

插值 Loop 曲面细分算法在堆焊自由曲面重建中的应用

洪波 李鹏 吴宏宝 陈实

(湘潭大学 机械工程学院//焊接机器人与应用技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 针对堆焊自由曲面焊缝形貌不规则致使焊缝识别精度低、自动焊接困难的问题, 提出了一种利用插值 Loop 曲面细分算法对旋转电弧传感器采集的堆焊焊缝三维形貌数据进行曲面重建的方法。首先, 采用格拉布斯 (Grubbs) 检验算法对异常采样点进行滤波处理, 得到质量较高的形貌数据; 然后, 采用局部最优 Delaunay 算法对形貌数据进行初始三角网格剖分; 最后, 利用插值 Loop 曲面细分算法对初始三角网格进行曲面细分, 实现焊缝三维形貌重建。结果表明, 此方法的曲面重建效果良好, 降低了初始三角网格剖分的误差, 实用性强。

关键词: 堆焊自由曲面; 旋转电弧传感器; 曲面细分; 曲面重建; 焊缝识别

中图分类号: TG 409

文章编号: 1000-565X(2020)08-0139-06

自由曲面重建技术是逆向工程中的关键步骤, 其主要思想是通过扫描物体获取物体表面的三维信息, 预处理采样点云也即待重建物体表面的三维信息, 构造采样点云之间的拓扑关系并利用计算机技术逐步还原物体的本来形貌。

在一些特定场景, 产品的已有技术信息丢失, 就需要反向得到产品的三维信息。逆向工程可以做到产品的再复原, 主要方法是曲面重建, 主要任务是采集点云数据, 对数据进行预处理, 然后选择合适的重建方法对数据进行网格划分, 利用计算机还原物体的原有形貌。在焊缝信息检测中, 电弧传感器和激光传感器的应用较为广泛。激光传感器由于其非接触、信息量大等优点而得到了广泛的应用, 但基于视觉传感的图像处理复杂, 降低了实时性, 而且待测试样表面形态对数据采集的影响较大。旋转电弧传感器具有实时性强、可达性好、抗弧光等特点, 已被越来越多地用于焊缝跟踪。

在堆焊的相关研究过程中, 苏伯中^[1]针对法

兰密封槽曲面人工堆焊耗时费力、精度较低的情况, 基于 PLC 控制伺服系统和步进系统多轴联动实现法兰密封槽曲面的自动堆焊, 该方法定位准确、精度较高; 兰强等^[2]针对自由曲面自动堆焊不等厚问题, 设计了驱动电路及数字电子电位器, 该方法的自由曲面自动堆焊效率高, 可实现自由曲面自动堆焊等厚焊接; 温强^[3]针对自由曲面表面修复难的问题, 在 dsPIC30f6011 的基础之上设计了一套自动堆焊系统, 该系统结构简单、运行稳定; 洪波等^[4]针对多层堆焊表面变形较大、堆焊困难的问题, 提出了分区间 Kriging 插值增长的 Delaunay 模型, 就堆焊实验效果来看, 实现了堆焊表面曲面重建, 但应用范围与跟踪精度不是特别理想。

本文针对堆焊自由曲面焊缝形貌不规则致使焊缝识别精度低、自动焊接困难的问题, 利用旋转电弧传感器, 提出了一种利用插值 Loop 曲面细分算法对旋转电弧传感器采集的堆焊焊缝三维形貌数据进行曲面重建的方法。首先采用格拉布斯

收稿日期: 2019-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51575468)

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51575468)

作者简介: 洪波 (1960-), 男, 教授, 主要从事焊接机器人和自动化、焊接工艺及装备研究。E-mail: hongbo@xtu.edu.cn

(Grubbs) 检验算法^[5]对异常采样点进行过滤处理, 然后采用局部最优 Delaunay 算法对采样点的三维数据进行初始三角网格剖分, 最后利用插值 Loop 曲面细分算法对初始三角网格进行曲面细分处理, 实现焊缝三维形貌重建。

