

三维可视化的喷涂机器人离线轨迹规划系统

樊帅权,周 波,孟正大,戴先中

(东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室,江苏 南京 210096;
东南大学 自动化学院,江苏 南京 210096)

摘要:传统的喷涂机器人采用人工示教的方式生成喷涂轨迹,该方法依赖工人经验,规划时间长,且不能产生最佳轨迹。为克服这些缺陷,提高喷涂机器人的喷涂质量与喷涂效率,文中通过对喷涂机器人喷涂过程建模、喷涂路径规划、喷涂过程仿真进行深入的研究与分析,建立了喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统整体框架。在此基础上,采用MFC和OpenGL开发了完整的离线轨迹规划与仿真系统,该系统能够针对不同的工件生成正确的轨迹,并能够进行三维可视化的仿真及效果显示。

关键词:喷涂机器人;轨迹规划;OpenGL;仿真

中图分类号:TP242.2;TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)09-0013-05

Off-line Path Planning and Simulation System of Spray Painting Robot Based on 3D Visualization

FAN Shuai-quan, ZHOU Bo, MENG Zheng-da, DAI Xian-zhong

(Ministry of Education Key Laboratory of Measurement and Control of CSE, Southeast University,
Nanjing 210096, China;
School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The traditional robot's paths can only be generated by teaching which is time-consuming and cannot produce the best trajectory. In order to overcome these shortcomings and improve the coating quality and efficiency, through studying of gun modeling, methods of path planning and the simulation of spraying process, the structure of the off-line trajectory planning and simulation system has been established. Based on these researches, adopting MFC and OpenGL, a complete off-line path planning and simulation system has been developed. This system can generate correct trajectories according to different surfaces and simulate the trajectory with 3D visualization.

Key words: spray painting robot; path planning; OpenGL; simulation

0 引言

随着汽车、电器、家具等制造业的快速发展,我国对于喷涂机器人的需求日益强烈,而喷涂机器人的喷枪轨迹直接影响着机器人对工件的喷涂效果。其表面的喷涂效果则直接影响着这些产品的质量,产品的色泽在一定程度上取决于涂层的厚度,而涂层厚度的不一致还会造成产品表面溶剂突起、不光洁,甚至在涂层过厚的地方出现爆裂倾向。在传统的喷涂机器人轨迹规划编程中,使用最普遍的方法是“人工示教法”,这是一种轨迹记忆再现的路径规划方法,其简单易行,但

存在众多缺点^[1],该方法产生的喷涂轨迹严重依赖工人经验,规划周期长,且机器人在示教期间不能用于生产,同时操作工人也要处于有害的工作环境之中。

随着对进一步提高产品质量和生产效率的需求,以及人们对环境保护、工人保护的重视,研究人员开始研究喷涂机器人离线编程方法与仿真技术。1986年,A. Klein^[2]最先将离线编程技术应用于喷漆机器人,并提出基于CAD的喷漆机器人离线编程系统。之后,Goodmans^[3],Freund^[4]等针对喷涂建模问题,提出了列表法、双高斯涂层分布模型,国内的张永贵^[5]、赵德安^[6,7]等也相继对喷涂模型进行了较深入的研究。Chen^[8,9],Asakawa^[10],Atkar^[11],赵德安^[6,7]等在喷涂建模的基础上对喷枪的路径规划进行了研究,提出了bounding-box、过喷等多种路径规划方法。

上述学者主要是针对喷涂机器人系统中喷涂建模和路径规划的算法进行了深入的研究,提出了一些解

收稿日期:2011-12-28;修回日期:2012-04-05

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(2010ZX04008-041)

作者简介:樊帅权(1987-),男,河南平顶山人,硕士研究生,研究方向为工业机器人;孟正大,教授,硕士生导师,研究方向为机器人运动控制、机器人智能控制等;戴先中,博士,教授,博士生导师,研究方向为机器人控制、神经网络软测量与控制等。

决问题的方法。随着喷涂机器人研究的深入和计算机图形技术的发展,喷涂机器人三维图形仿真系统已经成为机器人设计和研究中一个必不可少的工具。文中在对喷涂机器人离线轨迹规划算法与仿真技术进行研究的基础上,给出了基于 OpenGL 建立离线轨迹规划与仿真系统的总体结构与具体实现方法。通过该离线轨迹规划与仿真系统可以快速、高效地进行机器人喷涂轨迹的规划以及喷涂效果的演示与验证,这在很大程度上克服了“人工示教法”的缺点,可以进一步提高喷涂机器人的喷涂效率,获得最佳喷涂效果。

