

八自由度全自动隧道喷浆机器人系统设计

秦觅¹, 宋迪¹, 吴迪¹, 林叔斌², 张惠斌², 张文婷¹, 林学斌¹, 丘文杰¹, 谢斌¹

(1. 中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410083; 2. 科达智能装备股份有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 隧道施工环境恶劣, 在喷涂隧道面时采用全自动喷浆机械臂代替工喷射是社会发展的必然趋势, 然而当前国内外对于隧道面自动喷涂技术的研究极少。基于此, 本文对一款八自由度隧道喷浆机械臂进行了全自动喷浆系统的设计。引入虚拟关节并结合 D—H 参数表来建立正向运动学模型, 逆向运动学模型则通过固定关节角法求解。本文采用激光雷达实现隧道面三维数据的采集, 并对原始点云数据进行了去噪、采样、隧道面提取和中轴线提取等处理。之后采用点云切片技术处理三维点云数据, 根据待喷面检测结果实现最优喷涂轨迹规划。最后采用模糊自整定 PID 控制算法控制机械臂各关节运动以实现全自动喷浆。本文在搭建的模拟隧道环境下进行了真机实验验证, 能够全自动的实现三维扫描、待喷面识别、轨迹规划和运动控制功能, 说明本文设计的机器人系统具有隧道全自动喷浆的可行性。

关键词: 八自由度机械臂; 三维扫描; 轨迹规划; 运动控制

Design of automatic tunnel shotcrete system for 8-DOF manipulators

QIN Mi¹, SONG Di¹, WU Di¹, LIN Shubin², ZHANG Huibin², ZHANG Wenting¹,
LIN Xuebin¹, QIU Wenjie¹, XIE Bin¹

(1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, P.R.China;

2. Keda Intelligent Equipment Co., Ltd, Changsha 410000, P.R.China)

Abstract: This paper designs a fully automatic shotcrete system for an 8-DOF tunnel shotcrete manipulators. For the forward kinematics model, virtual joints are introduced and combined with D-H table to solve. The original point cloud data created by lidar is pretreatment. Trajectory planning is done with point cloud slicing. Finally, the fuzzy self-tuning PID control algorithm is used to control the joint movement of the arm to achieve automatic shotcrete. In this paper, the real machine experiment verification is carried out under the simulated tunnel environment, which can realize the three-dimensional scanning, the surface to be sprayed, the trajectory planning and the motion control function. It shows that the robot system designed in this paper has the feasibility for tunnel automatic spraying.

Keywords: 8-DOF manipulators; 3D scanning; trajectory planning; motion control

通讯作者: 谢斌 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能机器人、机器视觉和医学图像处理相关领域。

E-mail: xiebin@csu.edu.cn

第一作者: 秦觅 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能机器人控制。

0 引言

喷浆机械臂是一种广泛应用于铁路公路隧道、地下建筑、各类矿山和水利水电工程施工的工程设备。现有的喷浆机械臂自动化程度较低，在喷浆作业时主要还是依赖人工控制喷浆机末端喷头移动的方式来完成喷射，喷浆的质量和效率也主要取决于工人的经验。在实际工作中，由于这类施工环境一般都较为恶劣，长期处于这种环境会严重影响工人的身体健康，而企业要聘请这些操控手也需要一笔不小的开销。随着社会的发展和湿喷工艺的推广，全自动喷浆机械臂代替人工喷射已成为必然的趋势。

对于机器人自动喷涂技术，早期的研究主要是通过“示教再现”的编程方式代替人工进行喷漆、焊接等自动化作业^[1]，也有基于图形的离线编程方法^[2]，这种方法需要对喷涂工件进行三维建模，并根据工件的三维模型自动生成喷涂路径并转化成喷涂机器人运动程序。Cao^[3]等人在自动编程技术的基础上提出了一种快速喷涂指令生成算法，用于实现自动喷涂。上述三种方案都需要对特定的喷涂目标进行建模，当更换喷涂工件时，需要对系统进行重新设定并重新规划喷涂机器人的喷涂路径，这样不仅影响了工作效率，而且增加了生产成本，不能做到真正意义上的“自动化喷涂”。Berenstein^[4]等人提出基于机器视觉的自动喷涂技术，用工业相机捕获待喷目标的信息，然后运用目标检测的方法设定自动喷涂任务，而 Li^[5]等人则提出基于图像分割和双目立体视觉定位待喷目标的方法。以上这两种方法对于每一种喷涂目标，必须开发特定的目标检测算法，对于喷涂目标不固定的情况适用性较差。Meng^[6]等人提出利用全站仪对待喷船舶表面进行定位，实现对复杂表面的船体进行自动喷涂。但是全站仪存在价格高昂，不易安装在机械臂上等问题。

