

激光熔覆曲面分片机械臂与变位机的轨迹规划

刘金朵, 孙文磊, 黄勇

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047

摘要 激光熔覆修复的破损区域为曲率变化大的自由曲面时,加工轨迹不易规划,熔覆精度受影响。针对此问题,提出了一种将快速生成的轨迹点集按特征类型进行区域划分的方法。机械臂在相同区域工作时关节角度变化较小,配合变位机将相邻区域内的轨迹点调至满足熔覆质量要求的位姿。建立了机器人与变位机的运行模型,达到了协调配合的目的,满足了激光加工精度要求,提高了机器人修复曲面零件的效率。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 曲面零件; 轨迹规划; 区域划分; 协调配合

中图分类号 TG432

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071402

Trajectory Planning of Curved Surface Subdivision Robot Arm and Positioner by Laser Cladding

Liu Jinduo, Sun Wenlei, Huang Yong

School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047, China

Abstract It is difficult for path planning of processing and the cladding accuracy is susceptible when the damaged area repaired by laser cladding is a free-form curved surface with an obvious curvature change. As for the above problem, a method of regionalization of the fast generated trajectory point set according to feature type is proposed. The joint angle of robot arm has a little change when working in the same area. The track points in the adjacent area are adjusted to meet the requirement of cladding quality under the coordination of the positioner. The operation model of robot and positioner is established and the aim of their coordination is obtained. The precision requirement of laser processing is met and the efficiency of robot repair of curved parts is improved.

Key words laser technique; laser cladding; curved surface part; trajectory planning; region partitioning; coordination

OCIS codes 140.3390; 390.3390; 140.3460

1 引言

再制造技术能使受损零件恢复到原有形状或者近似原型尺寸,同时性能达到或高于原件基材水平。激光熔覆作为再制造技术的主要方法之一,利用激光束与零件间的相互作用对基体进行微加工,应用范围日趋广泛^[1-3]。

在生产制造中,曲面广泛出现在航空航天、汽车零件等领域。由于曲面零件的曲率变化,熔覆时激光无法像修复平面零件时那样只需左右前后移动即

可达到质量要求。黄勇等^[4]通过平面与点云求交得到密集离散点,以离焦量变化极限为约束条件,搜索出轨迹点并计算其法矢量。陈影等^[5-6]提出了一种基于切平面法和路径生成法的激光熔覆方法,得到了切平面间距、加工步长及轨迹上的插补点集,获取了表面质量良好的熔覆层。黄海博等^[7]以切平面与点云宽带平面的交点轨迹作为激光束扫描轨迹,根据等弓高误差法确定了加工点。研究者们大多利用点云数据求出加工点,再筛选得到符合条件的点后

进行加工。

收稿日期: 2017-12-25; 收到修改稿日期: 2018-01-19

基金项目: 新疆高技术研究发展项目(201513102)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(2016D01C055)

作者简介: 刘金朵(1993—),女,硕士研究生,主要从事激光熔覆、再制造方面的研究。E-mail: 1770459528@qq.com

导师简介: 孙文磊(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事计算机辅助设计与制造、制造业信息化技术等方面的研究。E-mail: sunwenxj@163.com(通信联系人)

轨迹点间法向量变化的不确定性导致激光加工中机械臂转动的角度变化范围不确定。为使机器人在零部件的加工区域内平稳运动,本文结合切片理论与由搜索插补点算法生成的路径点集,按条件划分出有限个区域,同一区域内机械臂的关节转角不大,不同区域间用变位机进行位置调整,实现了优质高效的熔覆质量。

2 曲面分片算法

2.1 曲面离散成点

针对曲面零件的激光熔覆修复工艺,利用软件生成所有轨迹点。该软件利用切片理论,生成一组厚度为 0 、方向与轨迹垂直的平面片,同时将切片之间的距离设置为熔覆搭接率,取搭接率的 30% 。每一切片与待加工零件破损区域的三角面片产生交点,在平面内连接这些交点形成轨迹线段。利用激光离焦量

因素去除多余点,达到质量要求的同时减少数据量,故利用搜索插补点算法,得到了最终轨迹路径点。

图1所示为插补原理示意图,其中 K_i 为插补点,弧长 $K_i K_{i+1}$ 代表两点之间的激光路径,所对应的弦长为 L_i ,弦长与弧长之间的最大距离记为 ϵ_i ,用来限制激光离焦量的变化。利用插补原理将交线离散成最终轨迹点,此种离散方式精度高,可将误差控制在允许范围内^[8]。利用Unigraphics NX(UG)应用程序编程接口(API)实现此算法,生成过程如图2所示。