1 自由曲面采样点坐标分析

为了确定电弧采样点的空间坐标, 以电弧旋转中心为坐标原点 o , 焊接方向为 X 轴, 焊枪轴线为 Z 轴, 建立空间直角坐标系, 如图 1 所示。其中, 电弧旋转半径为 r , 角速度为 ω , $X(t) = r\cos(\omega t)$, $Y(t) = r\sin(\omega t)$, 电弧长度用 $H(t)$ 表示, 将其离散化为 $H(i)$, $X(i)$, $Y(i)$ 。

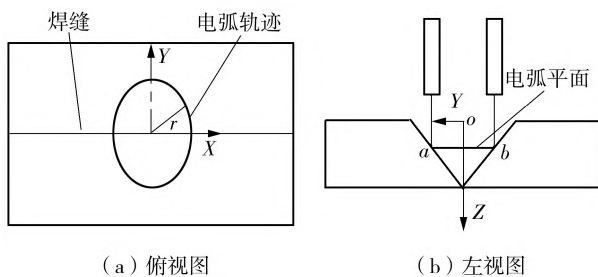


图1 旋转电弧的空间位置图

Fig. 1 Space position map of rotational arc

将旋转一周的电弧视作一个空间平面^[6], 任何角度的电弧平面均可表示为

$$Z = AX + BY + C \tag{1}$$

变形为

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \tag{2}$$

$$\text{令 } \boldsymbol{\beta} = (\beta_0, \beta_1, \beta_2)^T,$$

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} \\ 1 & X_{21} & X_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} \end{bmatrix}, \text{ 对电弧长度进行最小二乘}$$

拟合, 可得到该平面的 $\boldsymbol{\beta}$ 值, 即

$$\sum_{i=1}^n (H_i - \sum_{j=0}^2 X_{ij}\beta_j)^2 = \min \sum_{i=1}^n (H_i - \sum_{j=0}^2 X_{ij}\beta_j)^2 \tag{3}$$

式中, n 为拟合次数。

式 (3) 可变形为

$$\sum_{i=1}^n H_i X_{ik} = \sum_{j=0}^2 \left(\sum_{i=1}^n X_{ij} X_{ik} \right) \beta_j, \quad k = 0, 1, 2 \tag{4}$$

即

$$\boldsymbol{\beta} = (\boldsymbol{X}^T \boldsymbol{X})^{-1} \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{H} \tag{5}$$

将 $\boldsymbol{\beta}$ 代入式 (2) 中, 即可求得 Z 值, 式中的

\boldsymbol{H} 则由传感器采集得到的电流值转换后得到。

2 数据预处理

为了保证对采样点的实时处理而不影响焊接进程, 本文以 8 个连续旋转周期为采样周期, 并且每个旋转周期只取前半周期的采样点进行处理, 即每周期取 32 个采样点, 以期达到最佳的焊缝形貌重建效果。影响形貌质量最为直接的参数是其采样点的高度数据即 Z 值, 因此本文根据 Z 值, 采用 Grubbs 检验算法^[5]对采样点进行过滤。

为了检验 $Z_{(i)} (i = 1, 2, \dots, n)$ 中是否存在可疑数据, 先根据 $Z_{(i)}$ 数值大小对其进行升序排列, 得到 $Z_{(1)} \leq Z_{(2)} \leq \dots \leq Z_{(n)}$ 。

根据顺序统计的原则, 给出标准化顺序统计量 g : 当最小值 $Z_{(1)}$ 可疑时 $g_{(1)} = [\bar{Z} - Z_{(1)}] / \bar{S}$, 当最大值 $Z_{(n)}$ 可疑时 $g_{(n)} = [Z_{(n)} - \bar{Z}] / \bar{S}$, \bar{Z} 为测量值的算术平均值, \bar{S} 为测量值的标准差。