本课题的研究目标是对一款八自由度隧道喷浆机械臂进行智能化改造，使其能够脱离人工的控制，实现对隧道面的全自动喷浆。目前，全行业对于全自动隧道喷浆机器人的研究较少，尚未见到规模量产的全自动喷浆机器人产品。本文针对上述问题提出了一种全新的自动喷浆系统，系统通过对隧道面进行三维重建得到喷射对象的点云模型，根据点云模型自动规划出末端喷头的喷射轨迹，结合逆向运动学模型求解得出各个关节变化序列，并将其输入到机械臂的运动控制器中，最终实现机械臂对隧道面自动喷浆的目的。

这一项技术的实现不仅能减轻工人和企业的负担，而且能作为国内外的一项领先技术，为工业机器人自动作业打开新的突破口，对于多自由度串联机器人智能化改造具有重要参考意义。

1 正逆向运动学模型的建立与仿真

1.1 正向运动学建模及验证

本文研究的隧道喷浆机械臂为具有八个自由度的机械臂，其中两个关节为移动关节，六个关节为转动关节，实物如图 1 所示。



图 1 机械臂真机实物图

Fig.1 Physical Drawing of Manipulator

由于目标机械臂的机械结构较为复杂，各个关节轴间存在多处的弯曲与偏移，若采用传统的 D—H 参数表来建立正向运动学模型会存在难以准确测量参数的问题。因此本文引入虚拟关节，即在实际的两个关节之间加入无法变动的关节，来改变建立 D—H 参数表时需要测量的数据，从而减小参数测量难度，提高建模精度。引入虚拟关节后的机械臂模型共 11 个关节，其中包含三个虚拟关节，分别在关节 2 和关节 3 之间、关节 4 和关节 5 之间、关节 5 和关节 6 之间。引入虚拟关节后的结构简图及坐标系建立如图 2 所示。

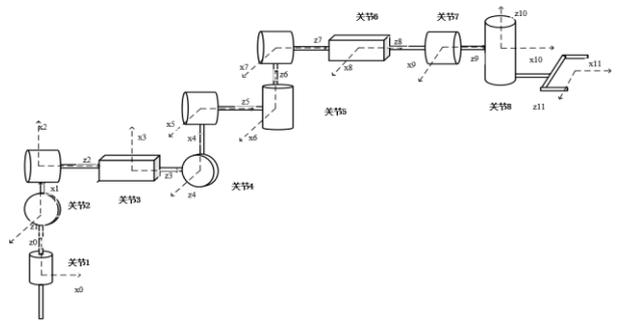


图 2 包含虚拟关节的机械臂结构简图

Fig.2 Schematic diagram of manipulators structure containing the virtual joint

基于上图的各个关节的坐标系，可以获得 D—H 参数表，如表 1 所示。

表 1 引入虚拟关节后的机械臂 D—H 参数表

Tab.1 The D-H table after the introduction of virtual joint

连杆	θ_i	d_i	a_i	α_i	offset
1	θ_1	d_1	0	90°	0
2	θ_2	0	a_2	90°	pi/2
3	0	d_3	0	0	0
4	0	L_4+d_4	0	-90°	0
5	θ_5	0	a_5	90°	0
6	0	d_6	0	90°	pi/2
7	θ_7	d_7	0	-90°	0
8	0	d_8	0	0	0
9	0	L_9+d_9	0	0	0
10	θ_{10}	d_{10}	0	90°	0
11	θ_{11}	d_{11}	a_{11}	90°	pi/2

基于以上 D—H 参数表建立的正向运动学模型可以获得任意关节角度或位移情况的机械臂末端的位置和朝向。

本文使用 Matlab 中的机器人工具箱构建仿真环境下的机器人模型，并且编写 M 文件输出给定关节角度下的末端变换矩阵，结合仿真验证了机械臂正向运动学模型的正确性。

