

基于机器视觉的激光再制造机器人离线自动编程研究

董 玲 杨洗陈 雷剑波

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 为了使机器人准确高效地完成复杂形貌零件修复,开发了一套基于三维视觉的激光再制造机器人离线自动编程系统。系统主要包含 6 个功能模块:机器视觉测量、三维建模、再制造规划、自动编程、仿真优化和通信模块。基于 HALCON 软件采用标准标定板进行视觉系统的标定,应用梯度重心法对采集到的激光光条图像进行光条中心提取,依据极限几何理论进行特征匹配,根据三角原理获取零件表面点云数据。然后逆向重建零件三维模型并提取出修复区域,根据工艺规划参数,自动进行再制造路径规划和机器人加工程序编制,并通过机器人主控方式实现多个设备之间的联动和时序控制。试验表明,该方法能提高激光再制造机器人编程效率和精度,且机器人动作连贯,修复路径与设计吻合,满足零件修复要求。

关键词 激光再制造; 机器人; 离线自动编程; 机器视觉

中图分类号 TN249; TP249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1003006

Off-Line Automatic Programming Research of Laser Remanufacturing Robot Based on Machine Vision

Dong Ling Yang Xichen Lei Jianbo

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract Off-line automatic programming system of laser remanufacturing robot based on 3D vision is developed in order to repair the complex parts accurately and efficiently. The system mainly consists of six functional modules: machine vision measurement, 3D modeling, remanufacturing planning, automatic programming, simulation and optimization, and communication module. It applies standard calibration plate to carry out calibration based on HALCON software, and uses gradient gravity method to extract laser stripe center precisely, and carries on feature matching fastly on the basis of limit geometric theory. Parts' point cloud data is obtained according to the triangulation principle. Then reconstructing parts and extracting the 3D model of the repair area are done, remanufacturing path planning and robot control program generation are executed automatically in the light of the parameters of process planning. Linkage between multiple devices and timing control are implemented with robot master mode. Tests show that robot action is coherent, and repair pathway is consistent with the design by using this method, which can improve efficiency and accuracy of robot programming and meet parts' repair requirements.

Key words laser remanufacturing; robot; off-line automatic programming; machine vision

OCIS codes 350.3390; 150.1488; 150.3040

1 引 言

激光再制造机器人将机器人技术用于激光熔覆再制造领域,是集激光、机器人、自动化、传感、网络、先进制造和先进材料等多学科为一体的高新技术,

通常用于大型设备零部件的现场激光修复、复杂形状零部件的柔性激光再制造等^[1]。再制造加工的对象是达到寿命的废旧产品或意外损坏的产品,其尺寸变形和表面损伤程度各不相同^[2],在当前小批量、

收稿日期: 2013-03-26; **收到修改稿日期**: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(60908017)、天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)、天津市应用基础及前沿技术研究计划(12JCQNJC02800)

作者简介: 董 玲(1976—),女,博士研究生,讲师,主要从事激光制造理论及应用、CAD/CAM 等方面的研究。

E-mail: dongling82@126.com

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光制造理论及应用等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

多样化的现代制造业发展趋势下,越来越多的复杂表面零件需要被修复,实现多品种、小批量、不同失效形式的复杂形状废旧产品再制造的自动化已成为必然趋势。机器人示教编程方式存在编程周期长,示教精度低,复杂轨迹很难实现等缺点,直接影响着激光再制造的效率和精度,已经不能满足激光再制造的要求。离线编程可加速机器人编程进程,提高机器人作业效率和质量,方便实现机器人程序修改和优化,当工件及修复任务种类较多且改变频繁时,可轻易实现机器人任务转换,同时降低操作者的劳动强度,避免工作失误和保证操作安全。如何实现激光再制造机器人的离线自动编程,保证程序生成的效率和质量,是顺利实现关键零部件激光再制造的关键技术之一。

目前对于激光加工机器人离线编程的研究主要采用通用的离线编程软件或基于某个通用 CAD 系统的二次开发的方法^[3-5],取得了一定的成果。但是激光再制造零件形貌复杂且多没有原始数学模型或三维 CAD 模型,已有方法对于激光再制造都存在无法支撑复杂形状缺陷零件的建模、无法实用化的问题,机器人目前普遍缺乏机器视觉功能和离线自动编程能力^[6-7]。

