

文章编号: 0258-7025(2003)04-0364-05

五轴框架式机器人激光加工系统 轨迹算法研究

涂孟夫, 虞 钢

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 在集成化智能激光加工系统工作原理的基础上提出了五轴机器人的激光加工轨迹算法。将三维离散数据点集拟合为空间参数曲面, 在此参数曲面上规划五轴激光加工的等距轨迹。给出了冲压模具激光强化加工实例, 取得了理想的加工效果。

关键词 机器人控制; 激光加工; 五轴机器人; 轨迹; CIMS

中图分类号 TG 665 **文献标识码** A

A Method of Trace Generation for 5-Axis Robotic Laser Manufacturing System

TU Meng-fu, YU Gang

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract According to the characteristic of laser intelligent manufacturing system, a method of trace generation for the 5-axis laser robot is introduced. A parameterized spatial surface has been constructed from 3-dimensional scattered data, and upon it the 5-axis trace for laser processing can be laid out. Practical experiments demonstrated that satisfied results were acquired by using the method, which has been applied in laser intelligent manufacturing system.

Key words robot controlling; laser manufacturing; 5-axis robot; trace generation; CIMS

1 引 言

具有框架式机器人结构的集成化智能激光加工和柔性制造系统是在光机电一体化、框架式机器人和 CIMS 的概念下由中国科学院力学所提出并实现的^[1,2]。在机器人的腕部(图 1), 工具夹持末端装载激光加工装置, 内置式光学变换器将高斯激光转换成强度均匀分布的二维点阵(图 2)^[1,3]。基于该系统, 冲压模具表面强化过程首先由测量获取模具的面型数据, 再根据面型数据现场规划加工轨迹数据, 然后驱动加工系统, 并配合激光控制系统和加工工艺数据库, 最终完成对模具表面的激光强化处理。

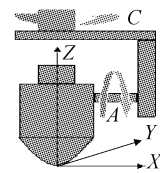


图 1 五轴机器人腕部姿态

Fig. 1 Structure of the processing joint

该系统加工时加工激光束的方向垂直于工件表面(法线方向), 使激光矩形点阵的焦平面与工件表面重合, 并输出激光脉冲(一个或多个), 然后快速移动到下一点。重复上一过程, 即可在工件表面形成由

收稿日期: 2002-02-05; 收到修改稿日期: 2002-04-01

基金项目: 2000~2003 年中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX1-11)和中国科学院大型仪器设备研制项目(中科院计字[1997]第 167 号, 中科院成鉴字[1999]第 017 号)资助项目。

作者简介: 涂孟夫(1976—), 男, 1999 年毕业于北京大学, 现为中国科学院力学所硕士研究生, 主要从事激光加工技术及 CAD/CAM 方面研究。E-mail: tumengfu@sina.com

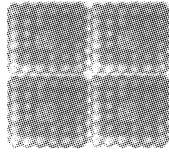


图2 激光表面处理的光斑形状

Fig. 2 Beam pattern of surface treatment

矩形处理块紧密拼接成的强化区域(图2)。强化区域的重叠或间隔都对加工效果产生影响,所以加工过程中对轨迹数据的要求非常严格。作为一种非接触式的智能加工系统,其加工平台有着与传统的接触式加工系统完全不同的加工轨迹要求。

2 算法基本思路及数学原理

2.1 基本思路

在智能激光加工系统中,待加工工件的面型数据来源于该系统的测量子系统,通过自适应测量技术得到无规则密集三维 (x, y, z) 离散数据点^[1],加工时机器人的轨迹数据格式空间三维坐标加 A, C 轴转角的五维数据 (x, y, z, A, C) 或空间三维坐标加外法向量的六维数据 (x, y, z, ax, ay, az) 。这种轨迹与常规的五维(或六维)加工轨迹有着本质的不同。每排轨迹数据在空间成等距排列,排与排之间的距离也是等距的,目前尚未发现在自由曲面上生成此类加工轨迹的有关报道。从离散数据生成这种轨迹数据的过程比普通数控加工轨迹要复杂得多,需要经过两个主要过程:1)空间三维离散点的曲面拟合;2)空间曲面上的五维(或六维)等距轨迹线的规划。目前,构造离散数据插值曲面的基本方法为构造NURBS曲面及三角曲面等^[4]。但NURBS曲面方法主要构造四边形曲面且不适合构造无规则的离散数据插值曲面,因而采用了构造三角曲面的方法。构造无规则离散数据的三角曲面是对离散数据进行三角剖分并对三角网格进行优化,在三角网格上构造连续的三角Bernstein-Bézier(B-B)曲面片。在进行五维(或六维)等距轨迹线规划时,可以对五维(或六维)数据使用参数样条曲线插值来生成符合加工要求的轨迹。