1.2 逆向运动学求解及验证

逆向运动学求解就是已知机械臂末端相对于基础坐标系的位置和朝向，求解各个关节变量的值。目前国内外对于六自由度以下机械臂的逆向运动学求解的方法有很多，然而本文研究的机械臂为八轴机械臂，具有冗余结构，对于操作空间内的具体点的位姿存在无穷多组解。考虑到本文研究的隧道喷浆机械臂在进行喷浆作业时，关节 5 的转动角度通常不超过 1 度，在 0 度左右移动，而关节 3 和关节 6 存在互补的作用，因此选择使用固定关节角法^[7]进行逆向运动学求解。选择关节 5 和关节 6 作为固定关节，使得机械臂结构符合 piper 准则。虽然这样减少了机械臂的自由度但是并不影响机械臂的实际工作过程，并且有利于逆解的计算。

本文设定关节 5 和关节 6 的关节变量值均为 0，对机械臂末端喷头的变换矩阵采用反变换法列出多个等式方程，可以解出关节 1 的解析解，并依次得到后续各个关节的解析解。

对于每一个变换矩阵，经过逆解可以求得 16 组解。我们将求解出的 16 组解分别带入正向运动学模型，计算得到的 16 个变换矩阵与求解该逆解时输入的变换矩阵完全一致，从而验证了逆向运动学模型的正确性。

随后，我们对逆向运动学模型求解出的 16 组

解增加筛选条件，包括当前解与上一组解各个关节变量的变化尽可能最小；优先改变距离末端更近的关节的关节变量；俯仰、横摆等旋转关节以及伸缩等移动关节的增量方向尽可能保持一致等。通过以上筛选条件可以选出最优的一组解作为机械臂运动时需要输入的关节变量。

2 三维环境感知与重建

2.1 激光雷达的调零

为实现隧道施工面的识别与建模，本文将激光雷达安装在喷浆机械臂 6 号关节处使其跟随臂架运动以增大扫描范围，最终采集到隧道面的三维重建数据。

因为雷达安装在机械臂的 6 号关节末端，而机械臂正向运动学模型建立时其坐标系设在 1 号关节处，雷达采集到的隧道面的三维数据需要通过坐标系转换才能用于逆向运动学模型的求解。为了便于雷达坐标系与机体坐标系的转换，本文在雷达使用前对其初始位置进行了调零，即通过旋转微调雷达角度，保证点云数据 X 轴朝向与 6 号关节水平向前的朝向重合。在调零前，因为雷达安装精度等原因，点云 X 轴朝向与 6 号关节水平向前的朝向存在一定角度的偏差，如图 3(a)所示。图中 X' 表示 6 号关节水平向前的朝向，X 表示当前扫描到的点云 X 轴朝向。

本文手动在 6 号关节中间选取了一点，通过该点的坐标计算出该点与原点的连线和 X 轴之间的夹角，再通过传输操作指令，控制云台旋转此角度标定好坐标轴的朝向。如图 3(b)所示，可知调零后点云 X 轴朝向与 6 号关节水平向前的朝向已基本一致。

