

# 激光再制造中缺陷识别关键技术研究

方 艳 杨洗陈

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 损伤零件缺陷区域的三维形貌检测对于激光机器人加工过程的智能化具有重要作用。系统实现了激光加工中损伤零件的缺陷识别, 并提出损伤零件缺陷边界检测的高精度算法。利用基于点特征面积累加的法矢量法识别出缺陷边界点, 生成初始缺陷边界, 针对初始缺陷边界具有不连续、多分支、锯齿状边界等问题, 提出了三步优化处理方法, 最终得到封闭、高精度的损伤零件的缺陷边界。系统运行处理速度快, 精度高, 可完全满足工业零件智能化激光再制造的要求。

**关键词** 激光技术; 缺陷识别; 机器视觉; 再制造; 边界

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0403001

## Research on Key Techniques of Defect Detection for Laser Remanufacturing

Fang Yan Yang Xichen

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

**Abstract** Defect detection of three-dimensional structures is essential for intelligent laser robot system. A method to detect structural damages in robot laser remanufacturing is presented, and a high precision algorithm is proposed to predict edge locations of damaged part. Initial edge points of the damaged parts are identified using normal-vector technique based on accumulation of the characteristic areas of the mesh vertices. A three-step optimization strategy is proposed to solve gaps, branches, and serrated boundaries of the initial edges. Finally, closed defect edges are predicated with high accuracy. The proposed method is fast for structural damage detection with high precision, which is necessary for industrial applications of intelligent laser robot system.

**Key words** laser technique; defect detection; machine vision; remanufacturing; edges

**OCIS codes** 140.3460; 100.6890; 150.5758; 040.1880

## 1 引 言

复杂贵重的大型设备一旦损坏, 会带来巨大的经济损失。这些设备大多无原始图纸, 如果采用传统激光再制造修复方法, 手工调整熔覆路径的位置精度低, 不同加工位置激光光斑大小、形状不一致, 最终导致损伤部位的再制造精度很难满足工业要求, 而且修复工期长。近年来, 随着激光再制造机器人智能系统的发展, 这一难题正逐步得到解决<sup>[1~3]</sup>。

激光再制造机器人系统首先由机器视觉系统对损伤零件进行检测, 并从三维形貌数据中提取出缺

陷区域的边界信息和缺陷部位的数据, 然后对损伤部位的原始形貌复原, 对零部件的损伤程度进行感知; 最后根据这些信息, 进行加工路径规划, 选择合理的加工参数, 经仿真优化后传输给机器人控制柜, 实现大型贵重零件的智能化再制造过程。整个系统中, 缺陷识别子系统对于实现激光再制造机器人系统的智能化起关键作用。

目前国内外对零件表面的缺陷识别技术进行了大量研究。如李长乐等<sup>[4~6]</sup>均已在各自领域内实现了零件表面缺陷识别, 但是现有这些缺陷检测方法

**收稿日期**: 2011-10-31; **收到修改稿日期**: 2011-12-05

**基金项目**: 国家自然科学基金(60478004)和天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)资助课题。

**作者简介**: 方 艳(1980—), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事激光加工、机器人理论及应用和机器视觉等方面的研究。

E-mail: yanfang1108@163.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(通信联系人)

都不适用于激光再制造系统中的缺陷识别。这主要是因为激光再制造的处理对象为损伤零件表面缺陷,形貌比较复杂,从而导致零件三角模型中三角面片的大小不均匀,利用现有的缺陷边界提取算法,效果不够理想,不能对缺陷区域进行准确定位;同时,激光再制造缺陷识别系统需要提取缺陷的参数、对缺陷进行分类,并以此作为确定加工工艺的依据。

针对激光再制造中具有复杂形貌的零件,本文提出基于三角网格模型的缺陷识别技术,利用初始缺陷边界特征识别法,生成初始缺陷边界;针对初始缺陷边界不连续、多分支、边界呈锯齿状等特点,提出了三步优化处理方法,最终得到封闭、高精度的破损零件的缺陷边界,实现激光再制造中损伤零件的缺陷识别。