1 轨迹规划与仿真系统

喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统的主要功能是:针对不同的待喷涂工件曲面,提取喷涂曲面的几何特征,通过分析和实验建立合适的喷涂模型,在此基础上设计喷涂机器人喷枪路径规划方法以及轨迹优化方法,实现喷涂机器人的离线轨迹规划系统的开发,并能 3D 可视化仿真喷涂轨迹、显示喷涂效果,从而达到优化喷涂效果、提高喷涂效率和节省喷涂成本的目标。将喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统按照功能可以划分成以下模块:工件模型导入及预处理模块、喷涂建模模块、路径规划模块、轨迹优化模块及喷涂性能仿真模块。

系统整体结构图如图 1 所示。

1.1 工件模型导入与预处理

在喷涂机器人轨迹规划与仿真系统中,首先就是将工件 CAD 模型导入到软件之中,并进行相应的预处理。工件 CAD 数据模型有多种格式,在这里对工件采用三角化网格近似模型,也即 STL 格式。该数据格式可以处理任意复杂形式的工件表面,具有很高的通用性,且其精度可通过对三角网格尺寸的控制来调定,同时当前的主流绘图建模软件都支持该种模型的文件输出。在该模块中,对于导入的 CAD 工件模型,实现各个角度的三维显示,并且能通过鼠标和键盘实现模型

的平移和旋转等交互操作。同时完成对导入的工件的三角网格模型进行处理,提取三角网格的几何特征,为后面的路径规划和轨迹优化做准备。

1.2 喷涂过程建模

喷涂过程建模是喷涂机器人离线轨迹规划系统重要的组成部分,喷涂模型的好坏直接关系着仿真结果的好坏与准确性。喷涂过程建模是通过分析涂料流量、雾化气压、喷炬张角、喷涂距离等喷涂参数对喷涂过程的影响,建立涂层累积速率模型;结合现场喷涂实验,进行模型参数的辨识,以及模型自身的检验和修正。目前比较常用的模型主要有抛物线模型、三次曲面模型、 β 曲线模型、高斯分布模型、分段函数模型等。在软件实现方面该模块主要是用来实现对喷涂模型的各项参数(如喷枪类型,喷枪高度,喷枪速度等)的设置,导入已有的喷涂模型与修改模型,同时可以根据参数设置与实验的测量数据,实现对这些数据的拟合,完成新的喷涂模型的建立。

1.3 喷枪路径规划

路径规划就是根据喷涂参数以及喷涂曲面确定喷枪在表面上的行走路径,这里首先需要确定喷枪的行程间距 d 和喷涂速度 v ,可以根据喷涂要求使用黄金分割法确定。在获得行程间距 d 和喷涂速度 v 后,便可以对自由曲面进行路径规划。一种比较好的路径规划方法是 bounding-box 方法,其主要思想是首先对曲面建立一个包围盒,然后生成与包围盒长边平面平行的一组平面,这些平面将与曲面产生一组交线,在交线上等距离采样,最后将采样点连接即构成喷枪路径。

1.4 喷枪轨迹优化

在喷涂路径规划的基础上,结合喷涂模型、喷涂工艺要求等,建立喷枪轨迹优化问题模型。首先是约束条件的建立,考虑喷涂速度的限制、涂层偏差范围的限制、机器人本身的限制等因素,建立轨迹优化问题的约束条件。然后确定最优化目标,可以是最短喷涂时间、涂层均匀性最好、涂层期望厚度等,或者是它们的组

