

面向船舶的喷涂机器人离线编程技术研究

周颖娟¹, 周波¹, 何家健², 玄甲辉²

(1. 东南大学自动化学院, 江苏南京 210096;
2. 江苏自动化研究所机器人事业部, 江苏连云港 222000)

摘要:传统的机器人编程一般采用人工示教或者离线编程的方式进行, 针对外形复杂、喷涂工艺要求高的大型船舶表面, 现有离线编程方法均不能直接适用。因此, 提出了一种针对大型船舶表面喷涂作业的离线编程与仿真系统, 分别对非球形腕机器人逆运动学求解、区域分割、轨迹规划、中间语言及后置处理等进行了详细的研究。以 Solidworks 三维设计软件作为基础平台, 以 Visual Studio 为开发环境, 开发了一套离线编程与仿真软件, 实现了从工件导入到基于工件特点进行区域分割再到轨迹规划生成中间语言程序最后转换为机器人程序的完整流程。同时, 使用该系统针对一般曲面、弯曲程度较大的曲面、船舶外表面分别进行了仿真实验, 结果表明该系统能适用于不同工件的喷涂作业, 且能够提高喷涂效率及喷涂效果, 验证了该系统的通用性和有效性。

关键词:喷涂机器人; 大型船舶; 离线编程; 轨迹规划; 仿真

中图分类号: TP242.2; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2020)10-0149-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2020.10.027

Research on Off-line Programming Technology of Spray Painting Robot

ZHOU Ying-juan¹, ZHOU Bo¹, HE Jia-jian², XUAN Jia-hui²

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Robotics Division, Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222000, China)

Abstract: The traditional robot programming is generally done by manual teaching or off-line programming. For large ship surface with complex shape and high requirement of spraying process, the existing offline programming methods are not directly applicable. Therefore, we propose an off-line programming and simulation system for large-scale ship surface spraying operation. The inverse kinematics solution of non-spherical wrist robot, region division, trajectory planning, intermediate language and post-processing are studied in detail. With Solidworks 3D design software as the basic platform and Visual Studio as the development environment, a set of off-line programming and simulation software is developed to realize the complete process from importing workpiece, to performing regional segmentation based on the characteristics of the workpiece, to generating intermediate language programs through trajectory planning, and finally to converting to robot programs. At the same time, simulation experiments are carried out on general curved surfaces, curved surfaces with large degree of bending, and outer surfaces of ships respectively. The results show that the system can be applied to the spraying of different work-pieces and can improve the spraying efficiency and spraying effect, which verifies its universality and effectiveness.

Key words: spray painting robot; large-scale ship; off-line programming; trajectory planning; simulation

0 引言

大型船舶长期处于呈碱性的海水中, 不停地受到海水的冲刷, 因此对船舶表面的涂层质量有着较高的要求。目前船舶制造业中大多使用人工喷涂的方法对船舶表面进行喷涂作业, 工人工作量大、工作环境恶劣且工作时间长, 虽然喷涂效果基本能够满足喷涂要求, 但是受人为主观因素影响较大, 喷涂质量难以保障^[1]。随

着工业机器人的快速发展, 如果能够利用机器人的优势, 将喷涂机器人应用于大型船舶复杂表面的喷涂作业, 一定能够改善工人工作环境, 提高喷涂效率和涂层质量^[2]。

工业机器人编程方式分为人工示教和离线编程两种方式。人工示教编程方式需要机器人暂停作业, 要求操作人员有一定的经验技术, 也难以实现较为复杂

的运动轨迹^[3],同时,使用在线示教进行大规模船舶外立面喷涂仍然需要操作人员高空作业,存在着安全隐患。因此,人工示教编程已经难以满足工业生产要求。离线编程方式中技术人员无需对实际作业的机器人直接进行示教,而是通过软件,间接远程地进行轨迹规划,编程过程中无需机器人暂停作业,且能够将人从恶劣的工作环境中解放出来,节约工作时间、提高喷涂效率^[4]。