## 2 缺陷识别系统工作原理

缺陷识别系统如图 1 所示,首先利用 Creaform 公司的 Handyscan 手持式三维扫描仪,对损伤零件进行三维点云数据获取;然后利用本文提出的识别算法提取缺陷区域的边界并优化;利用该边界,将整个点云分成两部分,一部分是缺陷区域,用于提取缺陷参数,另一部分是完好表面区域,用来还原损伤部位的原始形貌;最后利用这些信息对缺陷进行分类,同时确定缺陷区域的加工工艺,生成机器人加工路径。

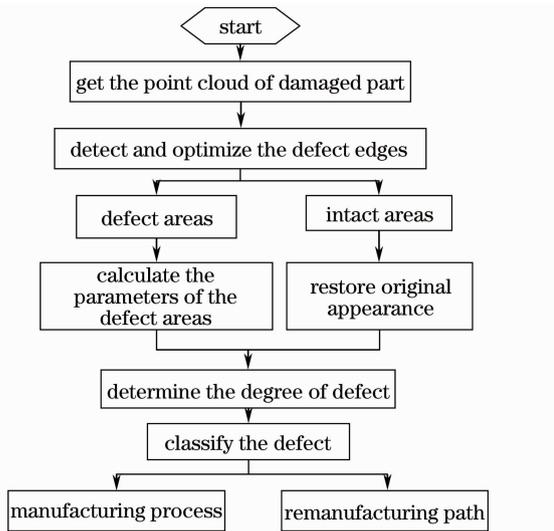


图 1 缺陷识别系统

Fig. 1 Defect detection system

## 3 初始边界特征点的识别

边界特征识别技术主要分为两大类:曲率法和

法矢法。曲率法主要通过提取主方向上主曲率的极值点来识别边界点<sup>[7~10]</sup>,首先需要对点的邻域数据进行局部抛物面拟合,然后通过计算抛物面的主曲率及其主方向来确定该数据点的曲率。这种方法对于大型激光再制造零部件的测量数据来说,计算量太大,不仅导致边界识别效率降低,同时由于损伤部位形貌复杂,零件模型中三角面片的大小不均匀,导致缺陷识别效果不理想。另一种方法是利用法矢来进行识别,这类方法大大减少了计算量,提高了识别效率,如神会存等<sup>[11]</sup>提出的基于顶点法矢的分割方法,但是这种方法是交互式的,没有实现边界识别的自动化;谭昌柏<sup>[12]</sup>提出了面积法矢原则来识别边界,这种方法能较好地识别出边界点,但是这种方法是通过直接比较三角面片的法矢夹角来实现的,误判为边界的噪声点较多,所以实际应用时,对于复杂型面来说,较难实现边界的准确定位。

针对激光再制造中大型损伤零件的缺陷识别,本文提出基于点特征面积累加的法矢法。该方法利用顶点之间法矢的变化来识别初始缺陷边界特征点,避免了求顶点曲率的复杂计算过程,简化了计算过程,同时在点特征面积累加的基础上,采用点与点间的法矢夹角代替三角面片间的法矢夹角,在保证能有效识别出边界的前提下,大大减少了边界中的噪声点。所以这种方法特别适用于激光再制造中大型、贵重零部件复杂型面的缺陷识别。

### 3.1 相关参数的计算

#### 3.1.1 顶点法矢的计算

大多数现有文献<sup>[13]</sup>的顶点法矢的计算方法是:将顶点邻域内三角面片的法矢进行面积加权平均,表示为

$$n_p = \frac{\sum_{i=1}^m S_i n_i}{\sum_{i=1}^m S_i}, \quad (1)$$

该方法并未考虑三角面片形状的影响,为此本文对(1)式进行了修正,表示为

$$n_p = \frac{\sum_{i=1}^m d_i S_i n_i}{\sum_{i=1}^m d_i S_i}, \quad (2)$$

这种方法主要考虑三角面片面积和形状对法矢的影响。式中, $d_i$ 为连接顶点 $P$ 和其对边中点的直线段的长度,以此值来表示三角形形状对法矢的影响,如图 2 所示。 $S_i$ 和 $n_i$ 分别表示第 $i$ 个三角面片的面积和法矢,可表示为