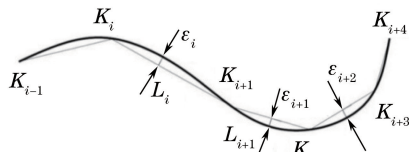


图1 插补原理示意图

Fig. 1 Schematic of interpolation principle

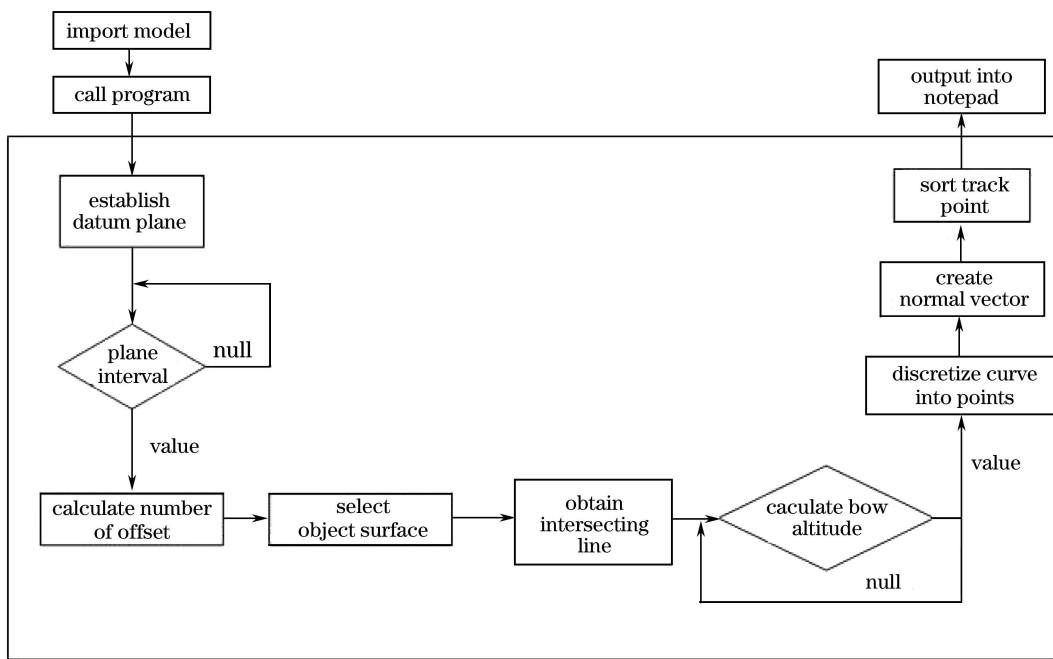


图2 基于UG API生成曲面零件熔覆轨迹的流程图

Fig. 2 Flow chart of cladding tracks for formation of curved parts based on UG API

2.2 曲面分片

工业领域中零件的外形不仅仅是特定的标准面,形式多变的零件也越来越常见。当零件发生损坏需要进行修复时,由于其形状特征的复杂性,激光修复轨迹规划较为困难。

单道轨迹点矢量图如图3所示,其中黄色箭头为点在曲面上的法向量,代表激光射入时的姿态。可以看出,当曲面零件的曲率变化较大时,从起始点到终点激光的角度变化较大。针对此问题,提出一

种将曲面分割成几个不同区域的方法,划分标准为曲面的特征类型。不同区域之间利用变位机进行位置调整并与机械臂配合,以提高工作效率,获得较好的熔覆质量。

分片算法根据加工精度的要求将曲面离散成轨迹点,然后求出每点处的法向量、主曲率、高斯曲率和平均曲率。

曲面的几何特性^[9]如下。曲面 s 上的任意一点处的单位法向量为

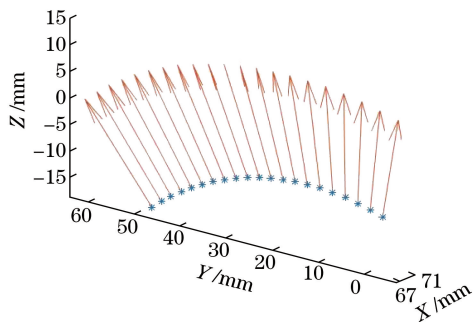


图 3 单道轨迹点矢量图

Fig. 3 Vector diagram of single track point

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{s}'_u \times \mathbf{s}'_v}{\sqrt{EG - F^2}}, \quad (1)$$

