

OpenGL在增材制造数据处理系统中的应用研究

冯妙婷^{1,2}, 孟月梅^{1,2}, 司守钰^{1,2}

(1. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024;

2. 数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 介绍了增材制造技术,分析了OpenGL的基本原理,论述了OpenGL在增材制造数据处理系统的图形显示与操作、几何交互操作功能等方面的实现方法,并在电子束熔丝成形数据处理系统中进行了应用验证。利用OpenGL图形库,使数据处理系统的准确性、实用性和交互性得到了提高。

关键词: OpenGL; 增材制造; 数据处理; 图形显示; 轮廓线修改

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.13/24.071



冯妙婷

工学硕士,毕业于北京航空航天大学,中航工业北京航空制造工程研究所工程师,主要研究方向有数字化制造、计算机辅助智能制造等。

增材制造技术是将计算机的图形处理、数字化信息以及控制、机电技术和材料技术等多项高新技术的优势集于一体的新技术,主要分为喷射成形、光敏聚合物固化成形、材料挤

出成形、激光粉末烧结成形等。利用此技术制造的聚合物非金属零件和高性能复杂结构金属零件正在航空航天、国防和其他高端工程领域获得广泛应用。以目前普遍应用的激光粉末烧结制造工艺为例,先将CAD系统中构建的三维模型按一定高度进行切割,即对其进行分层切片,得到各层截面的轮廓,并生成各层激光烧结路径,计算机据此信息控制激光束有选择性地烧结一层接一层的粉末材料,形成一系列具有一个微小厚度的片状实体,在烧结过程中聚合、粘结使其逐层堆积成一体,便可以制造出所设计的新产品样件、模型或模具^[1]。

增材制造数据处理系统概况

数据处理系统是增材制造的重要组成部分之一,三维模型的分层切片及加工路径的生成是系统的重要组成部分,这些功能对于加工效率、加工质量具有决定性影响。

国内外此类软件多种多样。

国外有美国 Solid Concept 公司的 SolidView、POGO 公司的 STLManger、比利时 Materialise 公司的 Magics 等。国内有清华大学的 LARK 数据处理系统、华中科技大学的 HRPS 软件等。其中以比利时 Materialise 公司开发的 Magics 软件最为杰出,该软件提供了模型修复、分层、路径规划和支撑生成等功能。但这些软件系统仍存在一些问题,比如价格昂贵、二次开发难,在分层处理、路径规划方面可操作性不强,没有提供层片轮廓、加工路径的局部修改功能等。在工艺试验阶段,可能需同时对不同工艺参数值、不同分层厚度、不同加工路径规划方法进行试验,也可能对部分数据进行适当调整,以便于成形结果的比较,快速获取更加合理的工艺方法。另外,对于一些增材制造方法,如电子束熔丝成形工艺,其加工路径行距较大,加工路径分布的疏密程度直接关系到零件最终的成形质量。针对此类工艺,其层片轮廓、加工路径的局部修改就成为数据处理系统

里必不可少的操作工具。由此可以看出,为缩短工艺试验时间,提高增材制造零件质量,针对层片轮廓、加工路径等几何的局部修改就显得尤为重要。

增材制造数据处理系统的制造数据生成主要过程如图 1 所示。系统通常针对 STL 格式的零件模型进行处理。该类格式的文件用三角网格来表达三维 CAD 模型。由 CAD 系统设计零件模型,并生成 STL 格式文件;数据处理系统读取 STL 零件模型,通过建立模型拓扑结构、分层处理、区域划分、路径规划等功能模块,生成增材制造所需的加工路径文件,最终输出设备所需的加工程序文件。在数据处理过程中,会产成一系列的中间数据文件,包括层片轮廓、区域轮廓和加工路径等,每一类数据描述信息不同,且数据量非常大。为了用户能够方便、直观地了解各类数据的构成、形状、位置关系等,需要有图形接口支持不同种类数据的显示与操作。因此,图形的显示与操作是数据处理系统中不可或缺的重要组成部分。增材制造数据处理系统的总体结构如图 2 所示,针对不同数据类型需提供相应的几何显示及操作功能。