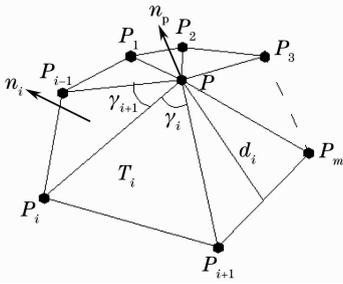


图 2 顶点法矢

Fig. 2 Normal vector of point

$$n_i = \frac{(P_i - P) \times (P_{i+1} - P)}{\| (P_i - P) \times (P_{i+1} - P) \|}, \quad (3)$$

$$S_i = \frac{\| (P_i - P) \times (P_{i+1} - P) \|}{2}. \quad (4)$$

### 3.1.2 顶点特征面积的计算

本文提出顶点特征面积的概念,以该值表示点的密集程度。其计算方法可表示为

$$S_{P_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma S_i}{\sum_{i=1}^n \gamma}. \quad (5)$$

首先计算出包含顶点  $P$  的所有面片的面积,然后根据各个面片的权值  $\gamma$  进行加权平均,得到顶点  $P$  的特征面积,其中  $\gamma$  表示第  $i$  个面片在顶点  $P$  处的内角,如图 2 所示。

### 3.2 初始边界特征点的识别流程

首先搜索出第  $i$  个顶点  $P_i$  的所有邻近点,计算  $P_i$  与每个邻近点法矢间的夹角  $\alpha_{i,j}$ ,并将该夹角与法矢夹角阈值  $\alpha_{thd}$  进行比较,如果存在  $\alpha_{i,j} > \alpha_{thd}$ ,则设定这两个点为初始边界特征点;如果所有的夹角都小于  $\alpha_{thd}$ ,则重复下述步骤:1) 设定  $P_i$  作为初始种子点,沿着与该点法矢夹角最大的方向生长,将生长得到的邻近点  $P_k$  的特征面积  $S_{P_k}$  与特征面积平均值  $S_{avg}$  进行比较,若大于设定的平均面积  $S_{avg}$ ,则停止生长,并判定  $P_i$  为非边界点;2) 如果邻近点  $P_k$  的特征面积小于  $S_{avg}$ ,则对  $P_k$  的特征面积  $S_{P_{adj}}$  进行累加,并将累加得到的特征面积之和  $S_{add}$  与累加面积阈值  $S_{thd}$  进行比较,如果  $S_{add} > S_{thd}$ ,则计算最初选取的初始种子点与最后一次累加的顶点之间的法矢夹角,与设定的法矢夹角阈值  $\alpha_{thd}$  相比较,如图 3 所示;如果大于  $\alpha_{thd}$ ,则在初始种子点的所有邻近点中,与其法矢夹角最大的邻近点为边界点。如果  $S_{add} < S_{thd}$ ,则将该邻近点  $P_k$  作为新的种子点,沿着与其法矢最大夹角方向进行生长,重复上述过程,继续寻找边界点,直到遍历所有的顶点即完成初始边界特征点的搜索过程,具体流程如图 4 所示。