式中 s'_u 和 s'_v 为曲面 $s(u, v)$ 的一阶偏导数, $E = |s'_u \cdot s'_u|$, $F = |s'_u \cdot s'_v|$, $G = |s'_v \cdot s'_v|$ 。

可得平均曲率 H 为

$$H = \frac{k_{\max} + k_{\min}}{2} = \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)}, \quad (2)$$

式中 $L = |\mathbf{n} \times s''_{uu}|$, $M = |\mathbf{n} \times s''_{uv}|$, $N = |\mathbf{n} \times s''_{vv}|$ 。

高斯曲率 K , 即全曲率表示为

$$K = k_{\max} \cdot k_{\min} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}, \quad (3)$$

式中 K_{\min} 、 K_{\max} 为点在该片区的最大曲率与最小曲率, 其表达式为

$$k_{\max} = H + \sqrt{H^2 - K}, k_{\min} = H - \sqrt{H^2 - K}, \quad (4)$$

式中 H 为平均曲率。

无论曲面如何移动和旋转, 其平均曲率和高斯曲率均不会改变, 可依据 H 与 K 的符号划分点的类型特征^[10-11], 结果见表 1。

表 1 曲面上点的类型

Table 1 Types of points on curved surface

Condition	$K > 0$	$K = 0$	$K < 0$
$H > 0$	Concave ellipse point	Concave parabolic point	Hyperbolic point
$H = 0$	-	Flat spot	Hyperbolic point
$H < 0$	Protruding ellipse point	Convex parabolic point	Hyperbolic point

计算出曲面上每个轨迹点的类型后, 即可得到这个点附近的局部形状。将相同类型的点划分至一起, 组成面的类型, 如图 4 所示。各类曲面的简介如下。

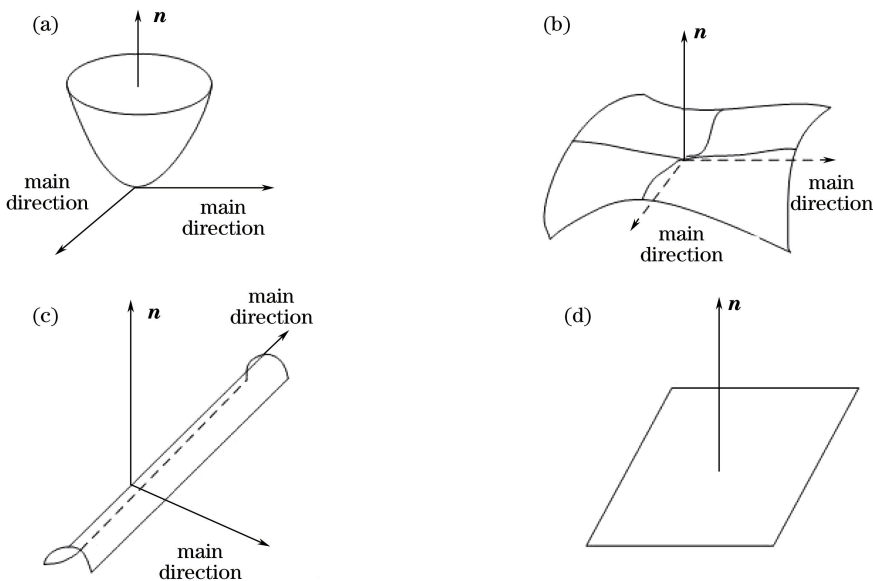


图 4 曲面类型。(a)椭圆面;(b)双曲面;(c)抛物面;(d)平面

Fig. 4 Types of curved surfaces. (a) Ellipsoid; (b) hyperboloid; (c) paraboloid; (d) plane

椭圆面: 由椭圆点构成的曲面为椭圆面, 每点处 $K > 0$, 两个主曲率同号。

双曲面: 又称马鞍面, 从表 1 可知, 当 $K < 0$ 时, 此点为双曲点, 代表最大主曲率与最小主曲率异号。

抛物面: 抛物点构成的面为抛物面, $K = 0$, 两个主曲率至少有一个为 0。

凸(凹)椭圆点集组成的面为凸(凹)椭圆面, 同理, 凸(凹)抛物面由凸(凹)抛物点集组成。激光加工时, 凸、凹区域机械臂的角度变化不同, 可将上述曲面划分成凹面、凸面、双曲面(马鞍面)三种特征域。凹面的曲率变化范围不大, 较为平缓, 机械臂在此区域移动时不需要转动太大的角度, 动作较为平

