

# 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划

刘立峰<sup>1,2</sup> 杨洗陈<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160  
<sup>2</sup> 天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300160)

**摘要** 为了提高激光再制造的质量和效率, 结合逆向工程和激光再制造的特点, 介绍了缺损工件的激光再制造路径规划。阐述了扫描缺损工件的表面以得到点云数据, 采用逆向工程重构修复区三维形貌, 再配以激光再制造工艺进行路径规划。加工控制点矢量算法为加工头姿态提供了一种行之有效的方法。

**关键词** 激光技术; 轨迹规划; 再制造; 逆向工程; 机器人

**中图分类号** TN24; TP249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0703008

## Path Planning of Laser Remanufacturing Robot Based on Reverse Engineering

Liu Lifeng<sup>1,2</sup> Yang Xichen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China  
<sup>2</sup> School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** To increase the efficiency and accuracy of laser remanufacturing, a method of path planning with combining the characteristics of reverse engineering and laser remanufacturing is presented. The following aspects are contained; obtaining point clouds by scanning the surface of worn workpieces, reconstructing of repair area by reverse engineering, doing the path planning comparing with laser remanufacturing parameter. The calculation of laser processing head axis vector improves the direction and distance control accuracy of laser processing robot.

**Key words** laser technique; path planning; remanufacturing; reverse engineering; robot

**OCIS codes** 140.3390; 150.5758; 350.4600

## 1 引言

激光熔覆再制造的加工对象一般是达到技术或使用寿命的废旧工件或意外损坏的工件, 由于再制造工件的种类繁多、形状不确定、失效形式不同, 使得再制造的对象具有个体性和不确定性等特点<sup>[1,2]</sup>。激光再制造机器人是基于激光技术和机器人技术的高度集成系统<sup>[3]</sup>, 由于机器人具有很好的自由度, 它可以对复杂的空间曲面进行再制造。对于激光再制造机器人, 当作业任务复杂多变时, 示教编程将无法胜任, 离线编程在不占用机器人作业时间的情况下, 可以提高激光熔覆层质量, 缩短生产周

期, 以满足再制造对象的个体性及多样性要求。激光再制造机器人加工头路径规划是其离线编程中的关键技术, 目前, 面向平面和规则曲面的再制造路径规划得到一定程度的研究, 并得到了试验验证<sup>[4,5]</sup>。

本文以天津工业大学激光技术研究所开发的激光再制造机器人系统为平台, 针对缺损工件的激光再制造要求, 结合激光熔覆工艺, 对激光再制造加工路径进行了规划研究。

## 2 实验装置

激光再制造机器人系统装置如图 1 所示。主要

**收稿日期**: 2011-01-28; **收到修改稿日期**: 2011-03-28

**基金项目**: 天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)和天津市科技计划项目(08JCYBJC09200)资助课题。

**作者简介**: 刘立峰(1975—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事激光加工理论及应用、信号处理与系统等方面的研究。

E-mail: liulif2005@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加工理论及应用等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

由以下几大部分组成:1)高功率 Nd:YAG 激光器;2)光纤耦合和传输系统;3)激光光束变换光学系统;4)六自由度机器人;5)计算机离线编程系统(计算机、软件);6)机器视觉系统;7)激光加工头;8)材料进给系统(高压气体、送粉器);9)激光加工工作台。



图1 激光再制造机器人系统

Fig.1 Laser remanufacturing robot system

### 3 再制造工件修复模型

由于再制造工件大多是表面发生了磨损、腐蚀或损伤的零部件,再制造工件的几何尺寸以及结构形貌在再制造之前一般并不确切知道。为了进行合理、高效的路径规划(即修复路径规划),需要利用逆向工程进行反求重建,构建缺损部位三维(3D)几何形貌,建立修复模型,并对损坏程度做出准确判断。其基本思路为:首先通过数字化测量获得再制造工件 3D 点云数据,使用点云处理技术得到再制造工件表面的再制造模型,然后综合考虑此再制造模型与标准工件模型,进行 3D 对比以获得缺损量,结合激光再制造工艺,再对激光再制造加工路径进行规划。