现有商业离线编程软件一般由机器人厂商配套自己生产的机器人推出,如西门子公司开发的 RobCAD,瑞士 ABB 公司所发布的 RobotStudio^[5],欧洲的 FANUC 和以色列的 CompuCraft 合作开发的 FanucWorks 离线编程软件和 RoboGuide 离线编程系统,德国 KUKA 机器人的 KUKASim 软件模块等。

然而,针对这种大型复杂船舶曲面,现有离线编程软件存在以下问题:(1)船舶外立面喷涂工艺复杂、曲率变化多样,现有的轨迹规划算法无法满足喷涂要求;(2)由于不同的机器人控制器中内置了不同的机器人语言,针对不同机器人厂家需要使用不同的离线编程软件,离线编程的通用性有待提高。

为解决以上问题,该文分别对非球形腕机器人正逆运动学解、区域分割、轨迹规划、中间语言系统及后置处理等进行了研究,提出了一种针对大型船舶表面喷涂作业的离线编程与仿真系统,实现了从工件导入到基于工件特点进行区域分割再到轨迹规划生成中间语言程序最后转换为机器人程序的完整流程,并设计实验针对不同特点的工件进行了喷涂仿真。

1 基于雅可比伪逆法的逆运动学算法

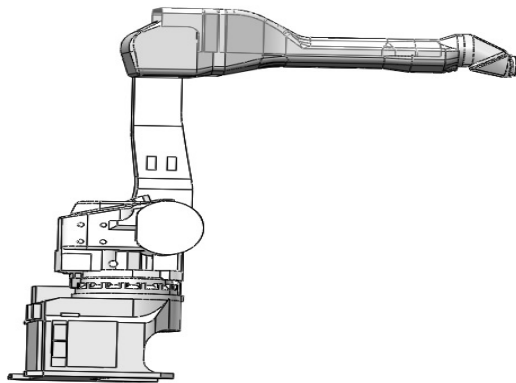
针对大型船舶的喷涂作业,项目中使用的喷涂机器人是川崎 KJ264 地面式喷涂机器人。该机器人 CAD 模型图如图 1(a)所示。该喷涂机器人为六自由度机器人,有 7 个连杆,从基座开始标记为 0,下一个连杆记作 1,以此类推,每一个连杆固定一个坐标系用来描述其相对运动。完成喷涂作业首先要对机器人进行运动学建模,针对 KJ264 采用 DH 参数法^[6]完成其运动学建模和正逆解计算,则相邻连杆之间的关系为:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i \lambda_i & s_i \mu_i & a_i c_i \\ s_i & c_i \lambda_i & -c_i \mu_i & a_i s_i \\ 0 & \mu_i & \lambda_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

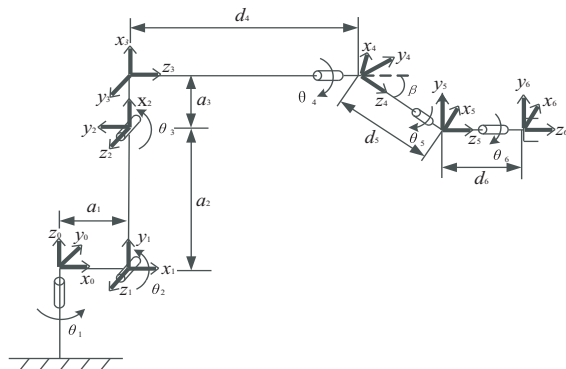
其中 $s_i = \sin \theta_i$, $c_i = \cos \theta_i$, $\lambda_i = \cos \alpha_i$, $\mu_i = \sin \alpha_i$, a_i 为连杆长度, α_i 为连杆扭转角, d_i 为关节偏距, θ_i 为关节旋转角。连杆坐标系建立完成后,即可确定机器人运动学方程:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 \quad (2)$$

设计的机器人机构图如图 1(b)所示,具体 D-H 参数见表 1。其中 $a_1 = 140.0$, $a_2 = 1\ 100.0$, $a_3 = 0$, $d_4 = 1\ 400.0$, $d_5 = 100$, $d_6 = 105$, $\beta = 60.0^\circ$ 。