稳;凸面的曲率变化较大,此区域机械臂转动较频繁,速度不能保证,需要考虑加工精度;双曲面情况下,激光与待熔覆零件容易发生干涉。

曲面分片流程如图 5 所示。

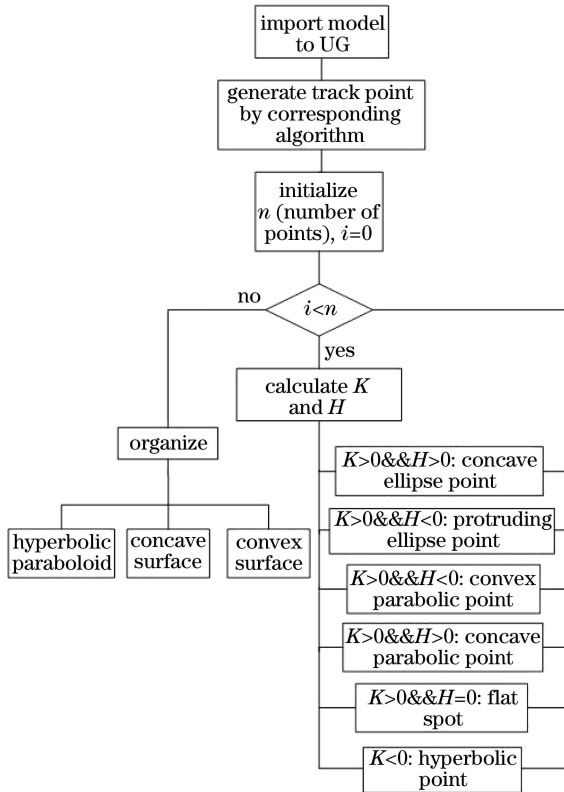


图 5 曲面分片流程图

Fig. 5 Flow chart of surface subdivision

3 机械臂与变位机耦合

在激光修复曲面零件过程中,存在以下问题:1) 为达到较高的熔覆质量,激光入射方向需与轨迹点的法矢量重合,这容易使激光光纤扭曲损坏;2) 当加工曲面零件的倾斜区域时,重力的存在会使熔池形状不规则,得到的熔覆层质量欠佳。为解决以上问题,可使待加工零件夹持于变位机卡盘上,每个轨迹点在修复过程中运动至理想位置,即熔池达到水平状态,同时激光束法向与点法向重合。

3.1 机械臂与变位机运动的约束

变位机与机械臂为协同运动,配合过程中存在姿态约束和相对运动约束。为保证熔覆质量,机械臂上的激光束在修复过程中姿态尽量保持不变,以达到运动的平稳性,并利用变位机将激光熔池转动至水平或近似水平状态^[12-13]。

机械臂与变位机的协同运动系统图如图 6 所示,其中 x, y, z 为坐标系。变位机基座坐标系-变位机工作台坐标系-工件坐标系-激光插补点坐标系运动链用于调整轨迹点位姿;另一条链为机器人基座坐标系-机器人工具坐标系,其用于控制机械臂的关节转角,两条运动链配合使光束与轨迹点的法向量重合。