标准工件模型的建立有 3 种情况:1)有工件尺寸图纸,通过正向设计建立工件标准 3D 模型;2)有标准工件实物,通过逆向工程重构工件标准 3D 模型;3)只有再制造工件时,通过逆向工程获得再制造工件的数字化模型,然后根据未破损部位的特征重构工件标准 3D 模型。

#### 3.1 再制造零件 3D 点云数据的采集

采用 Creaform 公司的 Handyscan 3D 扫描仪对缺损工件(以磨损的凸轮轴为例)进行数据采集,该扫描仪在测量时可随意围绕再制造零件移动,该光学扫描仪还具有测量范围大、精度高和携带方便等优点。其扫描的过程如下:

1) 为了防止数据失真,达到最佳的扫描精度,在扫描前要对缺损工件进行表面处理,将其表面擦

拭干净;

2) 为了防止反光和增加物体表面的成像性,需在其外表面均匀地喷洒乳白色显像剂;

3) 为了将多次不同方位扫描数据拼合在一起,应在物体表面粘贴参考点,作为拼合计算的基准;

4) 对光学扫描系统进行校准;

5) 根据缺损工件的形状,进行多个角度不同方位的扫描。在软件中,通过公共参考点把每幅扫描照片自动进行拼合,最终完成整个覆盖工件外形的扫描。

#### 3.2 点云数据处理

点云数据处理是逆向工程建模中的关键环节,目的是获得完整、正确的测量数据。运用 Geomagic Qualify 和 Studio 软件对测量数据进行处理。由于测量中不可避免地存在测量误差,尤其在曲率变化剧烈的部位,因此,需要对得到的点云数据进行处理,筛选出异常数据<sup>[6]</sup>。对缺损工件点云数据处理分两步进行:1)对原始缺损工件点云数据显示和评估,用以发现测量遗漏区域,并初步评估测量的精确度,以便决定是否重新测量;2)对点云数据,采用滤波算法/剔除瑕疵点,减少表面噪声,平滑点云数据以减少测量误差的影响,如图 2 所示。

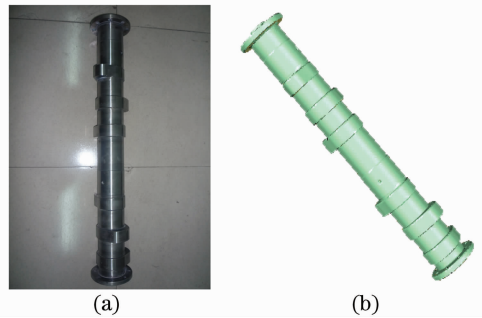


图2 (a)凸轮轴;(b)凸轮轴的点云数据  
Fig.2 (a) Camshaft; (b) point clouds of camshaft

#### 3.3 缺损量的获取和分析

根据工件的实际情况,将点云数据与标准模型进行配准,使工件非破损区域的点云数据与标准模型对比;设定误差阈值,识别和分割缺损工件点云数据中缺损部分区域,即计算点云数据到标准模型的距离作为再制造工件表面的缺损量;记录下各部位的缺损量以及对应的缺损位置,为机器人激光熔覆路径规划提供了基础。本实例凸轮型面磨损缺损量最大部分为 0.2 mm,如图 3 所示。



图3 目标区域提取

Fig. 3 Extraction of target area

## 4 机器人路径规划

由于进行激光再制造的工件种类各异,损伤部位不同,其激光再制造加工路径的规划算法也大不相同。激光熔覆路径一般是互相平行的轨迹,而且待熔覆路径之间是等距的。从机器人程序控制角度来看,激光加工头的空间路径可定义为激光加工头经过的一系列点的集合。针对再制造模型,采用等距轨迹法来规划机器人加工的路径位置点。