(a) KJ264 CAD 模型图



(b) KJ264 机构图

图 1 KJ264 三维图及机构图

表 1 KJ264 D-H 参数

i	a_i / mm	d_i / mm	$\alpha_i / ^\circ$	$\theta_i / ^\circ$	关节运动范围
1	a_1	0	90.0	θ_1	$-120^\circ \sim 120^\circ$
2	a_2	0	0	θ_2	$-80^\circ \sim 130^\circ$
3	a_3	0	90.0	θ_3	$-65^\circ \sim 90^\circ$
4	0	d_4	β	θ_4	$-720^\circ \sim 720^\circ$
5	0	d_5	$-\beta$	θ_5	$-720^\circ \sim 720^\circ$
6	0	d_6	0	θ_6	$-410^\circ \sim 410^\circ$

逆解问题是运动学建模中的较为复杂的环节,它是将给定的位置姿态转换为一组关节角。对于 4、5、6 三个关节轴线轴交于一点,满足 piper 条件^[7]的机器人,其逆运动学位置和姿态是解耦的,可求得其解析解;而对于不满足该条件的机器人,其逆运动学无封闭形式解析解。

从图 1(b)可以看出 KJ264 手腕三个关节轴线 Z_3 、 Z_4 和 Z_5 不相交于一点,不满足 piper 条件,因此该机器人逆运动学无解析解。该文采用雅可比伪逆法^[8-10]对其求运动学逆解。该方法实现简单,在求解关节角时会依赖于前一个位姿,而在机器人作业中,前

后两个位姿相差不会过大,由前一个位姿只需要经过少量迭代次数就可以到后一个位姿,因此使用雅可比伪逆法解决运动学中的逆运动学问题可以很好地满足实时性以及精度要求。

2 离线轨迹规划与仿真系统

该文设计了针对大型船舶表面的喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统,该系统的主要功能有:工件导入,针对工件各自的特点进行区域分割,轨迹规划,生成中间语言程序,后置处理生成实际机器人程序,完整的系统流程如图 2 所示。

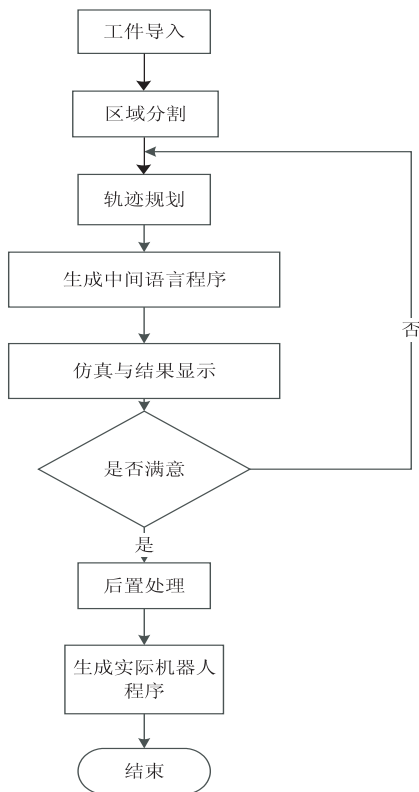


图 2 系统流程

2.1 区域分割

船舶曲面一般几何形状比较复杂,部分区域弯曲程度较大^[11],而现有的喷涂模型都只适合用于弯曲程度较小的曲面,针对船舶表面这种曲面,由于涂料的扩散等作用,所建立的喷涂模型会产生较大误差。因此,对几何形状较为复杂的曲面进行区域分割,使得每个区域的弯曲程度均满足要求。曲面的弯曲程度主要包括两个方面:一是相邻位置的弯曲程度,即局部高斯曲率值的大小;二是整个曲面上的弯曲程度,即整个曲面上的高斯曲率之和的大小。对于弯曲程度不高的曲面要保证这两个方面都不会过大。