OpenGL (Open Graphics Library, 开放性图形库)具有强大的图形显示与处理功能,是以 SGI 的 GL 三维图形库为基础制定的一个开放式三维图形库。OpenGL 独立于硬件设备、窗口系统和操作系统,可移植性高,主要提供了各类几何显示、光照处理、视图变换、拾取操作等功能,已经在军事、航天、医学等领域得到了广泛的应用^[2]。OpenGL 图形工具所具备的特性与功能,能够完全满足增材制造数据处理系统中对于不同类型数据的几何图形显示与局部修改操作工具的所有需求^[3]。因此,充分利用 OpenGL 所提供的工具与特性,可实现数据处理系统所需的各

项功能。

数据处理系统中不同类型显示与操作的实现

在增材制造数据处理系统中,利用 OpenGL 提供的显示基本图元函数,通过设置图元类型(如点、线段、折线、三角形等),实现不同类型数据的图形显示^[4]。系统运用 OpenGL 提供的显示列表功能实现显示数据类型的自动调整。系统为每种数据类型设置一个显示列表,为每个显示列表命名,根据名字将其快速调用到命令缓冲区进行执行^[5]。为了便于用户及时了解不同数据类型的情况,需同时显示多个列表。如指定层数,

可同时显示零件 STL 模型、指定层的层片轮廓、区域轮廓以及加工路径等,具体如图 3 所示。

数据处理系统中显示几何的交互操作

为实现几何局部修改,数据处理系统必须提供所显示几何的交换操作工具。在几何交互操作实现中,主要包括几何图形拾取与几何数据操作两部分。几何图形拾取是从当前显示的图形几何中选取所需修改几何的过程,而几何操作主要是对选择几何进行局部增加、修改、删除等操作。

针对层片轮廓、加工路径等几何

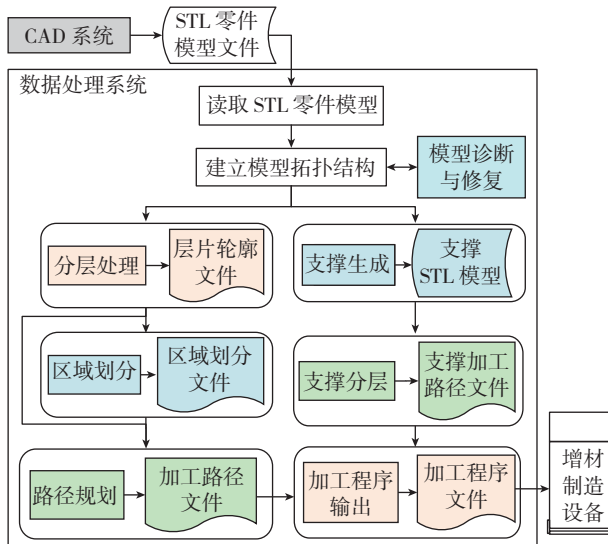


图1 增材制造数据处理系统的制造数据生成流程

Fig.1 Manufacturing data generation process of additive manufacturing data processing system

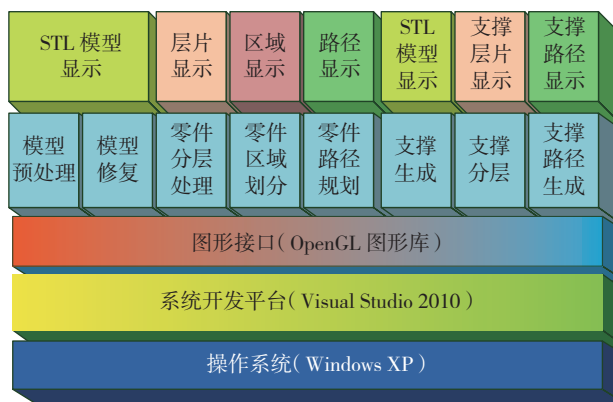


图2 增材制造数据处理系统总体结构

Fig.2 Overall structure of additive manufacturing data processing system

数据的局部修改,系统需根据应用需求提供多种类型的轮廓线交换操作方式。由于增材制造工艺的特殊性,其层片轮廓、加工路径等可简化为平面几何^[6]。本文就平面几何交互操作实现方法进行介绍。

平面几何交互操作功能的主要实现流程图如图4所示。

针对平面几何交互操作,首先提取数据文件中当前层所需修改的几何数据(如当前层所有轮廓或加工路径等),并创建几何数据链表,根据用户选择几何或位置对几何数据实现局部修改。