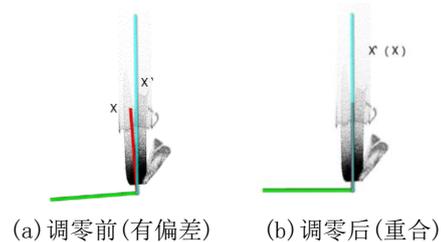


图 3 调零前后对比图

Fig.3 Comparison chart before and after zero adjustment

2.2 隧道三维重建与处理

调零完成后便可以对待喷隧道面进行扫描及三维重建，本文对原始点云数据进行了去噪、采样、提取隧道点云主体和中轴线提取等处理，处理流程如图 4 所示。

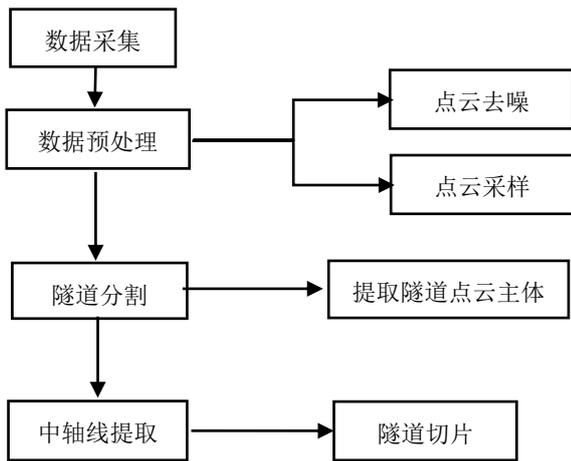


图4 隧道点云处理流程图

Fig.4 Tunnel point cloud processing flow chart

其中各部分内容解释如下：

1) 点云去噪

由于施工现场粉尘浓度大、空气可见度低的原因，雷达直接扫描得到的数据存在随机噪声，需要合适的去噪算法进行点云去噪。本文以采样点偏离隧道表面垂直距离为噪声识别依据，认为偏离隧道表面越远的点噪声概率越高。根据点云法向与隧道轴向的偏差识别出可靠的隧道表面点。然后参照可靠点，依据采样点偏离隧道表面垂直距离，完成噪声点的进一步确认。通过调节误差允许范围，可将除拱架及防护网以外的偏离隧道面距离较大的点视为噪声点进而剔除。

2) 点云采样

在获得点云数据后采用体素滤波进行下采样，由原始的 120 多万个数据点压缩至 80 万以内，以使点云分布更加均匀。

3) 提取隧道点云主体

隧道中由于存在行走的施工人员、停放的车辆等，会对扫描的结果产生干扰，需要将其剔除，本文对三维点云进行了聚类分析实现点云分割，分割后真正属于隧道面的点云占最大的一部分，据此将点云中属于隧道面的数据提取出来。

4) 中轴线提取

获取隧道中轴线是对隧道进行参数化建模的基础，由于隧道具有类似于圆柱体的形状特征，对于上一步得到的隧道面以平面拟合的方式提取表面法向量，对表面法向量进行配对联合外积运算，每一组配对都能得到一个近似平行于隧道轴线的轴向向量。将获得的所有轴向向量取平均值获得精准的中轴方向 $f = (x_0, y_0, z_0)$ 。隧道中轴线用一个定位点加一个方向矢量来表示，定位点坐标为

$$o(x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^n (x_i, y_i, z_i) / n \quad (1)$$

5) 隧道切片

在确定中轴线后，将点云沿中轴线正向作均匀切片，即可获得待喷面每一个切片下的点云数据，用于后续的轨迹规划。

3 运动轨迹规划

本文研究了在一个复杂多变的隧道空间中，根据三维重建得到的隧道特征信息进行喷浆轨迹的规划。为了降低轨迹规划的难度，可以采用匀速喷浆这种简化的方式进行轨迹规划。目前常用的匀速喷枪轨迹形式有 s 形轨迹和螺旋形轨迹。为了简化，本文采用沿隧道面从右至左的弧线轨迹进行喷浆。

由于点云数据较为杂乱，无法直接利用点云数据进行轨迹规划，本文采用点云切片技术^[8]处理三维点云数据。首先采用一系列与三维隧道数据中 $X=0$ 平面平行的平面去切割三维隧道模型，其切割平面间的距离等于喷浆机的混凝土喷射直径。经过切割平面处理之后，可以得到多段点云数据，以每相邻的两段点云数据为一组，如图 5(a)中的 E1、E2、E3 为平行切割平面，得到两小段点云数据。计算获取每组的两段点云数据中互为最近点的匹配点对，匹配点对连线后与切割面相交于多个点。如图 5(b)所示，切割面 E2 与各匹配点集连线的交点即为隧道面的待喷点。

考虑到实际喷浆时机械臂末端喷头需要距离隧道面 1 米以上的距离，并且喷头尽可能垂直于隧道面喷射，本文将之前规划的所有待喷点沿隧道面法线方向向隧道内移动 1 米，得到偏移后的轨迹点，并将点云数据块的法线方向作为末端喷头的朝向。

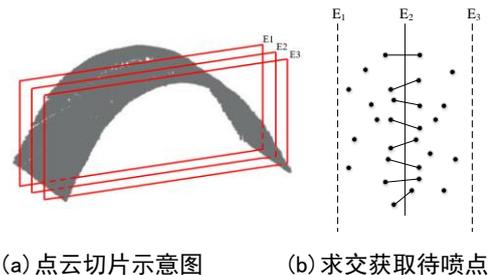


图5 轨迹规划获取待喷点示意图

Fig.5 Trajectory planning to obtain a schematic diagram of the point to be sprayed