该文使用三角片格式表示工件模型,该格式中,工件表面由许多三角片构成,而工件的曲率可以由三角片法向量之间的夹角表示。因此,采用基于区域生长

的双背离角区域分割算法^[12]将其分为几个曲率满足要求的子区域。该算法的基本思想是以一个三角形为中心,向周围三角形延伸,在延伸过程中,确保该区域内所有相邻三角形法向量之间的夹角小于定值 β_1 ;同时,区域内任意两个三角形法向量之间的夹角小于定值 β_2 。如图 3 所示,粗线部分为已合并区域 S ,记待判断三角形为 k ,其法向量为 n_k , k 在区域 S 内所相邻的三角形法向量为 n_i ,区域内任意三角形的法向量为 n_j ,则每个子区域应满足以下要求:

$$S = \{ T_k \mid \arccos^{-1}(n_k, n_i) \leq \beta_1, \arccos^{-1}(n_k, n_j) \leq \beta_2 \} \quad (3)$$

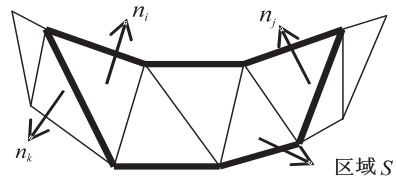


图 3 三角形延伸示意图

2.2 轨迹规划

工件表面各点的喷涂效果除了与模型本身有关外,还和喷枪的移动速度 v 和行程间距 d 有关,这样便可以建立 d 和 v 的优化问题。在考虑喷涂效果时,主要考虑涂层的厚度和涂料的均匀性。因此,以涂层期望厚度和涂料均匀性为目标建立优化目标函数。目标函数如下:

$$\min_{d \in (0, 2R]} E(d, v) = \int_0^d (q_s(x, d, v) - q_{avg})^2 dx / d \quad (4)$$

其中 $q_{avg} = \int_0^d q_s(x, d, v) dx / d$ 为平均厚度。

约束条件为:

$$v \leq v_{max}, 0 \leq d \leq 2R, q_{avg} = q_d \quad (5)$$

在建立了优化问题之后,采用黄金分割法轨迹间距及喷涂速度等喷涂参数进行寻优。

喷涂参数确定后,根据这些参数使用 bounding-box 包围盒算法进行轨迹规划,确定喷枪在待喷涂表面的轨迹。该算法是利用曲面的外包盒进行轨迹规划,首先对曲面建立最小包围盒,选取包围盒的一个面作为特征面,再求取特征平面平行面与曲面的交线,然后在交线上等距采样点,最后连接采样点从而获得轨迹。该算法针对平面工件和曲面工件均可使用,适用范围较广。

不同区域规划得到的轨迹需要进行优化连接成为工件表面的完整路径。该文以得到最短轨迹长度为优化目标,将轨迹组合连接问题建模为一个广义旅行商问题(GTSP),从而将问题转化为寻找一条最优哈密顿通路,该通路能够遍历所有点群(每个点群包含两个点,对应区域分割后每个子区域内轨迹的两个端点),仅访问每个点群两个端点中的任意一个且只能

访问一次,并采用蚁群算法完成喷涂路径的排序和连接。

2.3 中间语言及后置处理

不同厂商的机器人控制器所适用的编程语言一般不同,分属各厂商的离线编程软件只能支持自己的语言^[13]。当需要使用不同机器人进行离线编程时就要购买多个离线编程软件,学习成本、购买成本都比较高。因此,该文设计了中间语言及后置处理子系统,使得本系统最终生成的程序能够直接应用于大多数型号的机器人,从而提高系统的实用性和兼容性。

中间语言子系统^[14-15]的设计参考了工业机器人用户编程指令中华人民共和国国家标准 GB/T 29824-2013,将中间语言分为指令段、伪指令段和数据段三部分,其中指令段是中间语言的主体部分,用于实现各种运动控制功能以及辅助功能,包含运动指令、系统指令、控制指令、运算指令等;伪指令用来描述程序的功能属性及结构信息等;数据段的功能是提供机器人的位置点信息,主要由类型,坐标系,名称,坐标等单元组成。整个中间语言编译系统分为两个部分:词法分析、语法分析,其中词法分析将整个程序的字符序列解析为单词序列,主要合法单词包括关键字、变量名等;语法分析用于判断中间语言程序是否合乎语法规则。

为了使得本系统生成的程序能直接适用于机器人,还设计了后置处理子系统,通过该子系统,经过仿真验证的中间语言程序能够被转换为实际所使用的机器人支持的语言程序,转换后机器人语言程序可通过调用机器人提供的 API 传输到机器人控制器中。