1 平面几何的拾取

1.1 几何拾取的设计与实现

利用 OpenGL 的拾取原理,在增材制造数据处理系统中实现几何及位置点的拾取。以轮廓线拾取为例,首先读取数据文件中当前层所有的轮廓线,在图形区显示并构建轮廓线链表。链表结构如图5所示。

链表节点包括了构成轮廓线的点数组、标记和指向下一条轮廓线节点的指针。其中,标记用于区分该条轮廓线类型,本文所述轮廓线可为层片内/外轮廓、区域内/外轮廓、加工路径或者新增轮廓线等。

根据上述原理,将鼠标拾取位置转换为模型坐标系下的点(称为拾取点)^[7]。由于零件形状的复杂性,会存在多条轮廓线。系统在处理拾取点的过程中,既要考虑使用者操作的方便性,又要能够精确获得所拾取的轮廓线。因此,系统可设定选择误差范围 ϵ ,并计算拾取点到当前所有显示轮廓线的距离,得到最小距离所在轮廓线。当该最小距离小于或等于 ϵ 时,该轮廓线即为所拾取的轮廓线。通过这种处理方式,可有效避免误操作,并可提高几何拾取效率和质量。

如图6所示,当前图形区有两条轮廓线 PolyLine1 和 PolyLine2, PointA 为 PolyLine2 的拾取点。系统设定拾取误差值 $\epsilon=0.01\text{cm}$,

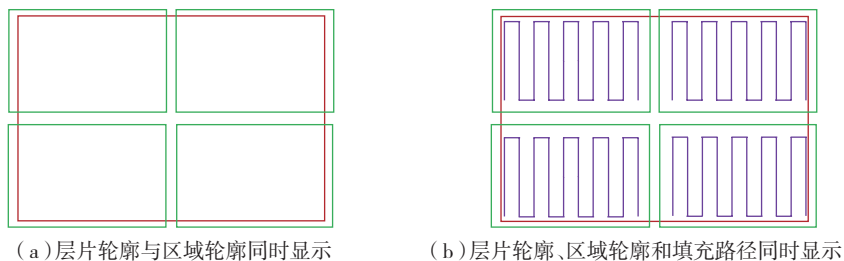


图3 多种类型数据的同时显示

Fig.3 Synchronous display of different data

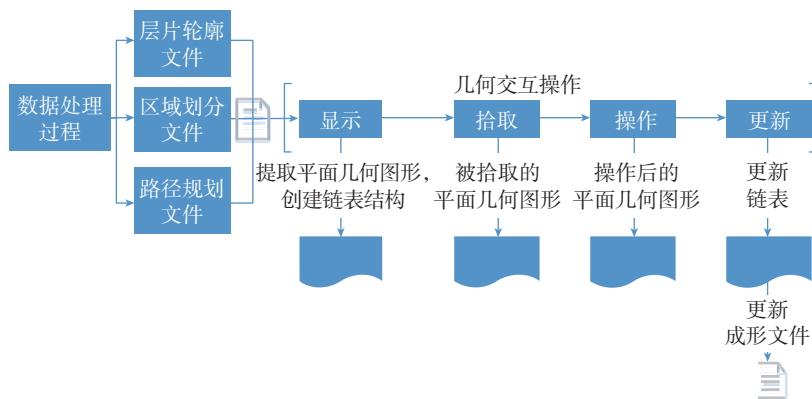


图4 平面几何交互操作实现流程图

Fig.4 Flowchart of plane geometry interworking

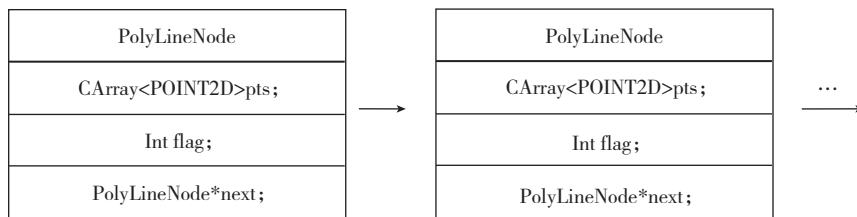


图5 轮廓线链表结构

Fig.5 List structure of contours

PointA 到 PolyLine1 的最短距离 $d_1=1.65\text{cm}$,到 PolyLine2 的最短距离 $d_2=0.008\text{cm}$, $d_2 \leq \epsilon$,所以系统确认拾取了 Polyline2。同时,系统需对所拾取点的坐标进行保存,用于后续的几何局部修改。