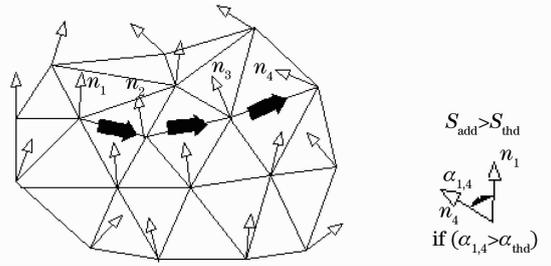


图 3 计算不相邻点之间的法矢夹角

Fig. 3 Angle is computed from two nonadjacent normals

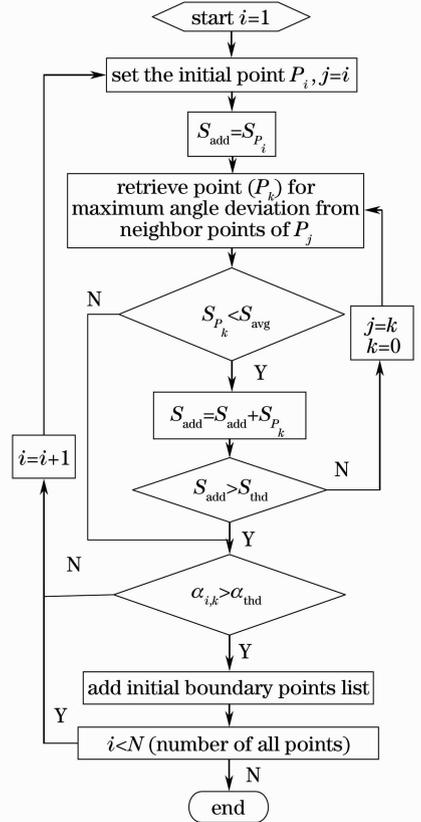


图 4 初始边界特征点的识别算法

Fig. 4 Algorithm of initial boundary point detection

## 4 构造初始缺陷边界线

遍历初始缺陷边界点集合,连接点与相邻的边界点,重复这个过程直到集合中搜寻不到相邻的边界点为止,这就生成初始缺陷边界线,如图 5 所示。

基于点特征面积累加的法矢法能识别出大多数缺陷边界点,但是由于大多数激光再制造零件的损伤部位形貌复杂,加上扫描过程中的反射光等原因,得到的点云数据中存在“噪声”和“畸变”,这就使初始缺陷边界线存在一些问题,主要包括:1) 有些边界点未被识别出来,这样就会使初始边界不连续;2) 杂点被误识别为边界点,使初始缺陷边界线有错误方向的边界分支,错误边界分支一共有 3 种情况:1)

有且仅有一条错误分支线,本文将这种情况称为“一条分支边界”;2) 短小锯齿边界,如果只存在一个误判为边界的点,且该点的一环邻近点中有两个点同时被识别为边界点,这样该 3 个点就组成自封闭的小碎片,本文称其为短小锯齿边界;3) 狭长锯齿边界,相邻的多个点被误判为边界点,同时有边界点未被识别出来,如图 5 所示,这些误判点连接成狭长锯齿边界。

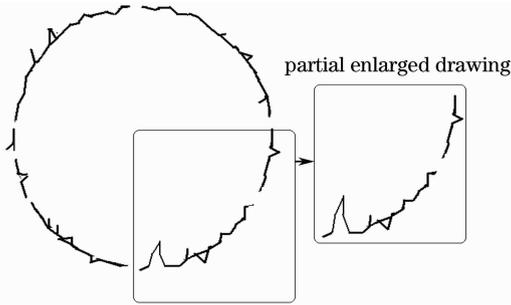


图 5 缺陷边界簇

Fig. 5 Defect boundary clusters

针对这些情况,提出了三步优化法对初始缺陷

边界线进行优化。

## 5 初始边界优化

### 5.1 填补间隙

由于初始边界特征点识别过程中,有些特征点没有被识别出来,导致有些初始缺陷边界线被分段 [图 6(a)],无法形成封闭的区域,针对这种情况,采用邻近点搜索法,在边界曲线簇中搜索相邻的边界特征线段,计算相邻边界线端点之间的距离,如果该距离小于  $1.5\bar{d}$  平均值,则直接连接这两个点,如果大于  $1.5\bar{d}$ ,则分别搜索相邻线段的端点的一环、二环邻近点集合,查询两端点的一环、二环邻近点集合是否有交集。如果有,则设定交集集中的点为边界特征点,加入已识别出的初始边界特征点集中,并连接该交集点与两边界端点。

实验证明,同一边界曲线上的所有的间隙在该搜索过程中都能被填补上,优化结果如图 6(b)所示。如果一环、二环所有邻近点集中都没有交集,那么终止该搜索过程,认定这两条边界线不属于同一边界。