2.2 数学原理

定义1:对平面上非共线的三个点 P_0, P_1, P_2 ,当且仅当 $\text{Det}(P_0, P_1, P_2) \geq 0$ 时,称 P_1P_2 对于 P_0 可见;当且仅当 $\text{Det}(P_0, P_1, P_2) > 0$ 时,则称 P_1P_2 相对于 P_0 严格可见。

定义2:对平面上(或空间上)的离散数据点进行域分割后,将具有公共域边界的离散点对相连接形成的三角剖分(Delaunay三角剖分)。

2.2.1 三角Bernstein-Bézier(B-B)曲面^[5]

n 次三角B-B曲面表达式

$$P(u, v, w) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} V_{i,j,k} B_{i,j,k}^n(u, v, w) \quad (1)$$

$$B_{i,j,k}^n(u, v, w) = \frac{n!}{i!j!k!} u^i v^j w^k \quad (2)$$

$$0 \leq u, v, w \leq 1, i + j + k = n \quad (3)$$

式中 $V_{i,j,k}$ 为控制顶点(图3), $B_{i,j,k}^n(u, v, w)$ 为Bernstein多项式, u, v, w 为三角域中的重心坐标,对于三角形 abc 内一点 P (图4),有

$$P = ua + vb + wc, u + v + w = 1 \quad (4)$$

三角形的重心坐标与面积坐标是一致的,即有

$$\begin{aligned} u &= \frac{\text{area}(pbc)}{\text{area}(abc)}, & v &= \frac{\text{area}(pca)}{\text{area}(abc)}, \\ w &= \frac{\text{area}(pab)}{\text{area}(abc)} \end{aligned} \quad (5)$$

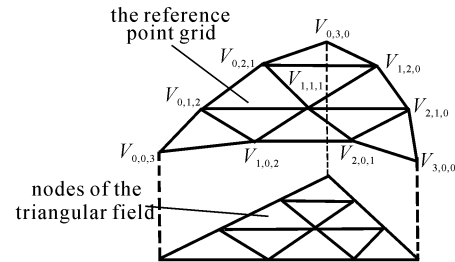


图3 三次三角B-B曲面控制顶点与三角域参数域节点

Fig. 3 Reference points for B-B surface

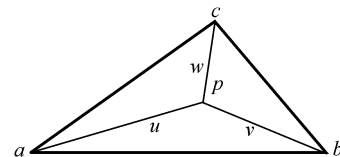
图4 三角形 abc 内点 P 的重心坐标

Fig. 4 Central coordinate system of triangles

2.2.2 六维累加弦长参数样条曲线

给定型值点 $P_i(x_i, y_i, z_i, ax_i, ay_i, az_i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n$),则与型值点 P_k ($k = 0, 1, \dots, n$)相对应的累加弦长为

$$\begin{cases} s_0 = 0 \\ s_k = \sum_{j=1}^k \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2 + (z_j - z_{j-1})^2}, \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

由此得到表1所示的数据。

表 1 六维型值点与弦长参数的对应关系

Table 1 The relationship between 6-dimension point and chord parameter

S	s_0	s_1	s_2	...	s_n
X	x_0	x_1	x_2	...	x_n
Y	y_0	y_1	y_2	...	y_n
Z	z_0	z_1	z_2	...	z_n
ax	ax_0	ax_1	ax_2	...	ax_n
ay	ay_0	ay_1	ay_2	...	ay_n
az	az_0	az_1	az_2	...	az_n