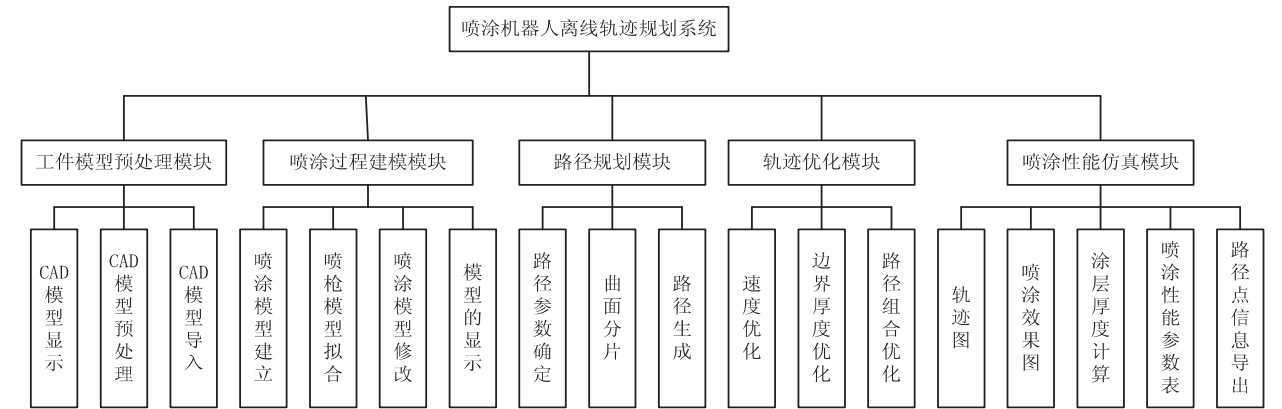


图 1 喷涂机器人离线轨迹规划系统功能划分图

合,将轨迹优化建模成有约束的单目标或者多目标优化问题。对于单目标优化问题,通过有限元近似方法进行求解,对于多目标优化问题,则使用线性加权和法、极大极小法、理想点等方法进行求解。

1.5 喷涂性能仿真

这个模块是喷涂机器人轨迹规划与仿真系统最后的一个模块,是展现轨迹规划效果的重要部分。该模块主要对前面生成的轨迹进行仿真,实现涂层累积和喷涂轨迹规划的三维可视化仿真效果演示,仿真对象由平面、规则曲面一步步过渡到自由曲面等复杂工件表面。该模块采用 OpenGL 技术实现 3D 可视化的显示,显示结果主要包括喷涂轨迹图,曲面喷涂效果厚度色彩图,曲面喷涂效果厚度三维图,曲面喷涂厚度截面图等。

2 轨迹规划与仿真系统软件设计

2.1 整体架构

喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统由喷涂机器人离线轨迹规划与仿真软件、Microsoft Windows XP Professional 操作系统、Visual C++/MFC 开发环境、OpenGL 等组成。结合软件运行的环境,建立喷涂机器人离线轨迹规划系统软件架构,使软件既满足功能需求的要求,又能最大程度地发挥运行环境和操作系统平台的优势。

喷涂机器人离线轨迹规划系统的整个架构如图 2 所示:

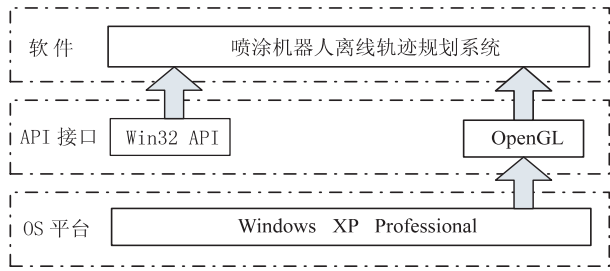


图 2 喷涂机器人离线轨迹规划系统架构图

2.2 喷涂机器人离线轨迹规划系统流程

喷涂机器人离线轨迹规划系统主要实现喷涂过程的建模、工件 CAD 模型的导入、喷枪路径规划、喷枪轨迹优化、喷涂仿真等功能,其系统实现流程图如图 3 所示。

3 仿真系统显示技术

3.1 OpenGL 介绍

OpenGL(全写 Open Graphics Library)是最为广泛接纳、性能卓越的三维图形接口标准,它定义了一个开放的、跨编程语言、跨平台的编程接口。OpenGL 是个与硬件平台无关的软件接口,它独立于视窗系统和操

作系统,可以在不同的平台如 Windows、Unix、Linux、MacOS 等之间进行移植,以它为基础开发的应用程序也可以十分方便地在各种平台间移植。微软公司也参与了 OpenGL 标准的制定,这使得 OpenGL 可以很好地与 Visual C++相结合,使得软件开发变得很简便,同时易于实现软件算法与图形算法的结合,保证算法的正确性和可靠性。OpenGL 具有众多功能,包括:图形建模、坐标变换、颜色模式设置、光照与材质设置、纹理映射、位图显示与图像增强、双缓存技术、选择与反馈等。这些功能使得开发高性能、高视觉表现力的图形软件变得十分容易。