针对多品种、小批量的复杂形貌零件修复,本文研发了一套基于机器视觉的激光再制造机器人离线自动编程系统,系统通过激光视觉传感器获取工件形貌和缺陷部位信息、由路径规划算法产生机器人加工路径数据、并自动生成符合机器人编程规

范的程序指令,具有精度高、编程速度快等优点。加工程序经仿真检测优化后下载到真实机器人控制柜中,直接用于零件的修复。

2 激光再制造机器人离线自动编程系统

2.1 系统硬件

如图 1 所示,智能化激光再制造机器人离线自动编程系统的硬件设备主要由机器人系统(机器人及其数字控制系统)、机器视觉系统和高性能计算机等组成。机器人为 FANUC R-2000iB/125L 型六自由度关节型多功能智能机器人;机器人数字控制系统包括机器人控制柜,示教盒;机器视觉系统采用结构光双目立体视觉;计算机为 HP EliteBook 8540w 专用移动工作站。



图 1 系统硬件设备

Fig. 1 System hardware devices

2.2 系统工作原理

再制造激光加工头的运动轨迹和激光加工参数是由计算机(上位机)的离线编程指令提供的。如图 2 所示,基于机器视觉的激光再制造机器人离线自

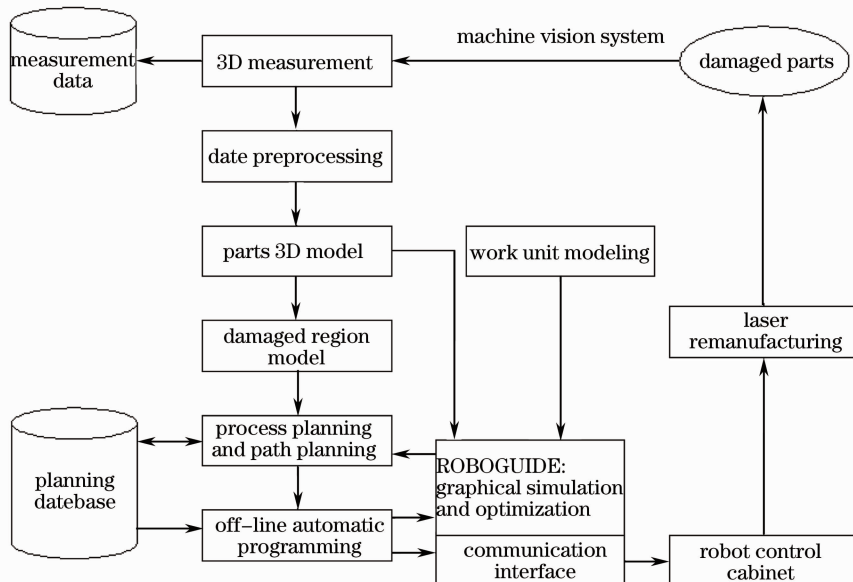


图 2 基于机器视觉的离线自动编程系统流程框图

Fig. 2 Flow diagram of off-line automatic programming system based on machine vision

动编程过程为：首先利用机器视觉系统对缺陷零件表面形貌进行三维测量获取零件表面三维点云数据，数据预处理后，生成三维模型，并提取出零件表面缺陷区域的三维形貌数据信息；然后进行加工工艺参数规划和路径规划，通过对缺陷区域模型分层切片得到加工路径数据，并离线自动生成机器人加工程序；再在计算机上对编制的程序进行仿真和优化；最后将优化调整后的程序传输到机器人控制系统，控制机器人携带激光加工头按规划的路径，逐层熔覆，最终完成激光再制造加工任务。

3 系统功能模块

激光再制造机器人离线自动编程是一个复杂的系统，主要包含6个功能模块：机器视觉测量、三维建模、再制造规划、自动编程、仿真优化和通信模块。

3.1 机器视觉三维测量

3.1.1 视觉系统硬件结构

系统硬件采用双目主动立体视觉，设备由2台陕西维视MV-1300UC迷你高分辨率工业数字摄像机、结构光发射器、箱体及调节、固定装置等组成。摄像机为130万像素，帧频45 frame/s，像素尺寸为 $5.2\ \mu\text{m} \times 5.2\ \mu\text{m}$ ，镜头焦距8 mm。半导体激光器输出波长532 nm，输出功率200 mW，光斑模式为 TEM_{00} 。