为实现多种轮廓线局部修改方法,在拾取方式上也应提供多种方式,如轮廓线任意段拾取、轮廓线指定线段拾取或轮廓线上开口选择等。轮廓线任意段拾取是指通过两个拾取点,确定轮廓线拾取部分;指定线段拾取是指通过拾取点确定拾取的轮廓线段,即折线中距离拾取点最近的那一段;轮廓线开口是指在轮廓线上拾取一点,给定长度,则系统可

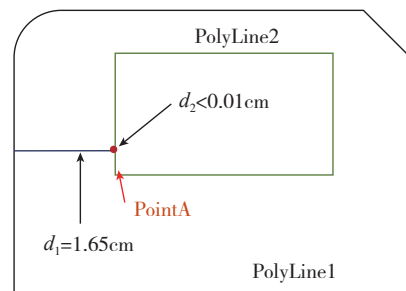


图6 拾取示意图

Fig.6 Schematic of pickup

根据拾取点及长度在轮廓线形成一开口。具体见图7。

1.2 几何拾取结果显示

为便于观察,系统需实时、高亮显示所拾取的几何。以轮廓线任意段拾取方式为例,结果见图8,红色

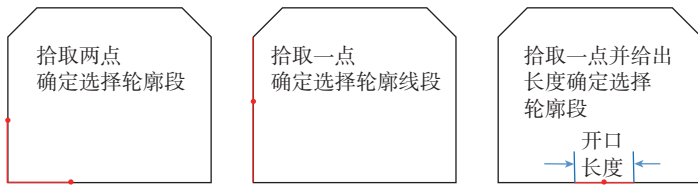


图7 拾取方式示意图

Fig.7 Schematic of pickup methods



图9 不封闭轮廓线任意段拾取结果

Fig.9 Pickup result of not closed contour

线段为拾取两点后获得的折线段,同时给出两个选择点坐标。为便于后续几何处理,若拾取点顺序与轮廓线方向相反则对选择点进行交换,以确保选取轮廓线段与轮廓线方向一致。

轮廓任意段拾取完成后,原轮廓线被划分为被拾取和未拾取两部分。如果轮廓线是封闭的,则取长度相对短的部分为被拾取部分;如果为不封闭轮廓,则可能被分成3部分或2部分,如图9红色部分为所选择部分。轮廓线局部修改将对被拾取轮廓线段处理,最后形成新的轮廓线。

2 轮廓线局部修改

为了实现准确的、交互性良好的轮廓线局部修改功能,可通过创建新折线代替被选择轮廓线实现轮廓线的修改。创建新折线也可提供不同方式,如通过给出X、Y坐标偏移量构建新轮廓点或基于屏幕选择点添加折线方式实现轮廓线局部修改。

利用给出X、Y偏移量方式修改轮廓线,可用于分层处理、区域划分和加工路径规划轮廓线的局部修改,首先确定基点,再以此为基础,给定X、Y坐标偏移量;接着以上一个点为基点生成新点,最终构成新折线,并由此折线替代被拾取轮廓线部分,与轮廓线其他部分组成新的轮廓线。

基于屏幕选择点修改轮廓线主要针对加工路径进行局部修改。对于不封闭轮廓,除了上述修改轮廓中

间部分,还可以对轮廓线的首尾线段进行删除或者添加折线。基于屏幕选择点的轮廓线修改,采用添加折线方式实现^[8-9]。轮廓线修改时,可将折线添加方式设计为皮筋线操作方式^[10]。

以偏移量修改方法为例,根据拾取的起始点或当前点,给出坐标值偏移量生成新点。同时,为了方便用户操作,在拾取与修改过程中在图形显示区显示新点,并给出点的坐标值,使用户及时、直观地了解所创建点的详细信息。