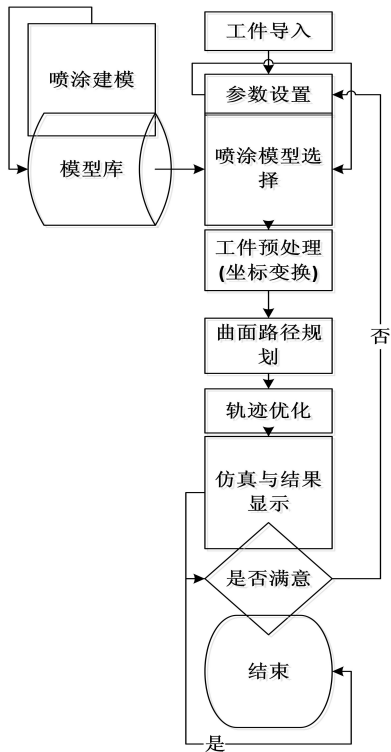


图 3 系统流程图

3.2 OpenGL 渲染技术

OpenGL^[12-14]渲染过程又称为渲染流水线。主要包括显示列表、求值器、顶点操作、图元装配、像素操作、纹理装配、光栅化、片元操作、帧缓冲等过程。在使用 OpenGL 绘图之前需要设置像素格式(如像素缓存模式,颜色模式,颜色位数,深度缓存的位数等),创建渲染场境,以及设置渲染场景的光照、颜色和物体的材质等,在绘制结束时,清除渲染场境,处理视图窗口尺寸变化,屏幕显示等。

喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统是采用面向对象的编程技术(OOP)设计与开发的,该设计方法符合人们对世界的认知习惯,代码可读性好、可维护性强、可重用性高。为了更方便地使用 OpenGL,这里对 OpenGL 的相关操作也采用面向对象的方式,将其封装成类,主要包括 CCamera 类和 COpenGLRC 类。CCam-

era 类主要完成 OpenGL 取景方面的功能,包括视点坐标系的确定、视图变换(包括视点变换与模型变换)、投影变换(正交投影和透视投影)、视口变换等。通过 CCamera 可以方便地设置视点、视线方向,定义视景物,修改视口尺寸等。COpenGLRC 则主要封装了 OpenGL 环境设置以及 OpenGL 的绘图功能,包括 OpenGL 像素格式的设置、创建和设置渲染场景、设置光源、设置材料属性、设置当前色和背景色、窗口尺寸变化管理、绘图前相关准备操作以及绘图结束后的缓存处理操作等。通过 COpenGLRC 可以实现和管理与 Windows 窗口的关联,完成取景操作,绘制基本图形,设置光源和颜色以及鼠标拾取等功能。

3.3 仿真实体构建

在喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统中,需要对场景、工件实体、曲面、轨迹、喷涂效果等进行绘制。本系统需要绘制的图形种类众多,但分析所有需要绘制的图形,可以将其抽象成一个可以绘制和操作的基本几何实体,在 C++使用抽象类 CEntity 来表示。对于具体的绘制实体 CSTLModel、CSurface、CLine、CTrajectory、CPaintPoint、CTriChip、CSurfaceThick 等都由 CEntity 派生获得。对于复杂的物体则分解成简单的物体,通过对简单物体的渲染完成复杂物体的绘制,其基本结构是:基本原子模型→复杂模型。其类结构图如图 4 所示。

在 CEntity 中定义纯虚函数 virtual void Draw() = 0, CSTLModel、CSurface、CLine、CTrajectory、CPaintPoint、CTriChip、CSurfaceThick 等具体模型类继承并实现 Draw() 这个虚函数。这样通过 C++ 中的虚函数机制,在绘图操作中通过对显示链表 pDisplayEntityList 遍历,调用 CEntity 的 Draw() 函数,就可以调用具体实体模型类的 Draw() 函数,实现整个仿真场景中不同工件、曲面、轨迹等的渲染。

```
While( pos! =NULL)
{ pEntity=pDisplayEntityList->GetNext( pos) ;
pEntity->Draw( );}
```