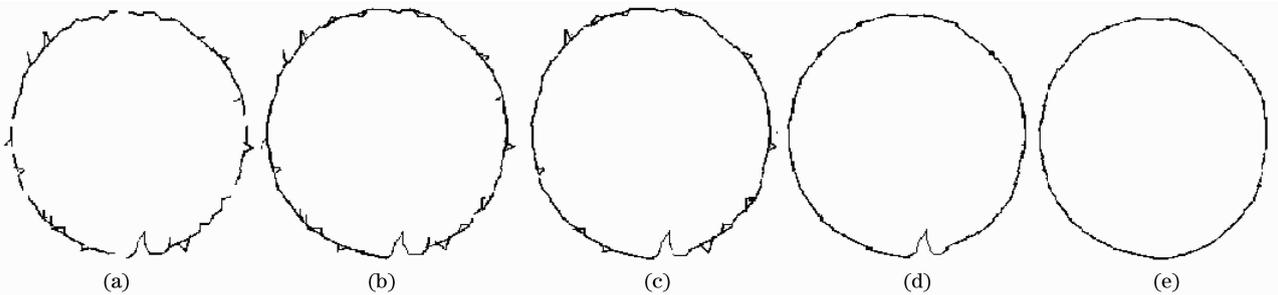


图 6 各步骤优化结果。(a)初始缺陷边界簇;(b)填补间隙结果图;(c)修剪多分支结果图;(d)去除短小锯齿边界结果图;(e)去除狭长锯齿边界结果图

Fig. 6 Optimization results of each step. (a) Initial boundary clusters; (b) graph after filling gaps; (c) graph after pruning branches; (d) graph after removing short serrated boundaries; (e) graph after removing long serrated boundaries

### 5.2 去除一条分支边界和短小锯齿的优化

由于有些不属于边界线上的点被识别成特征点,所以初始边界特征线上会有错误方向的分支。在没有噪声的理想情况下,过每个特征点共有 2 条边,由于存在噪声点,可能存在 3 条,甚至 4 条分支线段,如图 7 所示,  $W$  为噪声点,过  $B$  点有 3 条分支,其中  $BW$  是多余的错误分支,由于  $M$  点也被误判为边界点,同时  $C$  和  $D$  点都是  $M$  点的一环邻近点,所以,生成短小锯齿边界  $CMD$ 。

对实际损伤零件的点云进行统计,结果显示误判为边界点的错误方向分支的长度都比较短,设定  $2\bar{d}$  为上限值,如图 7 所示,如果某边界点至少有 2 条邻边的长度大于  $2\bar{d}$ ,则删除所有长度小于  $2\bar{d}$  的边界分支,利用该步骤可删除  $WB$  和  $MD$  分支,该步骤

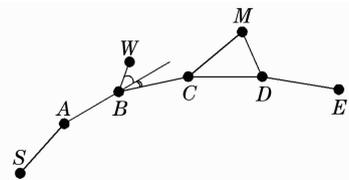


图 7 去除错误分支及短小锯齿

优化后,如果还存在某边界点的多条分支的长度都大于  $2\bar{d}$ ,如图 7 所示,过  $C$  点的分支  $BC$ 、 $CD$  和  $MC$  的长度都大于  $2\bar{d}$ ,则可通过判断每个分支与前一段边界延长线之间的夹角来优化,如果  $MC$  与  $BC$  延伸线的夹角大于  $CD$  与  $BC$  延伸线的夹角,则删除  $MC$  分支,优化结果只保留  $CD$  边,优化结果如图 6(c) 和 (d) 所示。

### 5.3 狭长锯齿边界光顺

如图 8 所示,折线  $BCD$  为正确边界,而由于扫描环境的限制, $C$  点未被识别出来,同时  $Q$ 、 $M$  和  $N$  被误判为边界点,这就使缺陷边界出现狭长锯齿  $BMQND$ ,针对这种情况,采用最短路径法对其进行优化。首先搜索  $B$  点的一环、二环邻近点,保存所有以  $B$  点和  $D$  点为端点的路径;以边长为权值,计算每条路径的权值,从中选取最短的一条路径  $BCD$ ,删除路径  $BMQND$ ,至此,狭长锯齿边界得到优化,优化结果如图 6(e) 所示。