修改过程中,所创建的新点为红色点,黄色表示被拾取部分(图10),修改完成后,红色点组成的折线替换黄色线段。完成修改后的轮廓线如图11所示。

应用验证

利用本文所述实现方法,在基于电子束熔丝成形数据处理系统中,开发了图形显示、视图变换、几何交互操作等功能,实现了STL模型、层片轮廓、加工路径等的显示以及相关几何的局部修改,使得系统实用性更强,操作更加灵活。电子束熔丝沉积的基本单位是熔积“焊缝”,三维实体均由若干条熔积“焊缝”根据规划的路径堆积而成,每一条熔积“焊缝”的成形和质量都会对成形零件质量造成影响^[11]。因此,对路径进行精

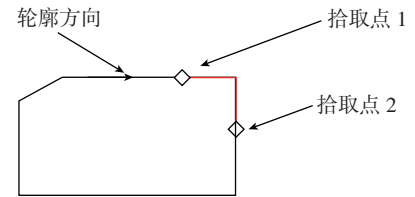


图8 任意段拾取结果高亮显示

Fig.8 Pickup result of "any segment"

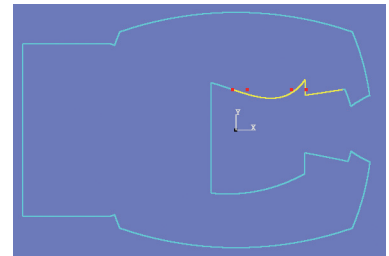


图10 修改中的视图显示

Fig.10 Modifying view display

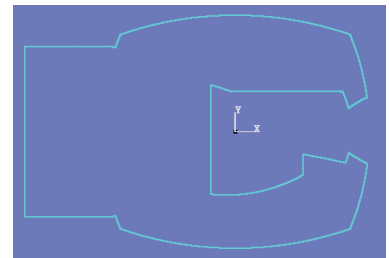


图11 修改完成的视图显示

Fig.11 Modified view display

确规划十分必要。常见的路径走向可能出现如图12(a)的情况,假设路径间隙为10mm,路径的最后一条线与外轮廓距离只有8mm,这样成形的零件表面不平整,需要对最后两条轮廓线段进行修改。运用本系统的几何交互操作功能,将加工路径进行修改,得到如图12(b)的路径,符合工艺要求。

STL零件模型显示如图13所示,层片轮廓显示如图14所示,加工路径添加折线修改如图15所示。

结论

在增材制造数据处理系统中,运用OpenGL开发了图形显示与操作工具,主要包括图形显示与操作和几何交互操作。图形显示包括三维STL模型显示和过程数据显示,运用了OpenGL的基本图形显示函数和