### 4.1 路径生成

结合实际激光熔覆情况,根据激光加工头运动方向来指定切片的方向。切片方向垂直于熔覆路径。它决定了切片平面曲线的走向。对同一块熔覆区域而言,若沿不同的方向进行切片,切片平面的位置和个数随之发生改变,将得到不同的切片曲线组。用垂直于凸轮轴轴线的一组平行切片平面截取再制造凸轮型面,以样条拟合二者产生的交点作为机器人的加工路径曲线  $L$ ,如图4所示。

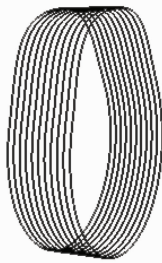


图4 路径提取

Fig. 4 Rack extraction

为了获得良好的熔覆层表面质量,根据缺损部分缺损量的大小,并结合实验获得激光熔覆工艺参数,必须选择适当的轨迹间中心距  $c$  和临界搭接率  $\eta_c$ 。依据文献[7]轨迹间中心距  $c$  和临界搭接率  $\eta_c$  的计算公式表示为

$$c = \left\{ \left[ \frac{(\omega/2)^2 + h^2}{2h} \right]^2 \arcsin \frac{\omega h}{(\omega/2)^2 + h^2} - \frac{(\omega/2)^2 - h^2}{2h} (\omega/2) \right\} / h, \quad (1)$$

$$\eta_c = \frac{\omega - c}{\omega}, \quad (2)$$

式中  $\omega, h$  分别为单层熔覆宽度与高度。

取  $d$  作为机器人激光加工步长,步长  $d$  选取要保证在路径曲线  $L$  曲率大处有足够的加工点,在路径曲线  $L$  上以步长  $d$  生成路径加工点列  $P$ ,即  $P = \{P_i(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n\}$ ,如图5所示。

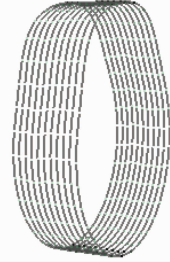


图5 加工点离散方法

Fig. 5 Way of scattering points

### 4.2 加工姿态的生成

在理论上机器人加工姿态要保证激光束垂直加工面,但为了避免激光光束反射进入加工头对光路造成损害,实际上应使激光束轴线与加工面的法线有一定角度。在路径加工点  $P_i$  激光束轴向矢量为  $Q_i$ ,如图6所示。 $Q_i$  的表达式为

$$Q_i = \frac{(P_{i+1} - P_{i-1}) \times (M_k - M_i)}{\|(P_{i+1} - P_{i-1}) \times (M_k - M_i)\|}, \quad (3)$$

式中  $P_{i+1}, P_{i-1}$  分别为加工路径点  $P_i$  前后的加工路径点;  $M_k, M_i$  分别为过加工路径点  $P_i$  且垂直于  $P_{i-1}P_{i+1}$  的平面,该平面与相邻加工路径曲线的左右交点。

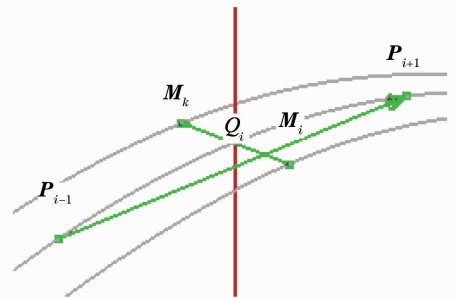

 图6 激光加工头  $Q_i$  处矢量估计

 Fig. 6 Laser processing head axis vector of  $Q_i$ 

### 4.3 激光加工头路径的获取

根据激光再制造机器人激光熔覆工作的要求,激光加工头到工件表面要保持恒定的距离,设垂直距离为  $h$ ,激光加工头的运行路径可通过偏置算法得到:

1) 对  $P_i$  沿向量  $Q_i$  方向偏置距离  $h$ ,就得到点  $P_i$  的偏置点  $S_i$ ,数学表达式为

$$S_i = P_i + h \frac{Q_i}{\|Q_i\|}, \quad (4)$$

点  $S_i$  包含坐标值和激光束轴向矢量信息,即激光加工头在点  $S_i$  的移动位置(坐标值)和姿态(与  $Q_i$  方向相反)。

2) 用 1)方法遍历整个路径加工点列  $P$ ,就可以获得整个点集  $S$ , 即  $S = \{S_i(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