在指定的显著性水平 β (通常 $\beta = 0.05$) 下, 求出判别可疑值的临界值 $g_{0(\beta, n)}$, 格拉布斯检验算法的判别公式为

$$g \geq g_{0(\beta, n)} \tag{6}$$

如果满足式 (6), 则认为可疑值 $Z_{(i)}$ 是异常的, 应予舍去。以第一个前半周期采样点数据为例, 经过上述算法处理后, 结果如图 2 所示, 剔除了异常采样点, 可得到质量较高的数据, 以便后续使用。

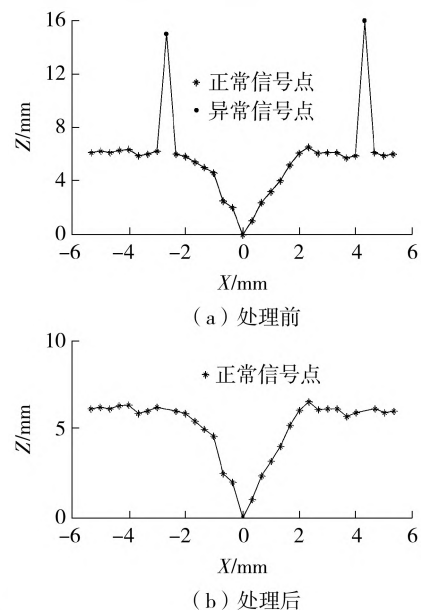


图2 异常采样点数据过滤处理前后的比较

Fig. 2 Comparison of data before and after filtering at abnormal sampling points

3 焊缝三维形貌的重建

3.1 三维数据的初始三角网格剖分

首先采用局部最优 Delaunay 三角剖分算法对采样点集进行切平面的网格划分, 然后利用经计算得到的网格顶点的法向量, 基于二维平面的网格计算, 可得到三维空间的 Delaunay 三角网格^[7]。

3.1.1 局部最优 Delaunay 三角网格剖分

设 P 是位于某平面上的散乱点集, 在一定规则下用直线将此平面上任意分布的散乱点依次连接, 从而形成平面中连续且不重叠的紧邻三角集^[8]。最小内角三角形对边调整过程如图 3 所示。如果满足 $\min \alpha'_i \leq \min \alpha'_j$, 则 $P_i P_j$ 是不合理的, 此时必须调整对角边, 使其达到合理的三角剖分。

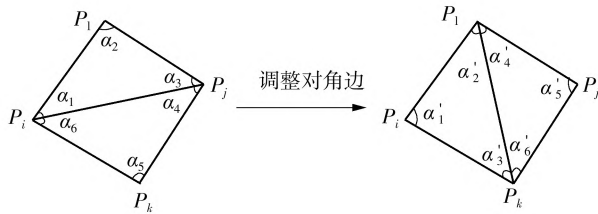


图 3 最小内角最大化准则

Fig. 3 Maximization criterion of inimum internal angle

根据上述判别准则, 局部最优 Delaunay 三角网格剖分的基本计算步骤如下:

(1) 增加 3 个辅助点以构造能够包含所有进行三角剖分的点的初始三角网格;

(2) 寻找包含点集 P 中未处理过的点 x 的三角网格, 并将 x 与该三角网格的 3 个顶点相连, 在产生新的三角网格的同时删除原三角网格, 按照上述准则对平面所有网格进行角度调整, 使该平面网格达到最优化;