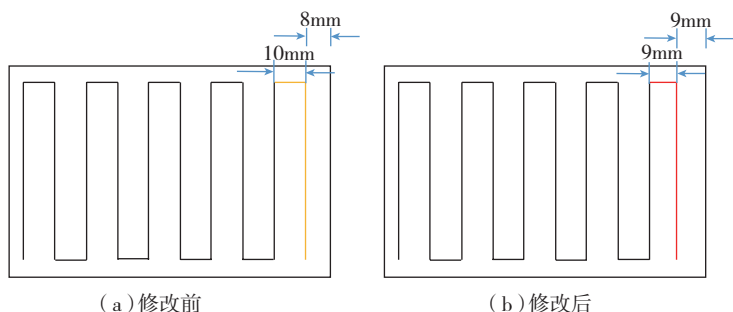


图12 轮廓线修改情况

Fig.12 Case of path modification

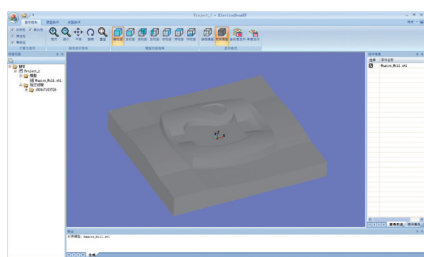


图13 STL零件模型轴视图

Fig.13 Isometric view of STL part model

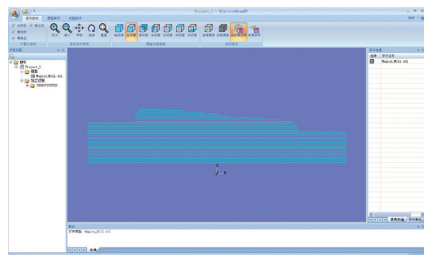


图14 层片轮廓主视图

Fig.14 Front view of ply contours

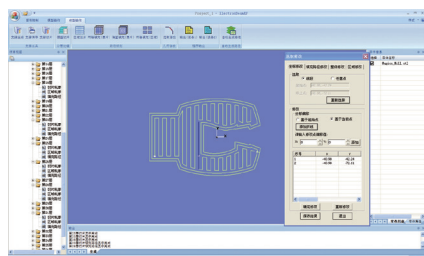


图15 加工路径添加折线修改

Fig.15 Modifying machining path by adding a line

显示列表等。在充分了解 OpenGL 拾取和显示原理的基础上,开发了

何交互操作功能。可以看出,利用 OpenGL 技术可以使系统图形显示、图形操作以及几何交互操作更加直观、方便、易操作,并且具有很高的交互性和准确性。OpenGL 在增材制造数据处理系统中起着不可替代的作用。

参考文献

- [1] 蔡润彬, 潘国荣. 关于 OpenGL 在激光扫描数据处理中的应用研究[J]. 测绘通报, 2006(9): 19-22.
CAI Runbin, PAN Guorong. OpenGL application in laser scan data processing[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2006(9): 19-22.
- [2] 庄云良, 赵东标, 刘凯, 等. 基于 VC 和 OpenGL 的 STL 文件的分层和显示[J]. 机械与电子, 2012(1): 27-30.
ZHUANG Yunliang, ZHAO Dongbiao, LIU Kai, et al. The laying and display of STL files based on VC and OpenGL[J]. Mechanical and Electronic, 2012(1): 27-30.
- [3] 毕晓亮, 叶庆泰, 侯丽雅. 快速成型软件中的 OpenGL 技术[J]. 计算机应用研究, 2001(7): 20-21.
BI Xiaoling, YE Qingtai, HOU Liya. The OpenGL technology of rapid prototyping software[J]. Application Research of Computer, 2001(7): 20-21.
- [4] 胡平平, 刘建明, 王晶杰. OpenGL 显示 3DS 模型若干问题的研究[J]. 工程图形学报, 2010(4): 189-193.

HU Pingping, LIU Jianming, WANG Jingjie. Some problems of 3DS model OpenGL display[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010(4): 189-193.

[5] WOO M, NEIDER J, DAVIS T. OpenGL 权威编程指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

WOO M, NEIDER J, DAVIS T. OpenGL programming authoritative guide[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

[6] 吕忠民. OpenGL 程序中三维实体的选取技术[J]. 科技资讯, 2011(16): 12.

LÜ Zhongmin. The select technology of 3D solidin OpenGL program[J]. Technology Information, 2011(16): 12.

[7] 翁伟, 黄翠兰, 蔡建立. OpenGL 几何变换与 Windows 屏幕坐标转换的研究[J]. 电脑知识与技术, 2008, 4(7): 1749-1751.

WENG Wei, HUANG Cuilan, CAI Jianli. Research on OpenGL geometric transformation and Windows screen coordinate conversion[J]. Computer Knowledge and Technology, 2008, 4(7): 1749-1751.

[8] 冯清秀, 邹堃. 基于 MFC 和 OpenGL 的相贯线焊接仿真系统设计[J]. 机械设计与制造, 2012(5): 73-75.

FENG Qingxiu, ZOU Kun. The design of intersection line welding simulation system based on MFC and OpenGL[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2012(5): 73-75.

[9] 侯俊杰. 深入浅出 MFC[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.

HOU Junjie. Head first MFC[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.

[10] 杨钦, 徐永安, 瞿红英. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

YANG Qin, XU Yongan, QU Hongying. Computer graphics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[11] 陈哲源, 锁红波, 李晋炜. 电子束熔丝沉积快速制造成型技术与组织特征[J]. 航天制造技术, 2010(1): 40-43.

CHEN Zheyuan, SUO Hongbo, LI Jinwei. Rapid fabrication technology and organization feature of electron beam fuse deposition[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010(1): 40-43.

OpenGL Application in Additive Manufacturing Data Processing System

FENG Miaoting^{1,2}, MENG Yuemei^{1,2}, SI Shouyu^{1,2}

(1. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

2. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technologies, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] By describing the additive manufacturing technology and analyzing the principle of OpenGL, the implementation of graphic display, graphic operation and geometric interworking by OpenGL in additive manufacturing data processing system have been discussed. And it also has been verified and applied in the electron beam freeform fabrication data processing system. By using OpenGL, the accuracy, practicality and interactivity of the system has been improved.