根据该数据表和给定的曲线端点条件,即可构造六个插值三次样条函数 $x = x(s), y = y(s), z = z(s), ax = ax(s), ay = ay(s), az = az(s)$,它们在区间 $[s_0, s_n]$ 上二阶连续可微,因此得到的参数样条曲线 $P(s) = [x(s), y(s), z(s), ax(s), ay(s), az(s)]$ 也是二阶连续的。对于五维型值点,可以用同样的构造五维参数样条曲线 $P(s) = [x(s), y(s), z(s), A(s), C(s)]$ 。

3 三角 B-B 曲面的构造

空间离散数据的三角 B-B 曲面的构造主要通过以下几个步骤完成:1) 将空间离散数据投影到二维平面;2) 在二维平面上对投影点做 Delaunay 三角剖分,再将结果映射回三维空间;3) 根据空间三角网格信息估算网格的边界条件;4) 在三角网格上根据边界条件及连续性要求构造三角 B-B 曲面片^[6]。

3.1 空间数据向平面的投影

根据计算机图形学,空间数据向任意平面的三维投影变换矩阵为^[7]

$$T_M = T_c * R_x * R_y \quad (7)$$

式中 T_M 表示平移矩阵, R_x 表示坐标系绕 X 轴旋转矩阵, R_y 表示坐标系绕 Y 轴旋转矩阵, * 为矩阵相乘算符。

3.2 平面散乱数据的三角剖分

平面散乱数据点的三角剖分^[7]的基本步骤如下:

1) 平面域内的离散数据点按字典方式进行预排序,形成顶点表。

2) 取顶点表的前 j 个数据点构成初始三角剖分网格。

3) 从顶点表中依次取出下一个点,找出多边形边界上能被此点见到的边,连接此点和所有可见边

的端点。

4) 对所得三角形网格进行优化,得到 Delaunay 三角剖分。

将平面上的三角网格上的点对应到三维空间,即得到三维空间的三角剖分网格。

3.3 三角网格的边界条件计算

在三角网格上构造三角 B-B 曲面片时,必须给出每个顶点的法矢及顶点处沿边界的切矢。通常每点的法矢用该顶点周围的若干个三角形法矢的面积加权平均来计算^[4]。

如图 5 所示,在 P_0 周围有 m 个点 $P_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 与之相邻接。由 $P_0 P_i P_{i+1}$ 所组成的三角形的法矢为 n_i

$$n_i = \frac{(P_i - P_0) \times (P_{i+1} - P_0)}{\|(P_i - P_0) \times (P_{i+1} - P_0)\|} \quad (8)$$

面积

$$S_i = \frac{\|(P_i - P_0) \times (P_{i+1} - P_0)\|}{2} \quad (9)$$

加权后, P_0 处法矢为

$$n_{P_0} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i n_i}{\sum_{i=1}^m S_i} \quad (10)$$

给定顶点 P_i, P_{i+1}, P_{i+2} , 对应点 P_i 的法矢量为 n_i (图 6)。则 P_i 点处沿边界 $P_i P_{i+1}$ 和 $P_i P_{i+2}$ 的切矢可按下式计算

$$\begin{cases} D_{i,i+1} = (P_{i+1} - P_i) - [(P_{i+1} - P_i) \cdot n_i] n_i \\ D_{i,i+2} = (P_{i+2} - P_i) - [(P_{i+2} - P_i) \cdot n_i] n_i \end{cases} \quad (11)$$