(3) 删除增加的点及与之相连的三角网格, 由此形成了局部最优的 Delaunay 三角网格。

3.1.2 网格顶点的法向量计算

给定网格顶点 V 的最近点集 $Q = \{Q_i | i = 1, 2, \dots, k\} \subset P$, 若 V 点满足

$$C = \sum_{i=1}^k (Q_i - V)^T (Q_i - V) \quad (7)$$

则 C 的最小特征值对应的特征向量即为最优法向量 N ^[9], 将 N 代入 3.1.1 节中得到的二维三角网格, 即可形成三维三角网格 T 。

3.2 插值 Loop 曲面细分

曲面细分主要经反复细化初始三角网格进而多

次生成控制网格顶点实现, 求出控制网格 M , 使用 M 的顶点对点集 P 进行插值, 即 M 中顶点的细分极限位置与 T 中顶点重合^[10]。

设控制网格 M 的第 i 个顶点 x_i 的极限位置为 x_i^∞ , T 的第 i 个顶点为 v_i , 定义误差函数为

$$E = \max_i |x_i^\infty - v_i| \quad (8)$$

以三角网格 T 的顶点 v_i 为初始值, 采用 Richardson 松弛迭代法求解 M 中的顶点 x_i , 其迭代公式及相应的盈亏公式如下:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \mu \left(\frac{1}{l_i} v_i - \sum_{j=1}^n p_{ij} x_j^{(k)} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中, μ 取经验值 0.14, 此时的收敛速度较快, p_{ij} 的计算公式为

$$p_{ij} = \begin{cases} (1 - n_i l_i) / l_i, & i = j \\ 1, & i \neq j \text{ 且顶点 } v_i, v_j \text{ 相邻} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$l_i = \frac{1}{n_i + 3 / (8 a_i)} \quad (11)$$

$$a_i = \frac{1}{n_i} \left[\frac{5}{8} - \left(\frac{3}{8} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{n_i} \right) \right] \quad (12)$$

盈亏修正公式如下:

$$x_i^* = x_i + r_i \quad (13)$$

$$r_i = \mu \left(\frac{1}{l_i} v_i + \frac{1 - n_i l_i}{l_i} x_i - \sum_{j \in i^*} x_j \right) \quad (14)$$

式中, r_i 为修正量, x_i^* 为修正后的位置, i^* 为与 x_i 相邻的顶点的指标集^[11]。

基于上述迭代算法, 插值 Loop 曲面细分三维数据的主要处理步骤如下:

(1) 输入三维数据 P , 经局部最优 Delaunay 三角网格剖分算法处理, 得到三角网格 T 。

(2) 设定拟合精度 $\varepsilon > 0$, 将 T 的顶点 v_i 作为细分曲面初始控制网格 M^0 的顶点 x_i^0 , 即 $k = 0$ 。

(3) 计算误差 $E^{(k)} = \max_i |(x_i^{(k)})^\infty - v_i|$ 。

(4) 若 $E^{(k)} < \varepsilon$, 则输出细分曲面的控制网格 $M^{(k)}$ 和顶点集 $\{x_i^{(k)}\}$; 否则, 对 $M^{(k)}$ 中的每个顶点, 按照修正公式 (13) 进行位置修正, 得到 $M^{(k+1)}$, $k = k + 1$, 返回步骤 (3)。

采用局部最优 Delaunay 算法对预处理后的采样点进行初始三角网格剖分, 结果如图 4 (a) 所示, 网格稀疏, 曲面不够光滑^[12]。然后采用曲面

细分算法进行处理,结果如图4(b)、4(c)所示,经过两次细分后,网格足够密集,焊缝表面光滑,细分之后的焊缝坡口形貌更规则、更合理。焊缝坡口形貌重建效果良好,明显降低了 Delaunay 算法处理后的误差,整体算法流程共用时 68.35 ms,表明计算时间短,算法重构精度高^[13]。