视觉系统设备内部由左、右摄像机和结构光发射器构成，双目摄像机交叉摆放，考虑其公共视野范围，两摄像机光轴夹角取为 30° ，利用后端的USB2.0数据线接口与计算机通信，结构光发射器在中间，模型如图3(a)所示。根据双目视觉系统测量结果的精度计算公式 $\Delta z = \frac{z^2}{fB} \Delta d$ ，式中 Δz 表示测

量得到的被测点与立体视觉系统之间距离的精度， z 指被测点与立体视觉系统的绝对距离， f 指摄像机的焦距， B 表示双目立体视觉系统的基线距， Δd 表示被测点视差精度，为了实现高精度测量，综合考虑各参数值及系统整体尺寸，左右摄像机之间的基线距离 B 取为200 mm，被测点与立体视觉系统的绝对距离 z 取为350 mm。被测点视差精度可以达到 $1\ \mu\text{m}$ ，双目视觉系统测量结果的精度值可达到0.08 mm，满足激光再制造精度要求。图3(b)为视觉设备与机器人连接安装图，采用专用的激光头夹具将视觉系统和激光加工头连接在机器人末端，激光加工头轴线与机器人手臂末端呈 135° ，摄像机光轴与激光加工头轴线呈 45° 放置。

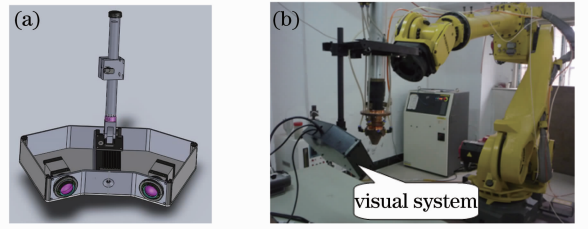


图3 视觉系统硬件结构。(a) 模型；(b) 实物安装图

Fig. 3 Visual system hardware structure.

(a) Model; (b) installation

3.1.2 结构光双目立体视觉测量原理

视觉系统安装固定在机器人末端，随机器人移动，半导体激光器发出的光线经柱状透镜单方向扩展后变成一光条，投射在待测物体表面，光条随物体表面高度变化而发生变形，使用两个摄像机同时拍摄此变形光条的图像，经过两幅图像的匹配，得到光条上所有像素点分别在两幅图像中的位置，利用视差，可计算得到光条上所有点的位置以及深度，即被扫描物体表面的三维信息。

双目立体视觉基于三角法原理进行测量，即两个摄像机的图像平面和被测物体之间构成一个三角形。只要已知两摄像机间的位置关系，就可以测量两摄像机公共视场内物体的三维尺寸以及空间物体特征点的三维坐标^[8]。

如图4所示，设两摄像机的有效焦距分别为 f_l 和 f_r ，左摄像机位于世界坐标系原点处且无旋转为 $o\text{-}xyz$ ，左图像坐标系为 $O_l\text{-}X_lY_l$ ；右摄像机坐标分别为 $o_r\text{-}x_r y_r z_r$ ，右图像坐标系为 $O_r\text{-}X_r Y_r$ ，空间点 $P(x, y, z)$ 在左图像上的投影为 $P_l(X_l, Y_l)$ ，在右图像上的投影为 $P_r(X_r, Y_r)$ 。 $o\text{-}xyz$ 与 $o_r\text{-}x_r y_r z_r$ 坐标系之间的相互位置关系可通过空间转换矩阵 \mathbf{M}_{lr} 表示为：

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{lr} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{lr} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}], \quad (1)$$

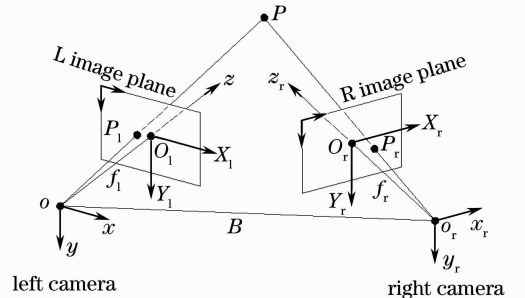


图4 非平行配置双目立体视觉测量原理

Fig. 4 Binocular stereo vision measuring principle of non-parallel configuration

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为 $o\text{-}xyz$ 坐标系与 $o_r\text{-}x_r y_r z_r$ 坐标系之间的旋转矩阵和原点之间的平移变换矢量。