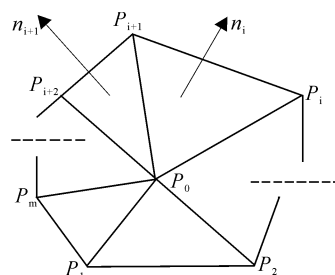


图 5 顶点法矢的估算

Fig. 5 Calculated vertex normal

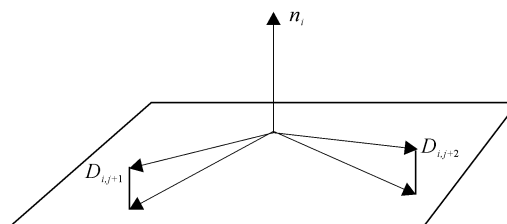


图 6 顶点切矢的估算

Fig. 6 Calculated vertex tangent

3.4 三角 B-B 曲面的构造

插值于三个顶点的三角 B-B 曲面可以有无穷多个。在取上述法矢和切矢的条件下,经过计算处于边界的 10 个控制顶点^[8](图 3)为

$$\begin{cases} V_{210} = V_{300} + f(V_{330}, n_{300}) \\ V_{120} = V_{030} - f(V_{330}, n_{300}) \\ V_{021} = V_{030} + f(V_{033}, n_{030}) \\ V_{012} = V_{003} - f(V_{033}, n_{003}) \\ V_{102} = V_{003} + f(V_{303}, n_{003}) \\ V_{201} = V_{300} - f(V_{303}, n_{300}) \\ V_{330} = V_{030} - V_{300} \\ V_{033} = V_{030} - V_{003} \\ V_{303} = V_{003} - V_{300} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $V_{003}, V_{030}, V_{300}$ 为三角形三个顶点, $n_{003}, n_{030}, n_{300}$ 对应顶点的法矢, 式中函数

$$f(V, n) = \frac{V - (V * n)n}{3|V - (V * n)n|} |V| \quad (12)$$

控制顶点

$$\begin{aligned} V_{111} = & (V_{201} + V_{102} + V_{021} + V_{012} + V_{120} + \\ & V_{210})/4 - (V_{003} + V_{030} + V_{300})/6 \end{aligned} \quad (13)$$

使用这种方法构造的三角 B-B 曲面片,在曲面片公共边界为位置连续,已经达到后续轨迹规划所要求的足够精度。如果需要进一步提高曲面的光滑程度,可以构造更高次幂的三角 B-B 曲面,使曲面总体达到 G^1 或 G^2 连续^[4]。

4 曲面上等距轨迹线的规划

在参数化的三角 B-B 曲面上直接通过控制参数的变化难以生成适合加工的等距轨迹。对此我们采用了一种间接的生成方法。由三角网格的所有三角形所组成的曲面称之为三角网格面,由于每个三角形的面积非常小,所以三角网格面逼近于三角 B-B 曲面。对于一条参照轨迹线 L ,先在三角网格面上生成一条与 L 距离一定的曲线,求出该曲线上的点在对应三角域的重心坐标参数,从而可以求出对应的三角 B-B 曲面片上的值及外法线方向。以这些点为型值点,构造累加弦长参数样条曲线,该曲线即可看作 L 的一条等距轨迹线。以这条轨迹线参照,可以用同样的方法生成下一条轨迹线。下面是以生成沿 y 轴走向步长为 d 的轨迹的具体算法:

1) 在 $x-y$ 平面上确定包含曲面投影的最小矩形区域 $(x_{\min}, y_{\min}), (x_{\max}, y_{\max})$;

2) 令 $P_1' = (x_{\min}, y_{\min})$,沿 y 轴方向依次取点 $P_k' = (x_{\min}, y_{\min} + (k-1) * d)$,直到达到点 (x_{\min}, y_{\max}) ,剔除 P_k' 中不在三角网格面投影区域内的点并对 P_k' 重新编号 $(k = 1, 2, \dots, n)$ 。求出 P_k' 在三角网格面上的对应点 $P_k (k = 1, 2, \dots, n) = (x_k, y_k, z_k)$,求出 P_k 相应三角域内的重心参数 (u, v, w) ,代入三角 B-B 曲面的计算式,从而得到三角曲面上的六维点集 $\{L_k\} = \{(x_k, y_k, z_k, ax_k, ay_k, az_k)\}$;

3) 如果 $n = 0$,结束。如果 $0 < n \leq 3$,输出 $\{M_i = L_i, (i = 1, 2, \dots, n)\}$ 作为一条轨迹。如果 $n \geq 4$,以 $\{L_k\}$ 为型值点构造弦长参数样条曲线。以 d 为步长,输出结果 $\{M_k, (k = 1, 2, \dots)\}$ 作为一条轨迹线;