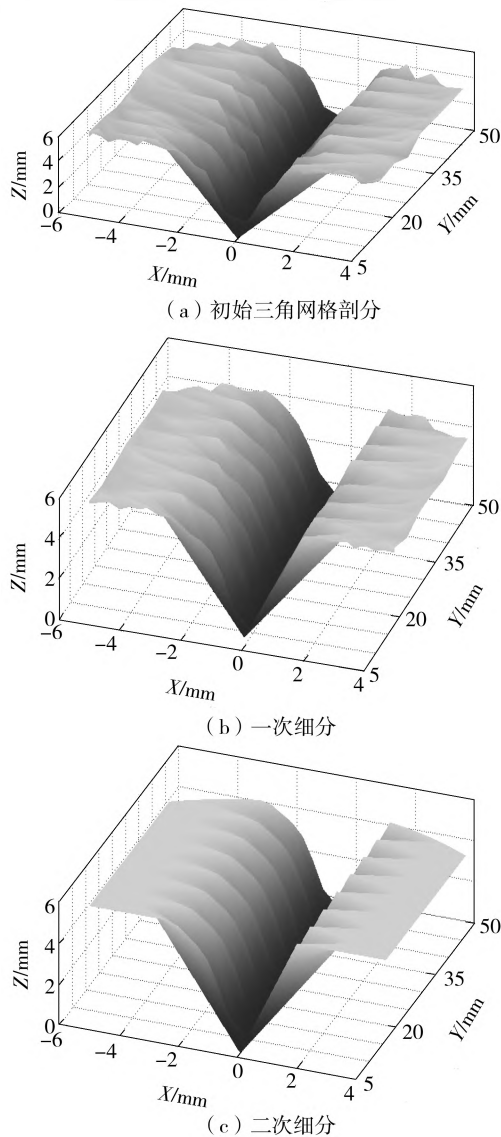


图4 曲面细分效果

Fig. 4 Curved surface subdivision effect

提取两次细分之后的网格中与初始采样点横、纵坐标相同的坐标点,将坐标 Z 与初始采样点坐标 Z 做差处理,进而拟合三维曲面,可得到误差云图,如图5所示。从图中可知,高度越高,颜色越深,误差越大,图中凸起处即为焊缝处,表明误差主要集中在焊缝坡口处,符合实际情况,细分网格的误差在 0.15 ~ 0.60 mm 之间,满足精度要求^[14]。

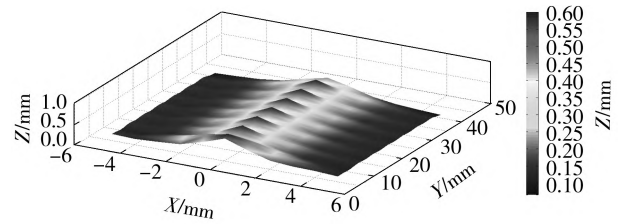


图5 三维曲面的误差云图

Fig. 5 Deviation contours of 3D surface

4 焊缝跟踪实验及结果分析

经过上述局部最优 Delaunay 算法处理后,即可得到空间的三维细分网格,实现堆焊自由曲面的焊缝重建,并利用串口通信将形貌信息传递至自动焊接系统的信息处理模块,经其处理后将焊缝角度和偏差等信息反馈至执行机构,执行机构据此实时调节焊枪位置与角度,实现自动焊接。自动焊接系统的整体执行流程如图6所示^[15]。