对于 $o\text{-}xyz$ 坐标系中的空间点 $P(x, y, z)$ ，两摄

像机像面点之间的对应关系为：

$$\rho_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} zX_1/f_1 \\ zY_1/f_1 \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

空间点 P 的三维坐标可以表示为

$$\begin{cases} x = zX_1/f_1 \\ y = zY_1/f_1 \\ z = \frac{f_1(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_1 + r_8 Y_1 + f_1 r_9) - f_r(r_1 X_1 + r_2 Y_1 + f_1 r_3)} \\ = \frac{f_1(f_r t_y - Y_r t_z)}{Y_r(r_7 X_1 + r_8 Y_1 + f_1 r_9) - f_r(r_4 X_1 + r_5 Y_1 + f_1 r_6)} \end{cases}. \quad (4)$$

可见,要得到空间点的三维坐标,则需已知 f_1 , f_r , $\mathbf{M}_{ir} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]$ 和空间点在左右摄像机中的图像坐标,因此需要进行摄像机标定和特征点的匹配。

3.1.3 系统标定

摄像机标定的目的是建立有效的成像模型,并确定摄像机的内外部属性参数,以便正确建立空间坐标系中物点与它在图像平面上像素点之间的对应关系。标定是实现机器人双目立体视觉基本且关键的一步,包括单摄像机内外参数的标定、双目摄像机相对关系的标定、双目摄像机与机器人之间的手眼关系标定;从而得到摄像机内外参数矩阵 \mathbf{M}_1 、 \mathbf{M}_2 , 双摄像机之间关系矩阵 $\mathbf{M}_{ir} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]$ 和机器人手眼关系矩阵 $\mathbf{M}_{he} = [\mathbf{R}_{he} \quad \mathbf{T}_{he}]$ 。

鉴于以往使用 Matlab 软件的标定工具箱采用黑白相间棋盘式靶标^[7],其过程复杂繁琐、耗时长。本文基于 HALCON 软件进行摄像机标定,使用 HALCON 标准标定板,如图 5 所示。标定的过程为:用 HALCON 程序控制双目摄像机采集标定板图像,且要保证标定板在左右摄像机中都能完整成像;读取图像,利用函数 find_caltab()在标定板图像中分离出标定板区域;利用算子 find_marks_and_pose(),通过亚像素阈值、亚像素边缘提取、圆心确定等操作计算出标定板上每个点的图像坐标以及标定板与摄像机之间的大约位置关系,即摄像机的外参数初始值;获取标志点坐标以及摄像机的初始参数后,利用函数 binocular_calibration()可确定两个摄像机的内、外参数和两个摄像机之间的相对位置关系。其中使用 find_caltab()函数分离标定板区域运算时间约为 5 ms,find_marks_and_pose()算子计算标定板上 49 个标志点坐标的时间约为 40 ms,计

算坐标精度为亚像素级。通过标志点坐标的对应关系计算出摄像机各个参数需要的时间约为 1.6 s,误差约为 0.02 个像素。

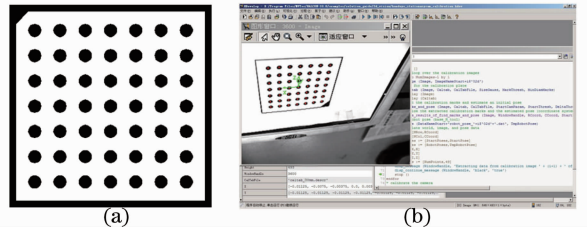


图 5 HALCON 标定。(a) 标准标定板;
(b) 标定界面

Fig. 5 HALCON calibration. (a) Standard calibration plate; (b) calibration interface

手眼关系标定过程中,标定板固定,通过旋转和移动改变机器人的位置,在每一个图像采集位置点记录相应的机器人位置数据,调用函数 hand_eye_calibration()进行手眼标定,得到手眼关系矩阵。