3.2 机器人与变位机耦合模型

变位机坐标系可根据其结构确定,如图 7 所示,其中构件 0 为底座,构件 1 为箱型翻转机构,关节角

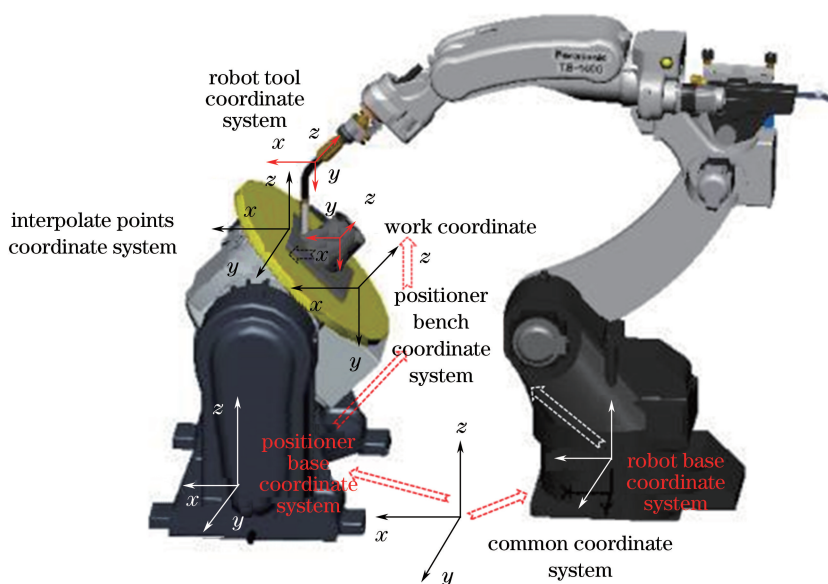


图 6 机器人与变位机的协调运动

Fig. 6 Coordinated motion of robot and positioner

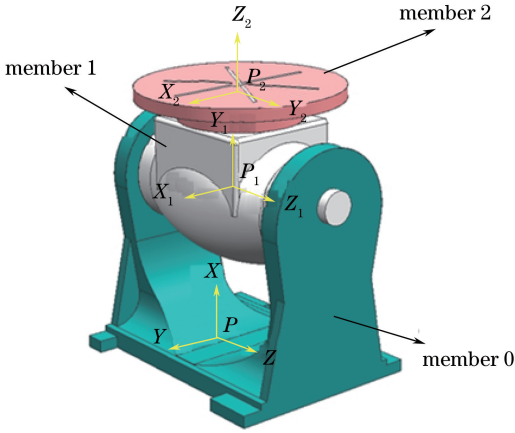


图7 变位机坐标系

Fig. 7 Coordinate system of positioner

为 θ_1 , 构件 2 为 360° 旋转自由度工作盘, 关节角为 θ_2 . Z 轴为垂直变位机的转盘方向, X 轴方向为移动零件时的正运动方向, Y 轴根据右手规则确定. 建立变位机的两个关节坐标系 $P_1X_1Y_1Z_1$ 与 $P_2X_2Y_2Z_2$.

根据坐标系的 Denavit-Hartenberg (DH) 参数, 可建立底座坐标系到工作转盘的坐标变换矩阵, 即

$${}^0_1\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$${}^1_2\mathbf{A}_2 =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 \\ \sin \theta_2 \cos \alpha_1 & \cos \theta_2 \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & -d_2 \sin \alpha_1 \\ \sin \theta_2 \sin \alpha_1 & \cos \theta_2 \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & d_2 \cos \alpha_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$${}^0_1\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 \\ \sin \theta_2 \cos \alpha_1 & \cos \theta_2 \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & -d_2 \sin \alpha_1 \\ \sin \theta_2 \sin \alpha_1 & \cos \theta_2 \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & d_2 \cos \alpha_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 ${}^0_1\mathbf{A}_1$ 表示底座坐标系到翻转机构的坐标变换矩阵, ${}^1_2\mathbf{A}_2$ 表示翻转机构到工作盘的坐标变换矩阵, θ_1 和 θ_2 为结构的关节角, d_1 和 d_2 为连杆的偏置, α_1 为连杆扭转的角度.

工件安装在转盘上时建立工作坐标系 P_wxyz , 此时工作台坐标系下工件的位姿为

$${}^2_w\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^2_wn_x & {}^2_wO_x & {}^2_wa_x & {}^2_wP_x \\ {}^2_wn_y & {}^2_wO_y & {}^2_wa_y & {}^2_wP_y \\ {}^2_wn_z & {}^2_wO_z & {}^2_wa_z & {}^2_wP_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 2_wn_i ($i=x, y, z$) 为工件坐标系的 x 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, 2_wO_i ($i=x, y, z$) 为工件坐标系的 y 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, 2_wa_i ($i=x, y, z$) 为工件坐标系的 z 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, 2_wP_i ($i=x, y, z$) 为工件坐标系原点在工作台坐标系中的坐标值.

工件在基底坐标系下的位姿为

$${}^0_w\mathbf{A} = {}^0_1\mathbf{A}_{12} {}^1_2\mathbf{A}_2 {}^2_w\mathbf{A}. \quad (9)$$

工件上轨迹插补点的坐标系为 P_Lxyz , 原点为轨迹点, 光束轴线为 z 轴, 此点处切向且沿扫描方向确定为 y 轴, 右手规则得出 x 轴, 则工件坐标系下轨迹点姿态为

$${}^w_L\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^wLn_x & {}^wLO_x & {}^wLa_x & {}^wLP_x \\ {}^wLn_y & {}^wLO_y & {}^wLa_y & {}^wLP_y \\ {}^wLn_z & {}^wLO_z & {}^wLa_z & {}^wLP_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 wLn_i ($i=x, y, z$) 为轨迹插补点坐标系的 x 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, wLO_i ($i=x, y, z$) 为轨迹插补点坐标系的 y 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, wLa_i ($i=x, y, z$) 为轨迹插补点坐标系的 z 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, wLP_i ($i=x, y, z$) 为轨迹插补点坐标系原点在工作台坐标系中的坐标值.