4 运动控制系统

本研究针对喷浆机械臂各关节实际使用情况，分别加装了倾角传感器、角度传感器和拉线传感器，用于获取机械臂各个关节变量的旋转角度和伸缩长度等信息。通过轨迹规划得到喷浆机械臂末端喷头一系列的目标位置和朝向，将其转化为逆向运动学模型的求解输入格式，然后代入逆向运动学模型

求解得到各个关节的变化序列。

针对这些关节变化序列,结合喷浆机械臂的液压驱动特性,采用模糊自整定 PID 控制的控制算法^[9],将关节变化序列转化为各关节的驱动控制量,然后再将驱动控制量通过 CAN 总线传至各执行关节,使得各个关节完成相应的旋转和位移变换。在已有的机械臂运动学建模的基础上,结合轨迹规划所给出的期望运动轨迹以及机械臂运动时传感器实时回传的位姿信息对各关节驱动量进行自适应调整,最后使得位置点误差控制在理想范围内。

5 实验与结果

为了验证以上工作的正确性与可操作性,我们在空地上搭建了一个模拟隧道来进行实验验证,如图 6 所示。实验包含四个部分,第一部分是用雷达对模拟隧道进行三维重建,并提取隧道点云主体;第二部分是在隧道点云主体的基础上对机械臂末端喷头进行轨迹规划,得到末端喷头一系列的轨迹点,包含其需要到达的位置和朝向;第三部分是将上述规划出的轨迹点代入逆向运动学模型,求解出机械臂末端喷头要走出该轨迹时各个关节变量的变化序列;第四部分是将解算出的关节变化序列代入运动控制器,控制机械臂各个关节的运动,并将机械臂末端喷头的实际控制位姿与轨迹规划的位姿进行比较,计算实时误差。实验结果如图 7-10 所示。



图 6 模拟隧道实物图

Fig.6 Picture of Simulated tunnel

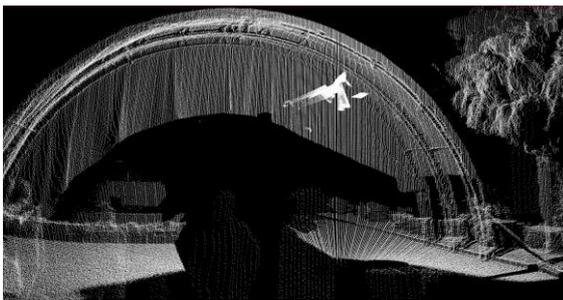


图 7 雷达扫描结果图(处理前)

Fig.7 lidar scan result map (before processing)

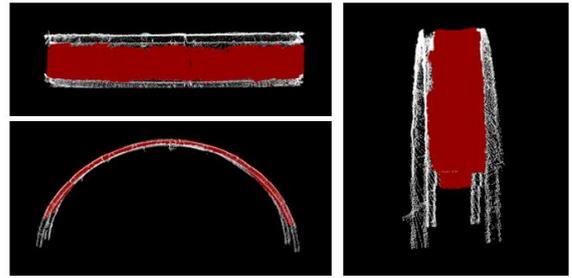


图 8 提取隧道点云主体结果图(处理后)

Fig.8 Extract tunnel point cloud body result (after processing)

从图 7 可以看到,雷达扫描出来的数据在处理前存在较多干扰,包括树木、行人等。经过处理后的点云数据只剩隧面主体,便于喷涂轨迹的规划。图 8 中标红的地方为待喷涂面。

将求解出的各关节变化序列代入运动控制器,控制机械臂各关节运动最终使得末端喷头走出实际喷射轨迹,将该实际的喷涂轨迹与预期喷涂轨迹进行比较,得出位置和朝向误差如图 8 和图 9 所示。