3.1.4 特征提取和匹配

三维测量中,得到空间任一点 P 在两个图像中的对应坐标,即可进行空间点的重建,所以需要两幅图像中的对应点进行匹配。为了提高匹配速度和精度,借助线结构光采用基于特征匹配的方法,线结构光投射到待测缺陷零件表面,形成带有深度信息的复杂光条,左右相机同时采集光条图像,激光光条图像特征明显,便于特征提取和匹配。

激光器输出的激光束是一种结构比较特殊的高斯光束,其在物体表面形成的激光光条光强近似符合高斯分布^[9],在测量过程中,需要提取激光光条中心。首先需对采集的图像进行预处理。为了减少运算量,采用大步距快速搜索法,依据灰度值提取目标

区域;为了强化突出图像中的特征点,采用二维低通数字滤波器对图像平滑滤波,消除较高频谱分量的随机噪声。采用梯度重心法提取激光光条中心,先运用光条强度分布的一阶导数来提取结构光边缘,再在结构光边界内采用重心法,实现亚像素级结构光光条中心的精确提取。然后,根据极限几何理论^[8],空间点与两摄像机的光心点组成的平面分别与两个成像平面的交线称为该空间点在这两个像面中的极线,在两摄像机的内外参数确定的情况下,通过两个像面上的极限约束关系可以搜索出左图像中激光光条上某一点在右图像激光光条中的对应点,从而建立对应点之间的关系,并由此联立方程,求得图像点的世界坐标值,实现光条上点的匹配。

3.1.5 零件三维形貌数据获取

由获得的左右图像匹配像点,根据双目立体视觉测量原理可计算出物体上匹配点的三维坐标。线结构光在物体表面扫描,通过立体匹配得到激光光条上所有点的视差图像后,经过计算可以确定光条上所有点的深度信息,便可得到三维点云数据,即零件的整体形貌。

以上计算出的点云数据位于摄像机坐标系下,为了方便机器人加工并实现多角度测量的数据拼

接,根据(5)式将测量到的点的坐标由摄像机坐标系转换到机器人坐标系,实现坐标系的统一。其中 M_{he} 由机器人和摄像机手眼关系标定得到, M_{bh} 为机器人末端相对于机器人基坐标系的关系矩阵。图6(a)为视觉测量软件界面,(b)为得到的叶片点云。

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = M_{bh} M_{he} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3.2 三维建模

建模模块为再制造工艺规划及再制造路径规划提供数据信息,为机器人再制造过程图形仿真提供工件和激光加工头及其他相关设备的三维造型。此模块包含两部分:1)利用常用的三维CAD软件实现激光加工头等设备的基于特征的三维造型和装配;2)根据视觉测量得到的零件三维形貌数据,先对其点云进行数据预处理,然后利用三维空间点集的Delaunay剖分算法,并借助可视化平台Matlab软件进行零件的三角网格曲面构造,实现缺陷零件的三维模型重建,并提取出零件缺陷区域模型,如图6(c)所示。

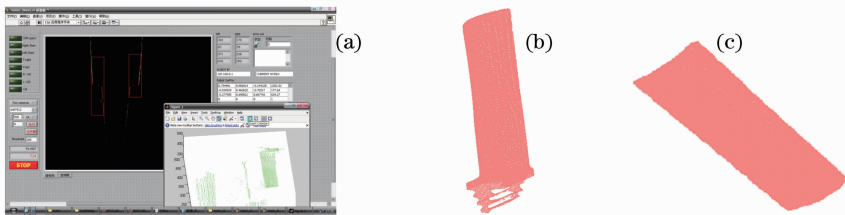


图6 叶片三维测量和建模。(a)软件界面;(b)叶片点云;(c)缺陷区域模型

Fig. 6 3D measurements and modeling of blade. (a) Software interface; (b) blade point cloud; (c) defect zone model

3.3 再制造规划

再制造规划模块包含工艺规划和路径规划。工艺规划根据再制造要求和具体任务,以及相关再制造特征信息,针对缺陷零件材料、缺陷形式和修复要求,规划激光加工扫描方向和各项工艺参数。路径规划根据工艺规划结果,规划零件缺陷区域修复轨迹,获取六自由度机器人激光再制造路径数据。利用数据库实现系统的各种图形、文档、数据、规则、工艺知识等的存储和管理。