3 仿真实验

为验证上述系统的有效性,采用 C++ 编程语言对 SolidWorks2014^[16] 进行二次开发生成动态链接库,系统总共分为两部分,通用编程与仿真模块以及机器人喷涂作业模块。

针对普通工件,所设计的喷涂场景如图 4 所示,船舶工业中喷涂作业的工业级要求与仿真结果的比较如表 2 所示。设置膜厚为 50 μm ,喷涂仿真所得的实际平均膜厚为 51.94 μm ,标准偏差为 1.53 μm ,覆盖率为 99.80%,均大幅度优于工业要求。

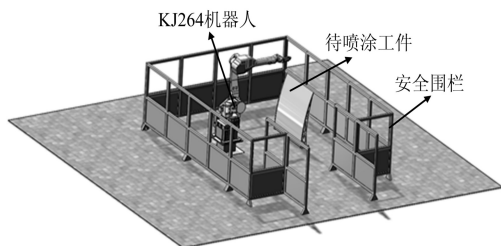


图 4 喷涂场景

表 2 项目需求与仿真结果对比

	平均膜厚 / μm	标准偏差 / μm	覆盖率 /%
工业需求	50	5	>90
仿真结果	51.94	1.53	99.80

此外,按照船舶表面部分区域弯曲程度较大的特点,设计了一个几何形状复杂的工件模型。使用该系统对其进行区域分割、路径规划,具体结果如图 5 所示。图 5(b)为使用双背离角区域分割算法进行区域分割的结果,该工件被分为了四块曲率较小的区域。图 5(c)对区域 1 使用 Bounding-box 算法规划的效果,工件表面的路径即为机器人轨迹,方块点及点上的坐标系体现了机器人的轨迹点以及机器人在该点的位姿。图 5(d)是将各区域轨迹连接组合形成的最终轨迹。

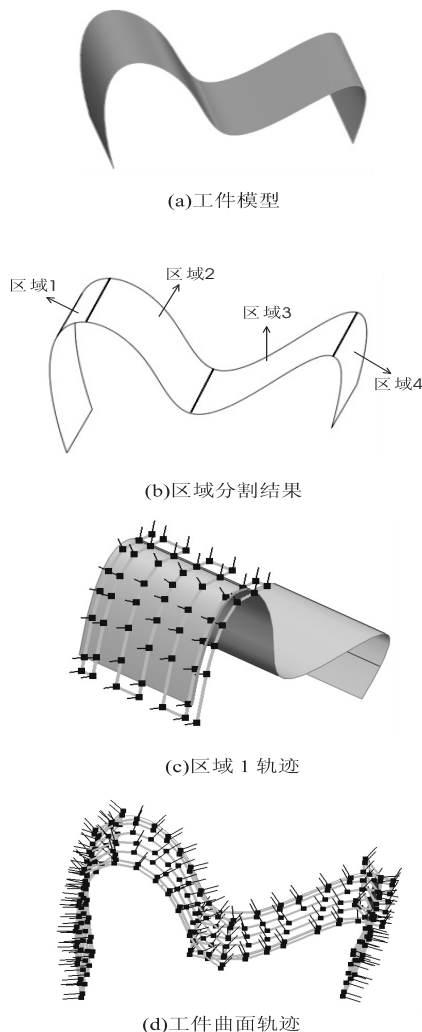


图 5 针对曲率变化复杂的工件的轨迹规划效果

大型船舶工件尺寸较大,设计了长、宽、高为 30 m * 8 m * 8 m 的船舶模型,如图 6(a) 所示。该模型和实际船舶类似,有着船艏、船艉曲率大,中间接近大直面的特点。仿真实验结果如图 6 所示,由于该工件较大,完