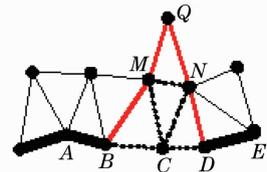


图 8 狭长锯齿边界光顺

Fig. 8 Figure of smoothing short serrated boundaries  
室内室外均可进行扫描。由于泵盖上孔洞数量多,降低缺陷识别效率,所以零件扫描之前,把泵盖上所有的孔洞都填补好,并且压平。图 9(a) 为损伤泵盖的测量数据,包含 30267 个测量点,损伤部位位于泵盖止口处,缺陷边界为复杂的空间曲线,损伤部位形貌复杂,最严重磨损处深 10 mm,最小磨损处深 0.8 mm,零件模型中三角面片的大小不均匀,同时缺陷边界过渡区域较小,采用曲率法提取的缺陷区域边界效果不理想,不能对缺陷区域准确定位。

## 6 应用实例

图 9 为某进口污水增压泵泵盖缺陷边界自动提取实例。首先利用 Handyscan 扫描仪,对泵盖进行三维点云数据获取,该扫描仪对扫描环境要求很低,

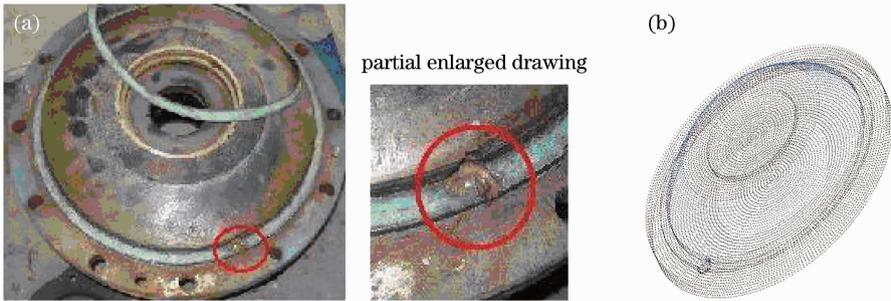


图 9 泵盖图。(a) 泵盖实物图;(b) 点云数据

Fig. 9 Figure of pump cover. (a) Photo of pump cover; (b) point cloud

采用本文的边界自动识别算法可准确提取出破损区域的数据,如图 10 所示。识别算法中设置累计面积阈值  $S_{thd}$  为  $2.2S_{avg}$ ,顶点法矢夹角阈值  $\alpha_{thd}$  为  $15^\circ$ ,共识别出 2683 个边界点,处理时间为 41.2 s。将

系统识别的缺陷边界和预先人工识别的缺陷边界进行比较,识别出的边界误差范围在 0.01~0.96 mm,完全可以满足实际激光再制造的生产需求。

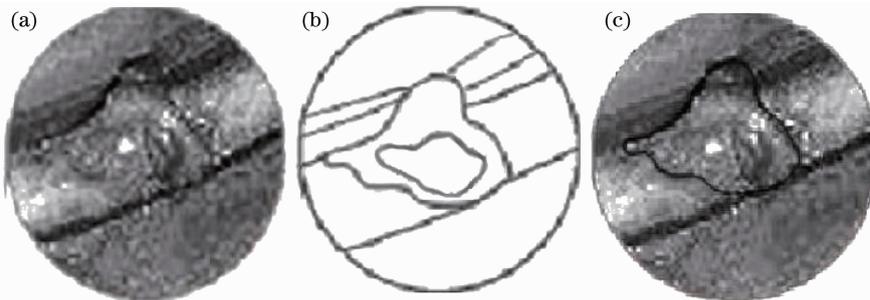


图 10 提取复杂型面的损伤区域边界。(a) 损伤部位图;(b) 识别出的边界;(c) 缺陷区域信息提取

Fig. 10 Detection defect edges of complex part. (a) Defect model; (b) identified edges; (c) informations extraction of defect area