同时可知公共坐标系下变位机基座姿态为

$${}^0_0\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^0_0n_x & {}^0_0O_x & {}^0_0a_x & {}^0_0P_x \\ {}^0_0n_y & {}^0_0O_y & {}^0_0a_y & {}^0_0P_y \\ {}^0_0n_z & {}^0_0O_z & {}^0_0a_z & {}^0_0P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 0_0n_i ($i=x, y, z$) 为变位机基座坐标系的 x 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, 0_0O_i ($i=x, y, z$) 为变位机基座坐标系的 y 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, 0_0a_i ($i=x, y, z$) 为变位机基座坐标系的 z 轴在工作台坐标系中的三个坐标分量, 0_0P_i ($i=x, y, z$) 为变位机基座坐标系原点在工作台坐标系中的坐标值.

可得轨迹插补点在公共坐标系下的姿态描述为

$${}^0_L\mathbf{A} = {}^0_0\mathbf{A} {}^0_w\mathbf{A} {}^w_L\mathbf{A}. \quad (12)$$

接下来建立机器人运动学模型,即机器人基底坐标系与末端工具坐标系之间的联系。由机器人控制器可得出运动学逆解,故只需确定机器人末端工具相对于机器人基底坐标系的位姿即可。熔覆过程中机器人工具为激光束,要获取光束的位姿,则确定工具坐标系(TCP),如图8所示,原点即为光束照射的焦点,取光束轴线为 z 轴,可得工具坐标系相对于机器人底座坐标系的变换矩阵^[14]为

$${}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}n_x & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}O_x & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}a_x & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}P_x \\ {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}n_y & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}O_y & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}a_y & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}P_y \\ {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}n_z & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}O_z & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}a_z & {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 ${}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}n_i$ ($i=x, y, z$)为工具坐标系的 x 轴在机器人基座坐标系中的三个坐标分量, ${}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}O_i$ ($i=x, y, z$)为工具坐标系的 y 轴在机器人基座坐标系中的三个坐标分量, ${}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}a_i$ ($i=x, y, z$)为工具坐标系的 z 轴在机器人基座坐标系中的三个坐标分量, ${}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}P_i$ ($i=x, y, z$)为工具坐标系原点在机器人基座坐标系中的坐标值。

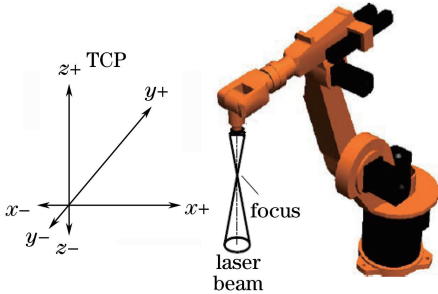


图8 机器人工具坐标系

Fig. 8 Coordinate system of robot tool

根据运动学理论建立机器人与公共坐标系的联系,即机器人底座坐标系相对于公共坐标系的变换矩阵为

$${}^{\text{O}}_{\text{ROB}}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}n_x & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}O_x & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}a_x & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}P_x \\ {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}n_y & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}O_y & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}a_y & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}P_y \\ {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}n_z & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}O_z & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}a_z & {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 ${}^{\text{O}}_{\text{ROB}}n_i$ ($i=x, y, z$)为工具坐标系的 x 轴在机器人基座坐标系中的三个坐标分量, ${}^{\text{O}}_{\text{ROB}}O_i$ ($i=x, y, z$)为工具坐标系的 y 轴在机器人基座坐标系中的三个坐标分量, ${}^{\text{O}}_{\text{ROB}}a_i$ ($i=x, y, z$)为工具坐标系的 z 轴在机器人基座坐标系中的三个坐标分量, ${}^{\text{O}}_{\text{ROB}}P_i$ ($i=x, y, z$)为工具坐标系原点在机器人基座坐标

系中的坐标值。

工具坐标系相对于公共坐标系的变换矩阵为

$${}^{\text{O}}_{\text{TCP}}\mathbf{A} = {}^{\text{O}}_{\text{ROB}}\mathbf{A} {}^{\text{ROB}}_{\text{TCP}}\mathbf{A}. \quad (15)$$