为保证修复质量,假设再制造规划的基本要求为:机器人携带激光加工头沿轨迹运行过程中,激光加工头轴线理论上始终垂直于工件修复区域表面,且激光加工头末端与零件被修复表面保持等距。

再制造的工艺规划过程为:1)基于工件材料、失

效具体情况、再制造工艺的要求等因素,结合试验获得的激光熔覆工艺知识库,确定激光功率、扫描速度、送粉量、载气流量和离焦量等参数;2)考虑以上激光再制造工艺参数,建立轨迹间中心距和临界搭接率计算模型^[10],基于该模型确定激光再制造路径间距 d 。

遵循上述要求,结合再制造工艺,进行加工路径的离线规划。激光再制造机器人运动轨迹编程采用目标点方式,即首先确定机器人末端路径上的目标点,然后利用相应的运动指令将所有目标点串联起来,形成整个机器人加工运行路径。路径规划基于重建的三角网格曲面模型在Matlab平台上完成,针对三角网格曲面模型的分层算法已有很多研究^[11],本文采用一种改进的截平面法对模型分层切片生成零件缺陷区域的激光熔覆修复轨迹。主要步骤如下:

1) 路径节点的确定。根据激光再制造路径间距 d , 采用优化的截平面法对缺陷区域三角网格模型分层^[12], 一系列平行的截平面沿修复轨迹的走向与缺陷区域三角网格相交, 求得离散点若干, 即路径节点, 使用这些离散点序列近似地表示再制造路径, 工件缺陷区域则被分解成间距为 d 的一系列平行的再制造路径。

2) 激光加工头姿态的确定。对再制造路径上

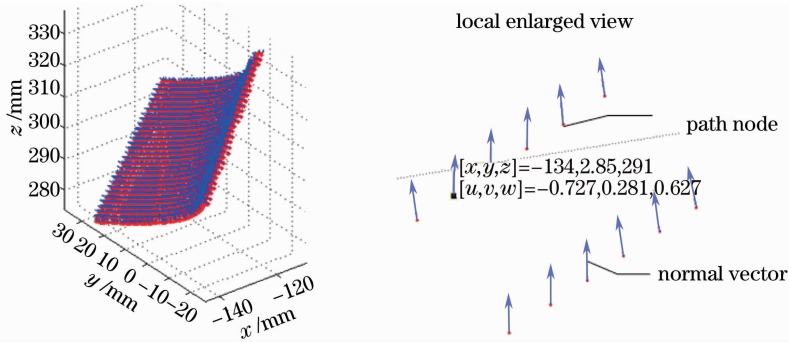


图 7 路径节点及其法矢

Fig. 7 Path nodes and normal vectors

3) 激光加工头末端运行轨迹节点的确定。为了保证熔覆层质量, 要求激光再制造过程中激光加工头末端至工件表面的距离为定值 D , 将上面得到的每个路径节点沿其法矢方向偏置固定距离 D , 得到对应于每个路径节点的激光加工头末端运行的轨迹节点。至此, 将工件缺陷区域修复的激光再制造过程离散为有限的激光加工头姿态序列, 并得到了激光加工头末端运行的若干离散的轨迹节点序列。

4) 激光加工头末端运行轨迹的生成。将轨迹节点序列中的所有节点按序连接成完整的激光加工头末端运行轨迹。至此, 完成再制造激光加工头路径规划。

在离线自动编程时, 激光加工头姿态和其末端运行轨迹节点将作为编制机器人控制程序的基准和依据, 以定义机器人加工运行时的末端位姿。

3.4 自动编程

自动编程模块是虚拟规划数据向实体机器人程序指令转换的关键环节, 它将生成的激光加工头末端运行轨迹数据自动转换成机器人可识别, 可执行的指令文件。在此根据 FANUC 机器人语言格式, 通过开发的高级语言程序能够自动将路径规划得到的数据编制成机器人的运动指令程序, 保存为指定的文本文件“grid001.ls”, 编制的机器人指令程序文件可用记事本打开, 如图 8 所示。