#### 4.4 实验

采用 Creaform 公司的 Handyscan 3D 扫描仪扫描出的数据隶属于独立的坐标系,使工件坐标系与机器人坐标系不完全重合,因此在实际应用时必须建立一个从工件坐标系到机器人坐标系之间的坐标变换关系,将点集  $S$  变换到机器人坐标系下的目标点的位姿。根据机器人坐标系下的目标点的位姿,采用 LabVIEW 开发了转换程序能够自动将数据转换为激光再制造机器人运动指令,如图 7 所示。实验中 YAG 激光器功率为 800 W,激光扫描速度为 8 mm/s。实现基于激光熔覆的凸轮型面再制造,达到了修复的要求。

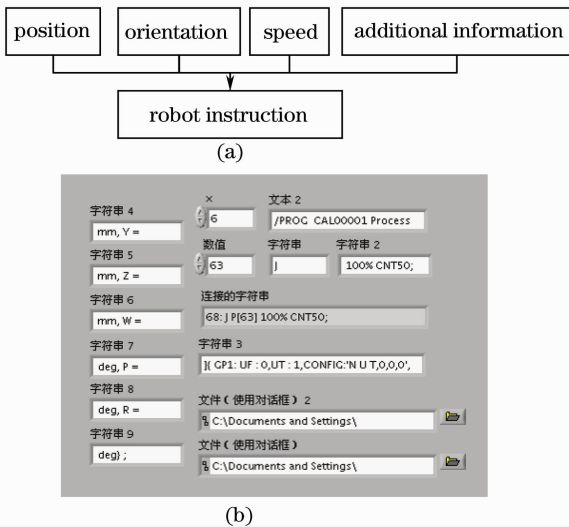


图 7 自动编程示意图。(a)数据与指令转换;  
(b)自动编程工具界面

Fig.7 Diagrammatic sketch of automatic program.  
(a) Instruction and data conversion; (b) automatically programmed tools interface

## 5 结 论

针对再制造工件的小批量、个性化特点,采用逆向工程与激光再制造相结合,利用点云切片技术来获取激光再制造机器人路径,提出了一种计算在待加工路径点矢量算法,提高离线编程效率。目前,离线编程中还常常涉及自由曲面再制造,与之对应的机器人路径规划问题有待进一步研究;此外,加工时扫描速度优化也是值得深入研究的课题。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Pei, Xu Binshi, Wu Lin *et al.*. Research on flexible remanufacturing technology based on welding robot[J]. *Electric Welding Machine*, 2006, **36**(3): 19~21  
杨培,徐滨士,吴林等.基于弧焊机器人的柔性再制造系统[J]. *电焊机*, 2006, **36**(3): 19~21
- 2 Liang Yuanyuan, Zhu Sheng. Path planning for MIG surfacing of remanufacturing system[J]. *China Surface Engineering*, 2006, **19**(5): 274~276  
梁媛媛,朱胜.再制造成形系统中的焊接路径规划[J]. *中国表面工程*, 2006, **19**(5): 274~276
- 3 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
- 4 Jin Xiaoshu, Yang Xichen. Directly rapid fabrication and refabrication of metallic components[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2006, **6**: 96~98  
靳晓曙,杨洗陈.金属零件的直接快速制造和再制造[J]. *机械设计与制造*, 2006, **6**: 96~98
- 5 Zhao Jibin, Liu Weijun. Research on slicing algorithm based on STL modal for rapid prototyping technology[J]. *J. Basic Science and Engineering*, 2008, **16**(2): 224~232  
赵吉宾,刘伟军.快速成形技术中基于 STL 模型的分层算法研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, **16**(2): 224~232
- 6 Mo Mingli. Application of reverse engineering technology on automobile panel measuring & modeling[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, **36**(12): 49~51  
莫明立.逆向工程技术在汽车覆盖件测量和建模中的应用[J]. *机床与液压*, 2008, **36**(12): 49~51
- 7 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