Keywords: OpenGL; Additive manufacturing; Data processing; Graphic display; Contour line modification

(责编 海山)

(上接第63页)

(2)更有效和更美好。

安全风险最小、作业空间紧凑的自动化使得工厂更容易利用现有场地进行有效生产,人机混搭的协作装配线使得生产节奏更快、更有效。

(3)质量更高,浪费更少。

人和机器人协同工作超越了人类自身可达的工作精度和速度,使产品质量更高、浪费更少。

(4)简化编程技术。

引领编程技术,有别于传统复杂性编程。任何人都能掌握,无需特殊培训或拥有编程技能。

参考文献

- [1] CUMMINGS M M. Man versus machine or man + machine?[J]. *Intelligent Systems IEEE*, 2014, 29(5): 62-69.
- [2] BENGLER K, ZIMMERMANN M, BORTOT D, et al. Interaction principles for cooperative human-machine systems[J]. *Information Technology*, 2012, 54(4): 157-164.
- [3] PARASURAMAN R, SHERIDAN T B, WICKENS C D. A model for types and levels of human interaction with automation[J]. *IEEE*

Transactions on Systems Man & Cybernetics Part A Systems & Humans, 2000, 30(30): 286-297.

[4] ISO Standard. 10218-1:2011 Robots and robotic devices-safety requirements for industrial robots-part 1: robots[S]. ISO, 2011.

[5] ISO Standard. ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices-collaborative robots[S]. ISO, 2016.

[6] PISA. Flexible assembly systems through workplace-sharing and timeSharing human-machine cooperation[EB/OL]. [2016-11-11]http://www.pisa-ip.org/fileadmin/user_upload/PisaIP/documents/PISA-Pres-PISADesign-060524-V02_FrS_HoL-3.pdf.

[7] ROSETTA. ROSETTA final summary report[EB/OL]. [2016-11-11]. http://fp7rosetta.org/?q=node/11.

[8] VALERI. The final VALERI flyer[EB/OL]. http://www.valeri-project.eu/files/2015/11/valeri_2015.pdf.

[9] Robo-Mate. Intelligent exoskeleton based on human-robotinteraction for manipulation of heavy goods ineurope's factories of the future[EB/OL]. [2016-11-11]. http://www.robomate.eu/sites/robomate.eu/files/downloads/robomate_factsbook_druckdatei.pdf.

[10] Universal Robots. Automation. Optimized[EB/OL]. (2016-10). https://www.

universal-robots.com/media/240815/ur3_brochure_us.pdf

[11] ABB Engineering. YuMi® creating an automated future together you and me[EB/OL]. (2015-04). https://library.e.abb.com/public/55362813a776464383279a729b715e89/ROB0317EN_YuMi.pdf.

[12] Rethink Robots. Smart, collaborative robot for precision tasks[EB/OL]. [2016-11-11]. https://www.rethinkrobotics.com/wp-content/uploads/2015/11/Sawyer_Datasheet_Nov_2015_web.pdf.

[13] KUKA. LBR iiwa[EB/OL]. [2016-11-11]. https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa.

[14] Airbus. Airbus invests in robotics as part of its commitment to innovation[EB/OL]. [2016-11-11]. http://www.airbus.com/presscentre/pressreleases/press-release-detail/detail/airbus-invests-in-robotics-as-part-of-its-commitment-to-innovation/.

[15] ASSEMBLYMAG. Airbus ramps up automation[EB/OL]. [2016-11-11]. http://www.assemblymag.com/articles/93377-airbus-ramps-up-automation.

[16] GHARIBIAN A. Putting humanoid robots to work[EB/OL]. (2016-12-02). https://news.cnrs.fr/articles/putting-humanoid-robots-to-work.

Standard for Human-Robot Collaboration and its Application Trend

ZOU Fang^{1,2}

(1. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

2. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technologies, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] This paper based on the definition and connotation of human-robot collaboration. Several key technologies that human-robot collaboration need to overcome have been put forward, and four famous collaborative robots have been introduced. This paper introduces the latest research results of foreign cooperative robot in aircraft assembly, and human-robot collaboration will become the new normal of assembly system.

Keywords: Human-robot collaboration; Automation level; Human-robot security; Human-robot fusion

(责编 海山)