激光再制造机器人系统是集光、水、气、机、电为

的每个路径节点求表面法向矢量, 法向矢量方向表示路径节点处激光加工头轴线的方向, 即激光加工头姿态。图 7 为得到的叶片部分待修复区域的路径节点及节点位置的法矢。在激光加工中, 为了使激光加工头的运动路径平滑, 要求激光加工头姿态在相邻路径节点不要发生突变, 所以对法向矢量变化大的相邻路径节点, 采用对两节点位置和法向矢量进行差值的方法实现加工头姿态的均匀过渡。

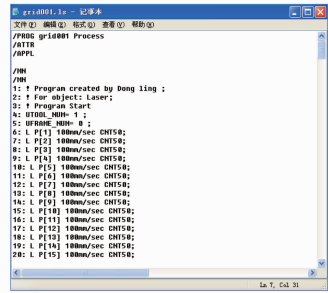


图 8 机器人指令程序

Fig. 8 Robot program

一体的复杂加工系统, 在加工程序中需要控制的联动设备(如机器人本体、激光器、送粉器、送气装置、工作台等)和需要控制的参量(如激光扫描速度、激光功率、送粉量、气流量, 工作台运动形式和速度等)都比较多, 而且需要控制各工序的时序。把机器人

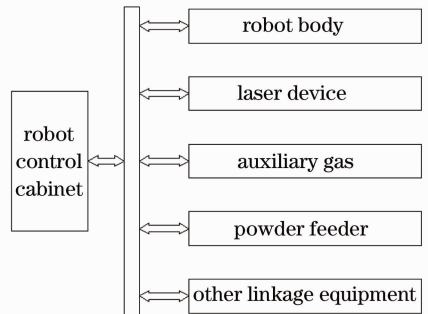


图 9 机器人主控示意图

Fig. 9 Robot mastering schematic diagram

作为主控设备,如图9所示,充分利用机器人自身的数字I/O及延时功能,主要通过机器人数字输入/输出(DI/DO)控制串接在联动控制箱中的继电器或电磁阀来实现对各种联动设备的控制,从而使系统的各组成部分协调工作。

3.5 仿真优化

仿真模块主要实现再制造工作单元布局、从生成的机器人指令语句中读取加工轨迹参数,然后在屏幕上模拟出实际机器人激光再制造过程中的轨迹,检查有无干涉等,以验证程序的正确性并进行优化。在此采用ROBOGUIDE环境,ROBOGUIDE仿真软件及其插件提供了易用接口来创建工作单元和机器人程序,以FANUC机器人虚拟控制器为支持,它提供了一个虚拟的离线3D世界和离线仿真功能,能输出准确的时钟周期和机器人运动轨迹数据,其仿真过程和机器人实际运行过程完全一致。

3.6 通信模块

通信模块实现主控计算机与机器人控制柜的通信,完成程序的传输。激光机器人采用RS232C接口与主控计算机实现通信。计算机与机器人控制柜

之间的通信通过网线连接,通信模式采用TCP/IP协议。仿真检测后的机器人运动指令程序通过FTP传输模块下载到机器人控制器存储设备中,机器人可直接调用该程序运行控制机器人携带激光头加工,完成零件修复。

4 试验

自动编程生成的机器人加工程序经仿真检验并优化后,传输到机器人控制柜,控制机器人携带激光加工头运动,即可完成实际的工件表面激光再制造。图10所示为在三维虚拟环境ROBOGUIDE中对叶片数字模型表面修复区域的路径规划结果及其程序的离线仿真验证。将激光加工头模型、修复零件模型和自动编程模块生成的机器人指令程序、分别导入到ROBOGUIDE软件中进行轨迹仿真检验。可见机器人带动激光加工头按照程序设计的路径、姿态和速度运动,机器人末端运动平稳,过渡平滑,与规划的路径吻合。将路径区域放大显示,可以看到,路径由很多个离散点组成。其中,坐标系Z轴与路径节点法矢方向重合。