整的轨迹图中的轨迹过于密集,因此图6(c)选取了区域1及区域2的部分轨迹展示实验结果。

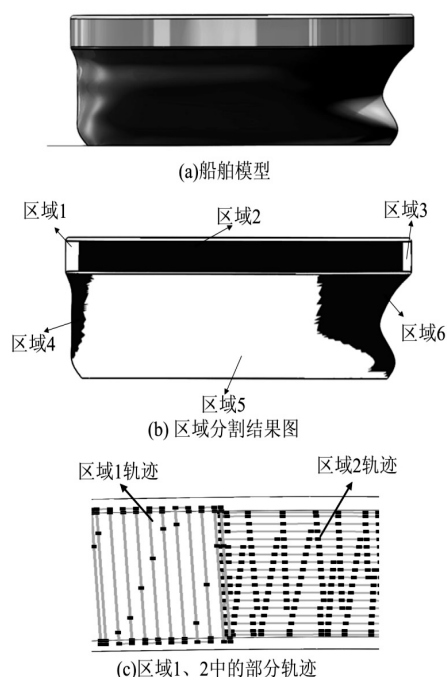


图6 针对船舶外立面的轨迹规划结果

由此可以看出,所提出的系统针对不同工件均得出了正确的喷涂路径,且喷涂效果远高于工业需求,证明了该方法的有效性。

4 结束语

针对大型船舶喷涂作业设计了完整的离线编程与仿真系统,对非球形手腕机器人运动学逆解、区域分割、轨迹规划、中间语言及后置处理进行了详细的研究。在此基础上基于SolidWorks和Visual Studio开发了针对大型船舶表面喷涂作业的离线编程与仿真软件。将该软件应用于普通工件、弯曲程度较大的工件、外形复杂的船舶表面等不同工件,均能生成正确的路径,达到了提高喷涂效率、改善喷涂效果的目的,验证了该系统的有效性和通用性。

针对船舶工件,船艏船艉连接处、区域分割后各子区域连接处的膜厚控制还需做进一步研究。

参考文献:

- [1] HELLIO C, YEBRA D. Advances in marine antifouling coatings and technologies[M]. Oxford, UK: Woodhead Publishing, 2009.
- [2] 乔新义, 陈冬雪, 张书健, 等. 喷涂机器人及其在工业中的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2016, 19(8): 53-55.
- [3] CHEN H, FUHLBRIGGE T, LI X. Automated industrial robot path planning for spray painting process: a review[C]// 4th IEEE international conference on automation science and engineering. Washington D C: IEEE, 2008: 522-527.
- [4] 林义忠, 刘庆国, 徐俊, 等. 工业机器人离线编程系统研究现状与发展趋势[J]. 机电一体化, 2015, 21(7): 8-10.
- [5] ABB Robotics. IRC5 industrial robot controller[EB/OL]. 2015. www.abb.com/robotics.
- [6] 蔡自兴. 机器人学[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] PEIPER D L. The kinematics of manipulators under computer control[D]. CA: Stanford University, 1968.
- [8] TABACZYNSKI M. Jacobian solutions to the inverse kinematics problem[D]. Boston: Tufts University, 2006.
- [9] FILIPOSKA M Z, DJURIC A M, ELMARAGHY W. Complexity analysis for calculating the Jacobian matrix of 6DOF reconfigurable machines[J]. Procedia CIRP, 2014, 17: 218-223.
- [10] 张明淳. 工程矩阵理论[M]. 南京: 东南大学出版社, 1995.
- [11] 林焰, 衣正尧, 李玉平, 等. 大型船用坞内外板涂装机器人[J]. 机器人, 2018, 40(1): 115-128.
- [12] 樊帅权. 喷涂机器人离线轨迹规划系统的研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [13] NETO P, PIRES J N, MOREIRA A P. CAD-based off-line robot programming[C]// IEEE conference on robotics, automation and mechatronics. Singapore: IEEE, 2010: 516-521.
- [14] 张连新, 高洪明, 张广军, 等. 混合式弧焊机器人语言编译解释系统[J]. 焊接学报, 2006, 27(10): 101-104.
- [15] MUHE H, ANGERER A, HOFFMANN A, et al. On reverse-engineering the KUKA robot language[C]// 1st IEEE/RSJ international workshop on domain-specific languages and models for Robotic systems. Hamburg: IEEE, 2010: 217-224.
- [16] 王文波, 涂海宁, 熊君星. SolidWorks 2008 二次开发基础与实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.