在激光修复零件时,激光光束对准轨迹插补点的法矢量,若要找出机器人与变位机的耦合关系,可通过变位机运动链末端的光束插补点坐标系与机器人末端的工具坐标系联合建立变位机与机器人的运动关系。由于激光熔覆工艺的要求,激光光束轴线方向与零件轨迹插补点的法向一致,但光束焦点与零件存在一定的距离,此即为离焦量 ΔL 。由此可知,在公共坐标系下,变位机与机器人的关系为

$${}^{\text{O}}_{\text{L}}\mathbf{A} = {}^{\text{O}}_{\text{TCP}}\mathbf{A} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \Delta L \cos \alpha \\ 0 & 0 & 0 & \Delta L \cos \beta \\ 0 & 0 & 0 & \Delta L \cos \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 α, β, γ 为关节转角。

可得机器人与变位机的耦合关系为

$${}^{\text{O}}_{\text{ROB}}\mathbf{A} {}^{\text{O}}_{\text{L}}\mathbf{A} = {}^{\text{O}}_{\text{A}_1}\mathbf{A} {}^{\text{O}}_{\text{A}_2}\mathbf{A} {}^{\text{O}}_{\text{W}}\mathbf{A} {}^{\text{O}}_{\text{L}}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \Delta L \cos \alpha \\ 0 & 0 & 0 & \Delta L \cos \beta \\ 0 & 0 & 0 & \Delta L \cos \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

划分区域意味着将轨迹离散成有限小段,每段上的轨迹点信息对应变位机位姿,通过运动链可反求出机械臂的关节角。利用上述关系分别求得机械臂和变位机关节在轨迹点熔池达到水平状态时各自的角度,完成零件的位置变换^[15-16]。

当激光沿轨迹点的法向量方向照射时,形成的光斑面积为圆形,如图9中 S_1 部分所示,当激光照射与点法矢量存在相对转角 θ 时,形成的光斑面积为椭圆形 S_2 。实验证明,在光斑由正常圆形变为椭圆形的过程中,能量随着面积的增大而有所减小,但在一定范围内,面积的改变对激光能量熔化基材与粉末过程的影响不大,故允许激光与轨迹点法向量

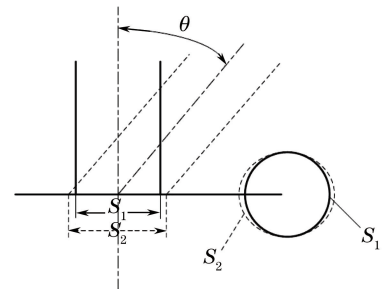


图9 光束姿态引起的光斑面积变化

Fig. 9 Change of spot area caused by beam pose

在一定范围内存在夹角。此种情况为机械臂的转动提供了便利,又不影响熔覆质量,在同片区域的点集内,只要在适当的角度内满足熔覆要求,机械臂可走直线。

4 基于曲面分片的激光熔覆轨迹规则

以 Visual Studio2010(简称 VS2010)为开发平台。扫描后由逆向软件生成待加工曲面模型,如图 10 所示。调用编好的分片程序,选择相应的加工面,结果如图 11 所示。



图 10 零件待修复面

Fig. 10 Part surface to be repaired

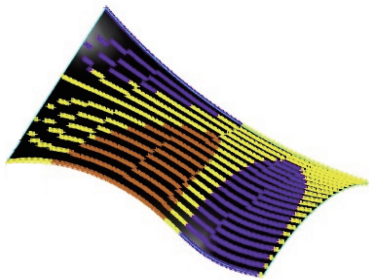


图 11 分片后的曲面

Fig. 11 Curved surface after division

为使熔覆后零件表面光滑,外观平整,质量达到最优,整个加工过程应尽量使各个轨迹点处的熔池处于水平状,此时激光与轨迹点达到最优熔覆。因此,有必要将轨迹点依次变换到理想位置,可通过变位机转换位姿,同时与机械臂进行耦合。在激光熔覆过程中,变位机实时地将待加工点调整至最佳位姿,在同一片区域内,机械臂以适当的平稳速度移动,各关节角度调整较小。

5 结 论

针对曲面零件,由切片理论及插补点搜索算法得到所有轨迹点,将相同特征类型的点划分在一起形成了三种特征面区域。仿真结果证明了其可行性,同时利用机械臂与变位机的协调配合,使当前每个加工点的熔池处于水平状,解决了熔覆时单纯用