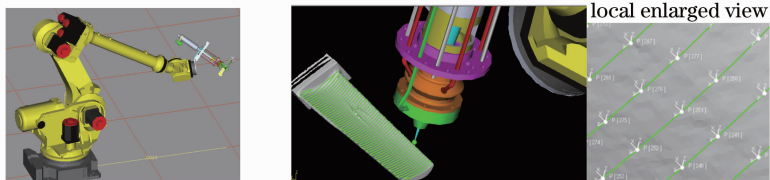


图10 激光再制造机器人程序仿真

Fig. 10 Laser remanufacturing robot program simulation

仿真检测后的机器人运动指令程序下载到机器人控制器中,对叶片的部分缺陷区域进行了激光修复试验,加工效果如图11所示,可见再制造路径平滑,熔覆层形貌良好,满足零件修复要求。



图11 叶片加工效果图

Fig. 11 Blade processing renderings

零件数据及缺陷区域模型,由程序自动产生激光加工头的位置和姿态,完成机器人加工路径规划和自动编程,生成适用于大型和复杂修复任务的机器人控制程序,实现了机器视觉/CAD/CAM/机器人的衔接集成。视觉系统标定、缺陷零件测量、三维模型重建以及机器人加工路径和程序的生成都是自动快速的,具有结构简单,精度高,成本低,操作容易等特点,提高了缺陷零件激光修复的效率和精度。试验表明,机器人动作连贯,末端运动平稳,过渡平滑,修复路径与设计吻合,满足复杂形状零件表面三维激光再制造要求,达到预期效果。

目前,还不能实现全自动编程,建立离线编程系统中的再制造工艺过程和工艺参数专家系统,实现智能化的全自动编程技术仍是以后进一步研究的重点。

5 结论

通过机器视觉技术基于逆向工程获取复杂形貌

参 考 文 献

1 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial

- applications[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2780–2798.
 杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2780–2798.
- 2 Xu Binshi. State of the art and future development in remanufacturing engineering[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(1): 10–14.
 徐滨士. 再制造工程的现状与前沿[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(1): 10–14.
- 3 Zhou Guangbing, Jiao Junke, Dai Ju. The application of robot off-line programming in 3D fiber laser cutting[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech: Natural Science Edition, 2011, 39(22): 414–417.
 周广兵, 焦俊科, 戴 炬. 光纤激光三维切割加工中的机器人离线编程[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(22): 414–417.
- 4 Jin Xiaoshu, Yang Xichen. Off-line programming of a robot for laser re-manufacturing[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009, 14(S1): 186–191.
- 5 Song Lijie, Zhang Guixiang, Zhao Jie, *et al.*. Analysis and Implementation of off-line programming system of laser welding robot[J]. Technology and Test, 2008, 12: 113–116.
 宋立杰, 张桂香, 赵 杰, 等. 激光焊接机器人离线编程分析与实现[J]. 工艺与检测, 2008, 12: 113–116.
- 6 Yang Xichen, Zhang Haiming, Liu Lifeng, *et al.*. Machine vision in laser remanufacturing robots[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601008.
 杨洗陈, 张海明, 刘立峰, 等. 激光再制造机器人光电视觉技术进展[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601008.
- 7 Gao Gui, Yang Xichen, Zhang Haiming. Study of binocular vision system calibration in laser remanufacturing robot[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1868–1872.
 高 贵, 杨洗陈, 张海明. 激光再制造机器人双目视觉系统标定研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1868–1872.
- 8 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008.
 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 9 Liang Zhiguo, Xu Ke, Xu Jinwu, *et al.*. Sub-pixel feature extraction and edge detection in 3-D measuring using structured lights[J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2004, 40(12): 96–99.
 梁治国, 徐 科, 徐金梧, 等. 结构光三维测量中的亚像素级特征提取与边缘检测[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12): 96–99.
- 10 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 296–301.
 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296–301.
- 11 Sun Dianzhu, Zhu Changzhi, Li Yanrui. Fast slicing algorithm for triangular mesh model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(3): 279–282.
 孙殿柱, 朱昌志, 李延瑞. 三角网格曲面模型快速分层算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(3): 279–282.
- 12 Dong Ling, Yang Xichen, Zhang Haiming, *et al.*. Path generation for repairing damaged parts of free-form surfaces in laser remanufacturing[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0703007.
 董 玲, 杨洗陈, 张海明, 等. 自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703007.

栏目编辑: 李文喆