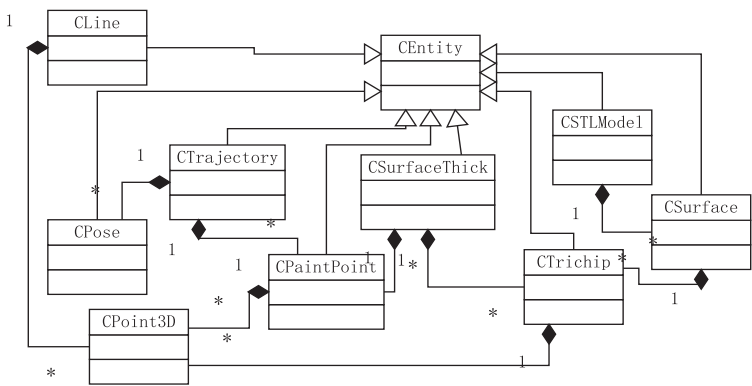


图 4 三维模型实体类关系图

4 仿真效果

前面对喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统的开发进行了详细的说明,这里在 Windows XP 操作系统下,使用 VC++6.0 开发平台,基于 MFC 和 OpenGL 技术对软件进行开发。以机器人变位机箱体作为喷涂对象,对其进行离线轨迹规划与喷涂效果仿真。表 1 是喷涂仿真的相关性能指标,图 5 所示是仿真的喷涂效果图。

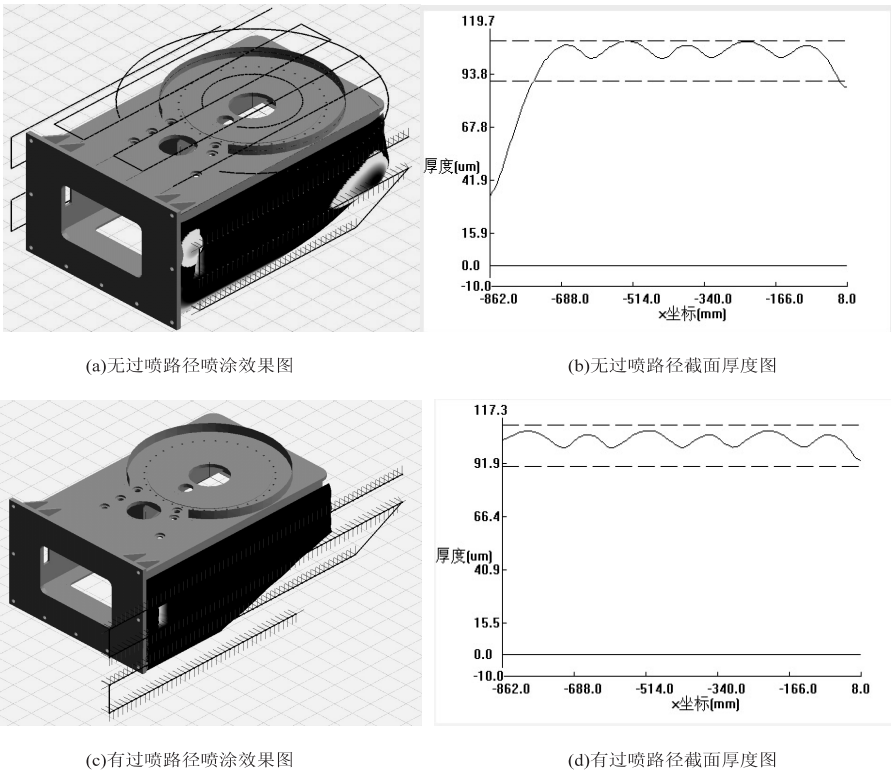


图 5 喷涂仿真效果图

图 5(a),(b) 为无过喷路径的仿真结果,图 5(c),(d) 为有过喷路径的仿真结果。图中实体即为需要喷涂的对象,线条为喷涂轨迹,图中显示出了每一个喷枪

```
CEntity * pEntity=NULL;
POSITIONpos=pDisplayEntityList->GetHeadPosition( );
```

轨迹点及其对应的坐标系,图(a),(c)中正面的三维色彩图是喷涂的效果图。从图中可以看出,该系统能够很好地根据工件的特征生成相应的轨迹,对于曲面、平面、圆弧面都正确地生成了轨迹;并且能够给出仿真的效果图,图(a)中所示是未采用过喷路径的喷涂方式,可以看到在路径行程拐点的位置,涂层厚度较厚,喷涂均匀性不好;图(c)中是采用过喷路径的方式进行的喷涂,可以看出在整个喷涂面上都获得了很好的喷涂效果。图(b)是无过喷路径的厚度截面图,可以看到在边界处厚度均匀性不好,图(d)是采用有过喷路径的厚度截面图,可以看出在整个喷涂面上,喷涂效果都很好。