零件再制造过程后泵盖需要精密机械加工,采用车床和铣床对其进行加工,去除多余熔覆材料,达到原件尺寸和精度要求,如图 11 所示。加工后,泵

盖的平面跳动小于 0.02 mm,与传统的激光再制造方法相比,大大提高了激光再制造的精度,完全满足用户要求。

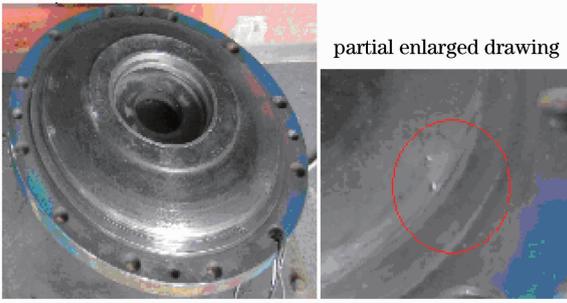


图 11 泵盖加工图

Fig. 11 Processing figure of pump cover

## 7 结 论

激光再制造机器人系统首次将缺陷识别技术应用于激光再制造中的损伤零件,研制出复杂形貌零部件的缺陷识别系统。该系统提出基于点特征面积累加的法矢法来识别缺陷区域边界,实验证明该方法能迅速、准确地识别出复杂形貌损伤部位的边界。需要指出的是由于扫描环境的限制,损伤边界的点云数据存在“噪声”和“畸变”,目前,该系统能识别出的圆形边界的最小直径为 3 mm,最小方形边界边长为 4 mm。对于这类缺陷需将二维图片和三维点云数据结合起来识别,该问题有待进一步研究。

### 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 Yang Xichen, Zhang Haiming, Liu Lifeng *et al.*. Machine vision in laser remanufacturing robot [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发展[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601008
- 3 Liu Lifeng, Yang Xichen. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0703008  
刘立峰, 杨洗陈. 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0703008

- 4 Li Changle. Research on Key Techniques of Surface Defect Image Detection for Cold Rolled Strip[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. 17~19  
李长乐. 冷轧带钢表面缺陷图像检测关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. 17~19
- 5 Duanhu Shi, Tie Gang, Shuang Yang. Research on segmentation and distribution features of small defects in precision weldments with complex structure [J]. *NDT&E International*, 2007, **40**(5): 397~404
- 6 Zhu Min, Lu Hongyi, Li Haiyan. Design of 3D visualization nondestructive inspection system for solid rocket motor[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(7): 891~896  
朱敏, 卢洪义, 李海燕. 固体火箭发动机三维可视化无损检测系统设计[J]. *兵工学报*, 2008, **29**(7): 891~896
- 7 Shin Yoshizawa, Alexander Belyaev. Fast, robust, and faithful methods for detecting crest lines on meshes[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2008, **25**: 545~560
- 8 M. J. Milroy, C. Bradley, G. W. Vickers. Segmentation of a wrap-around model using an active contour[J]. *Computer-Aided Design*, 1997, **29**(4): 299~320
- 9 He Meifang, Zhou Laishui, Zhang Liyan *et al.*. Segmentation of scattered point data through a new curvature analysis algorithm [J]. *Journal of Southeast University(English Edition)*, 2004, **20**(1): 90~95  
贺美芳, 周来水, 张丽艳等. 基于一种新的曲率分析算法对散乱数据点云分块[J]. *东南大学学报(英文版)*, 2004, **20**(1): 90~95
- 10 Ke Yinglin, Chen Xi. Automatic method for broken boundary extraction[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, **17**(6): 1316~1321  
柯映林, 陈曦. 叶片破损区域边界的自动提取算法研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, **17**(6): 1316~1321
- 11 Shen Huicun, Zhou Laishui, An Luling *et al.*. Vertex normal calculation and interactive segmentation of triangle mesh. [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, **17**(5): 1030~1033  
神会存, 周来水, 安鲁陵等. 曲面三角网格模型顶点法矢计算与交互式分割[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, **17**(5): 1030~1033
- 12 Tan Changbai. Research on Key Technology in Feature-Based Reconstruction of Solid Model in Reverse Engineering [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. 15~22  
谭昌柏. 逆向工程中基于特征的实体模型重建关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. 15~22
- 13 D. L. Page, A. Koschan, Y. Sun *et al.*. Robust crease detection and curvature estimation of piecewise smooth surfaces from triangle mesh approximations using normal voting[C]. In Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. 162~167

栏目编辑:宋梅梅