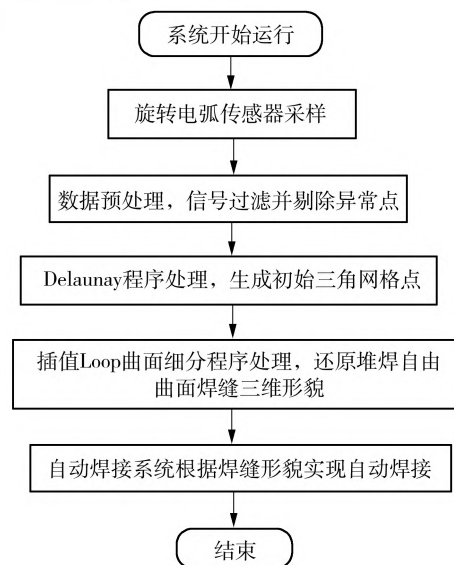


图6 自动焊接系统流程图

Fig. 6 Flowchart of automatic welding system

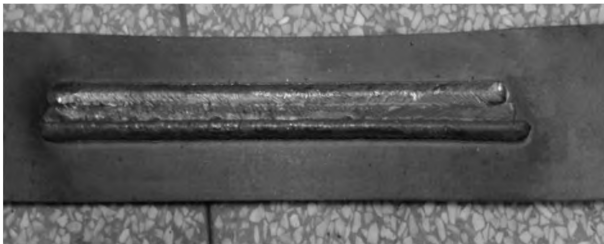
根据插值 Loop 曲面细分算法的原理,本文进行了旋转电弧的堆焊自由曲面焊缝重建及焊接实验,实验参数如下:焊件尺寸为 250 mm × 100 mm × 8 mm;电弧电压为 12 V,初始焊接电流为 200 A,焊接速度为 4.5 mm/s,初始焊炬高度为 14 mm,电弧采样频率为 25 Hz,电弧旋转半径为 6 mm,CO₂流量为 20 L/min。

堆焊实验效果如图7所示,从图中可知,本文方法根据堆焊层焊道坡口的曲面重建模型识别焊道排布偏差变化小,适用范围较广,且偏差识别精度

高, 焊道自动排布效果较好, 堆焊焊缝成型质量也较好^[16]。



(a) 实验实物图



(b) 未进行焊道排布识别的堆焊试样



(c) 平直堆焊焊道自动排布效果



(d) 曲面堆焊焊道自动排布效果

图7 堆焊实验结果分析

Fig.7 Results analysis of build-up welding experiment

5 结论

本文提出了一种基于插值 Loop 曲面细分算法的旋转电弧堆焊自由曲面焊缝重建的方法, 采用局

部最优 Delaunay 算法对形貌数据进行处理, 得到初始三角网格, 再通过对初始三角网格进行多次细分来实现焊缝形貌还原。实验结果表明: 该算法有效避免了传统曲面拟合算法复杂、计算量大、实时性差的缺点, 计算精度满足旋转电弧对堆焊自由曲面识别的要求, 实现了堆焊的跟踪; 该算法降低了初始三角网格的误差, 曲面重建效果良好, 实用性强。

参考文献:

- [1] 苏伯中. 法兰密封槽立向自动堆焊设备的研制 [J]. 焊接技术, 2012, 41(8): 47-49.
SU Bozhong. Development of vertical automatic surfacing equipment for flange sealing groove [J]. Welding Technology, 2012, 41(8): 47-49.
- [2] 兰强, 张秀云. 一种圆环面等厚自动堆焊方法 [J]. 电焊机, 2002, 32(7): 26-28.
LAN Qiang, ZHANG Xiuyun. Automatic surfacing welding method with equal thickness for circle plane [J]. Electric Welding Machine, 2002, 32(7): 26-28.
- [3] 温强. 基于触摸屏的轮心自动堆焊控制系统的研制 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [4] 洪波, 姚强, 尹力, 等. 基于 Delaunay 三角剖分的磁控旋转电弧堆焊自由曲面重建 [J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 25-28.
HONG Bo, YAO Qiang, YIN Li, et al. Free-form surface reconstruction of magnetically controlled rotary arc surfacing based on Delaunay triangulation [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 25-28.
- [5] 雷晓平. 浅谈可疑数据的取舍方法: 格拉布斯法 [J]. 河南建材, 2011(2): 163, 165.
LEI Xiaoping. Talking about the method of choosing and rejecting suspicious data: Grubbs [J]. Henan Building Materials, 2011(2): 163, 165.
- [6] 高延锋, 张华, 肖建华. 旋转电弧传感器焊枪空间姿态识别 [J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 78-81.
GAO Yanfeng, ZHANG Hua, XIAO Jianhua. Identification of welding torch attitude based on rotational arc sensor [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 78-81.
- [7] CAROLI M, TEILLAUD M. Delaunay triangulations of closed Euclidean d -orbifolds [J]. Discrete & Computational Geometry, 2016, 55(4): 827-853.
- [8] ZHANG D H, CUI G Y, BAI D P, et al. Point cloud simplification technology of 3D optical measurement applied on reverse engineering [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(3): 946-948.