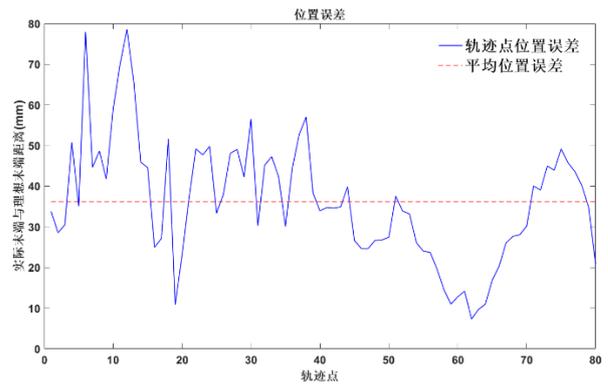


图 9 实际末端轨迹与期望末端轨迹位置误差

Fig.9 Position error of Actual and expected trajectory

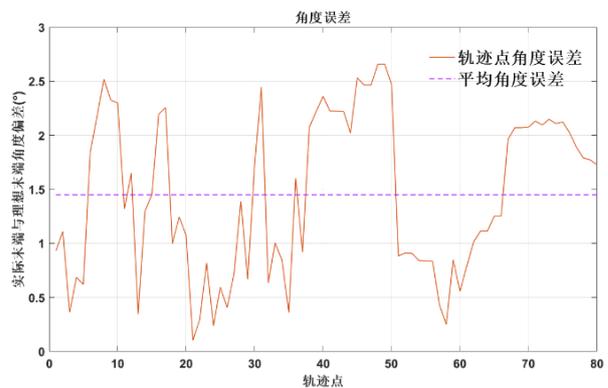


图 10 实际末端轨迹与期望末端轨迹角度误差

Fig.10 Angle error of Actual and expected trajectory

本文在实验中沿模拟隧道待喷面从右至左一共规划了 80 个轨迹点,从以上结果可以看出,预期喷涂轨迹和实际控制轨迹运行的平均位置误差

为 36mm, 最大位置误差不超过 79mm。末端喷头预期角度与实际角度平均误差为 1.45° 且最大角度误差不超过 2.6° 。

综合上述实验结果可知, 本文设计的系统能够在满足精度的要求下全自动的实现三维扫描、待喷面识别、轨迹规划和运动控制功能, 说明本文设计的系统具有隧道全自动喷浆的可行性。

6 总结与展望

本文以一款八自由度隧道喷浆机械臂为研究对象, 设计了一套用于隧道面全自动喷浆的系统。该系统的设计包含机械臂正逆向运动学建模、隧道面三维重建、待喷面轨迹规划与运动控制四个模块。本文在模拟隧道环境下进行了真机实验验证, 测量得知预期轨迹和实际控制轨迹运行的实时位姿误差在实际施工的允许范围内。实验结果表明, 本文设计的系统能够具有完成隧道面全自动喷浆的可行性。未来的工作将致力于研究在真实隧道环境下带混凝土喷射的情况, 结合喷浆轨迹的优化实现最终的隧道全自动喷浆作业。

参考文献

- [1] 张宇翔. 基于 PLC 的三轴喷涂机器人控制系统设计[D]. 湖南: 湖南大学, 2017.
- [2] 陈其忠, 邹焱飏, 张铁, 等. 喷涂机器人离线编程系统的开发[J]. 机床与液压, 2013, 41(11):122-124.
- [3] 李富国, 李杰. 基于 PLC 的工业机器人控制系统的研究[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(6):163-165.
- [4] Berenstein R, Edan Y. Automatic adjustable spraying device for site-specific agricultural application[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(2): 641-650.
- [5] Li Y, Xia C, Lee J. Vision-based pest detection and automatic spray of greenhouse plant[C]// 2009 IEEE international symposium on industrial electronics. IEEE, 2009: 920-925.
- [6] Zihang Meng, Changle Li, Ge Li, et al. Research of Positioning Method for Automatic Spraying on Large Ship Block Surfaces[C]. Proceedings of The 2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics, Angkor Wat, Cambodia 2016, 431-436.
- [7] Crane C D, Duffy J, Carnahan T. A kinematic analysis of the Space Station Remote Mani-

pulator System[J]. Journal of Robotic Systems, 1991, 8(5):637-638.

- [8] Song H, Feng H Y. A progressive point cloud simplification algorithm with preserved sharp edge data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(5-6): 583-592.
- [9] 张娟, 白斌, 舒亚峰, 等. 基于改进的 PID 算法的压电柔性机械臂振动主动控制[J]. 机械科学与技术, 2018, 33(5):626-629.

作者简介:



谢斌(1983-), 男, 湖南人, 中南大学副教授, 博士, 主要研究方向为智能机器人、机器视觉和医学图像处理相关领域。E-mail: xiebin@csu.edu.cn。电话: 13873124038



秦觅(1994-), 男, 广西人, 中南大学硕士研究生, 主要研究方向为智能机器人控制。E-mail: csuqinmi@163.com。电话: 13054189037