机械臂造成工作量大的问题,提高了加工效率。

参 考 文 献

- [1] Li P F, Sun W L, Huang Y, *et al.* Research status of multi-track overlapping laser cladding technology [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(24): 7-10. 李朋飞, 孙文磊, 黄勇, 等. 激光多道搭接激光熔覆技术研究现状 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(24): 7-10.
- [2] Wang D S, Tian Z J, Sheng L D, *et al.* Research status and development of laser cladding technology [J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 538-544. 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆技术研究现状及发展 [J]. 应用激光, 2012, 32(6): 538-544.
- [3] Wang X L, Sun W L, Zhang J J, *et al.* Path planning of laser cladding and remanufacturing based on reverse engineering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051401. 王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 等. 基于逆向工程的激光熔覆再制造路径规划 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051401.
- [4] Huang Y, Sun W L, Chen Y. Trajectory planning of laser cladding remanufacturing for complex shaft shaped part [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 53-59. 黄勇, 孙文磊, 陈影. 激光熔覆再制造复杂轴类零件的轨迹规划 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 53-59.
- [5] Chen Y, Sun W L, Huang Y, *et al.* Robot path planning of laser cladding and remanufacturing of curved surface parts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061405. 陈影, 孙文磊, 黄勇, 等. 曲面零件的激光熔覆路径规划 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061405.
- [6] Chen Y, Sun W L, Huang Y, *et al.* Robot path planning of laser cladding and remanufacturing of curved surface parts [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0502001. 陈影, 孙文磊, 黄勇, 等. 激光熔覆曲面零件再制造的机器人路径规划 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0502001.
- [7] Huang H B, Sun W L, Huang Y, *et al.* Research of point cloud slicing algorithm for free-form surface laser cladding trajectory [J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 718-722. 黄海博, 孙文磊, 黄勇, 等. 自由曲面熔覆路径的点云切片算法研究 [J]. 激光技术, 2017, 41(5): 718-

- 722.
- [8] Yang Z L, Du J, Yan X G, *et al.* Improved interpolation algorithm of variable forward step with constant chord error of determining interpolation points[J]. *Tool Engineering*, 2016, 50(8): 42-46.
杨振玲, 杜娟, 闫献国, 等. 弓高误差变步长的插补点求取方法优化[J]. *工具技术*, 2016, 50(8): 42-46.
- [9] Shu H S, Yu H H, Zhang S Y. Research on surface feature recognition based on slicing technique[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2012(12): 148-151.
舒海生, 余豪华, 张书宇. 基于切片技术的曲面特征识别研究[J]. *制造技术与机床*, 2012(12): 148-151.
- [10] Dong J Q, Zhang P. Tool path planning for five-axis tool based on surface subdivision [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2013, 41(15): 50-53.
董佳琦, 张平. 基于曲面分片的五轴刀具轨迹规划[J]. *机床与液压*, 2013, 41(15): 50-53.
- [11] Lin J Q, Wang Y Q. Subdivision planning of complex free-form surface[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007 (2): 386-390.
林洁琼, 王义强. 复杂自由曲面的分片规划[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2007(2): 386-390.
- [12] Jiang J G. Applied to the welding robot displacement machine control research[D]. *Shenyang: Shenyang University*, 2015.
姜家高. 应用于焊接机器人的变位机控制研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2015.
- [13] Tang F R. Research on coordinated motion of arc welding robot and positioner [D]. *Liuzhou: Guangxi University of Science*, 2015.
陶凤荣. 弧焊机器人与变位机的协调运动研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2015.
- [14] Liu P, Song T, Yun C, *et al.* Study of kinematics analysis and trajectory planning for welding robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(4): 390-394.
刘鹏, 宋涛, 俞超, 等. 焊接机器人运动学分析及轨迹规划研究[J]. *机电工程*, 2013, 30(4): 390-394.
- [15] Tang Y H, Zhao Y S. Harmonic response analysis for the positioner used slewing bearings[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013 (7): 175-177, 181.
唐艳华, 赵永生. 变位机用转盘轴承的谐响应分析[J]. *机械设计与制造*, 2013(7): 175-177, 181.
- [16] Wang W, Bayanheshig, Pan M Z, *et al.* Beam alignment error and its control in scanning beam interference lithography system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0722003.
王玮, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 扫描干涉场曝光系统中光束对准误差及其控制[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0722003.