- [9] 张剑清, 李彩林, 郭宝云. 基于切平面投影的散乱数据点快速曲面重建算法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2011, 36(7): 757-762.
ZHANG Jianqing, LI Cailin, GUO Baoyun. A fast surface reconstruction method based on tangent plane projection for scattered data points [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(7): 757-762.
- [10] 孙立镛, 鞠志涛. 渐进插值的 LOOP 曲面细分 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 766-768.
SUN Li-juan, JU Zhi-tao. LOOP subdivision surface of progressive interpolation [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2): 766-768.
- [11] WU Xiaoqun, ZHENG Jianmin, CAI Yiyu, et al. Variational reconstruction using subdivision surfaces with continuous sharpness control [J]. Computational Visual Media, 2017, 3(3): 217-228.
- [12] 李毅, 陈佳洋, 胡圣贤, 等. 基于旋转电弧的机器人角焊缝跟踪建模及仿真 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(3): 348-352.
LI Yi, CHEN Jiayang, HU Shengxian, et al. Modeling and simulation of robot fillet weld tracking based on rotating arc [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(3): 348-352.
- [13] 崔海花. 基于智能控制工程在机械电子工程中的应用 [J]. 数字技术与应用, 2017(5): 12, 14.
CUI Haihua. Application of intelligent control engineering in mechatronics engineering [J]. Digital Technology and Application, 2017(5): 12, 14.
- [14] 吴忻生, 任华瑛. 非完整移动机器人轨迹跟踪的最优模糊控制 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2004, 32(3): 44-49.
WU Xin-sheng, REN Hua-ying. An optimized fuzzy control approach to the trajectory tracking of nonholonomic mobile robots [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(3): 44-49.
- [15] 洪波, 柳健, 洪宇翔, 等. 基于 Kalman 滤波的磁控旋转电弧传感器焊缝跟踪偏差预测 [J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 55-58.
HONG Bo, LIU Jian, HONG Yuxiang, et al. Prediction of welding seam tracking deviation of magnetron rotary arc sensor based on Kalman filter [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(5): 55-58.
- [16] 成利强, 王天琪, 侯仰强, 等. 中厚板 V 形坡口多层多道焊机器人焊接技术研究 [J]. 焊接, 2018(2): 10-13, 62.
CHENG Liqiang, WANG Tianqi, HOU Yangqiang, et al. Robot welding technology of V groove for heavy plate based on multi layer and multi pass welding [J]. Welding & Joining, 2018(2): 10-13, 62.

Application of Interpolation Loop Surface Subdivision Algorithm in Free Surface Reconstruction of Surfacing

HONG Bo LI Peng WU Hongbao CHEN Shi

(School of Mechanical Engineering// Key Laboratory of Welding Robot and Application Technology of Hunan Province, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the problems of low weld seam recognition accuracy and difficult automatic welding caused by the irregular shape of the weld seam of the surfacing free-form surface, a surface reconstruction method using the interpolation Loop surface subdivision algorithm for the three-dimensional morphological data of the surfacing welds collected by the rotating arc sensor was proposed. Firstly, high-quality topography data was obtained by using the Grubbs test algorithm to filter the abnormal sampling points. Then, initial triangle meshing on topography data was carried out by using local optimal Delaunay algorithm. Finally, interpolation Loop tessellation algorithm was used to tessellate the initial triangle mesh in order to rebuild the three-dimensional appearance of weld. Research result indicates that this method has good surface reconstruction effect and can reduce the error of the initial triangle meshing. Thus it has high usability.

Key words: free-form surfacing; rotating arc sensor; surface subdivision; surface reconstruction; welding seam recognition