层面上分析问题和解决问题的能力，进一步提高了学生的创新能力与综合应用能力。通过本实验期望对新工科背景下机器人工程专业创新人才培养体系研究与实践提供一定的参考。

参考文献

[1] 赵玉新, 许德新, 刘志林. “3I” 特色新工科人才多维创新实践平台的建设[J]. 高等工程教育研究, 2024(2): 31-37.
 [2] 潘秋瑜. 新工科背景下高校产教融合教学模式的探索: 以机器人工程专业为例[J]. 装备制造技术, 2024(2): 87-89.

(下转第 60 页)