从表 1 中,也可以得出有过喷路径比无过喷路径有更好的均匀性。

表 1 喷涂仿真性能指标

路径方式	期望厚度/ μm	平均厚度/ μm	最大厚度/ μm	最小厚度/ μm	均方差
无过喷路径	100	100.16	195.61	34.26	29.27
有过喷路径	100	102.79	107.75	94.23	3.50

5 结束语

文中对喷涂机器人的喷涂过程建模、喷涂路径规划等方面进行了详细的研究,设计了喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统的基本建模方法、路径规划算法等,并确立软件系统的整体结构,在此基础上利用 MFC 和 OpenGL 技术开发了喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统。该仿真系统能够正确地对导入的不同工件生成正确的喷涂轨迹,并能够 3D 可视化仿真喷涂轨迹,对仿真结果进行图形化显示,从而达到优化喷涂效果、提高喷涂效率和节省喷涂成本的目标。但是该软件生成的轨迹是匀速的轨迹,对于自由曲面等喷涂面,变速喷涂将能达到更好的喷涂效果,这是今后研究的一个重点方向。

参考文献:

[1] 陈伟. 喷涂机器人喷枪轨迹优化研究[D]. 镇江:江苏大学,2007.

[2] Klein A. CAD-based off-line programming of painting robots

+++++

(上接第 12 页)

[9] Srivastava J,Cooley R,Deshpande M. Web Usage Mining: Discovery and Applications of Usage Patterns from Web Data[J]. ACM SIGKDD Explorations Newsletter,2000,1(2):12-23.

[10] 彭鸿儒,余小鹏. Web 客户端用户行为数据收集研究[J]. 软件导刊,2011,10(2):155-157.

[J]. Robotica,1987(5):267-271.

[3] Goodman E D,Hoppensteradt L T W. A method for accurate simulation of robotic spray application using empirical parameterization[C]//Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento,CA:[s. n.],1991:1357-1368.

[4] Freund E,Rokossa D,Rossmann J. Process-oriented approach to an efficient off-line programming of industrial robots[C]//Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE on Industrial Electronics Society. Aachen:[s. n.],1998:208-213.

[5] 张永贵,黄玉美,高峰,等. 喷漆机器人空气喷枪的新模型[J]. 机械工程学报,2006,42(11):226-233.

[6] 赵德安,陈伟,汤养. 面向复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2007,28(5):425-429.

[7] 王振滨,赵德安,王 斌,等. 喷漆机器人离线编程系统探讨[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版),2000,21(5):78-82.

[8] Chen Heping,Sheng Weihua,Xi Ning. Automated robot trajectory planning for spray painting of free-form surfaces in automotive manufacturing[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotic & Automation. Washington, DC:[s. n.],2002:450-455.

[9] Chen Heping,Xi Ning,Sheng Weihua,et al. General framework of optimal tool trajectory planning for free-form surfaces in surface manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering,2005,127(2):49-59.

[10] Asakawa N,Takeuchi Y. Teachingless spray-painting of sculptured surface by an industrial robot[C]//Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque,NM:[s. n.],1997:1875-1879.

[11] Atkar N P,Howie C,Alfred R A. Towards optimal coverage of 2-dimensional surfaces embedded in IR3:choice of start curve[C]//Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas,Nevada:[s. n.],2003:3581-3587.

[12] 王清辉,王 彪. Visual C++CAD 应用程序开发技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[13] OpenGL 编程指南[M]. 邓郑祥译. 第 4 版. 北京:人民邮电出版社,2005.

[14] 许万荣,樊自田. OpenGL 中交互式任意旋转三维场景的实现[J]. 计算机应用,2006,26(6):147-148.

+++++

[11] Han Jiawei,Kamber M. 数据挖掘概念与技术[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

[12] 林郎碟,王灿辉. Apriori 算法在图书推荐服务中的应用与研究[J]. 计算机技术与发展,2011,21(5):22-25.

[13] 张文东,易轶虎. 基于兴趣相似性的 Web 用户聚类[J]. 山东大学学报,2006,41(3):54-57.