4) 以 $\{M_k\}$ 为参照轨迹线,对任意一点 $M_k(x_k, y_k, z_k, ax_k, ay_k, az_k)$,在三角网格面上求出一点 $P_k'(x_k, y_k', z_k')$,使 P_k 到 M_k 的距离为 d ;

5) 在 $\{P_k'\}$ 两端以直线方式按步长为 d 延伸到矩形区域的边界,求出延伸线段部分在三角网格面上的点集 $\{P_j''\}, \{P_k'\}$ 和 $\{P_j''\}$ 合并,重新排序及编号得到三角网格面上的点集 $\{P_k = (x_k, y_k, z_k), (k = 1, 2, \dots, n)\}$,求出 P_k 相应三角域内的重心参数 (u, v, w) ,代入三角 B-B 曲面的计算式,从而得到三角曲面上六维点集 $\{L_k\} = \{(x_k, y_k, z_k, ax_k, ay_k, az_k)\}$;

6) 重复步骤 3, 4, 5, 直到 $n = 0$ 时退出;

7) 对所获得的轨迹线进行优化,将轨迹线连接成连续加工轨迹,减少加工过程中机器人的无效运动;

8) 将六维 (x, y, z, ax, ay, az) 的加工轨迹转化为机器人的五轴坐标 (x, y, z, A, C) ;

9) 对于沿任意方向的轨迹规划,可以通过坐标变换到 $x-y$ 坐标方向的轨迹规划,生成轨迹后在经过逆变换到原坐标系中。

5 实例和结论

根据本文所提出的方法,实现了汽车冲压模具激光强化加工轨迹的规划。该算法的时间、空间复杂度小,生成的轨迹数据精度高,轨迹点坐标与实际曲面上点的坐标误差不超过 0.1 mm,轨迹点的距离误差不超过 0.05 mm,并可以在加工现场由测量数据直接生成加工轨迹(如图 7 所示)。不但提高了加工效率和加工灵活性,在实际应用中,取得了良好的加工效果^[1](如图 8 所示)。

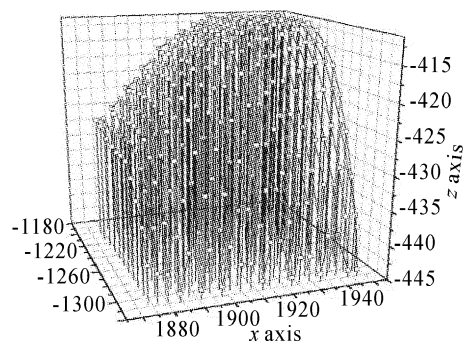


图7 汽车模具角部加工轨迹数据

Fig. 7 Programmed tracing data for a die corner

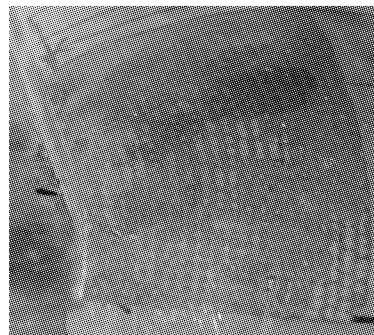


图8 汽车模具角部实际加工效果

Fig. 8 Practical effect of laser surface treatment

参 考 文 献

- 1 Gang Yu. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001 (in Chinese)
- 2 Gang Yu. A Laser Machining Device with Flexible Delivery and Multi-axis Motion [P]. Chinese Patent, No. ZL98101217.5
- 3 Gao Chunlin, Yu Gang. Design of binary phase gratings with specific intensity distribution of output [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(4):365~368 (in Chinese)
- 4 Xinxiong Zhu. The Formative Technology of Free Curve and Surface [M]. Beijing: Science Press, 2000. 198~233 (in Chinese)
- 5 R. E. Barnhill, G. Birkhoff, W. J. Gordon. Smooth interpolation in triangles [J]. *J. Approx. Theory*, 1975, **16**:726~735
- 6 A. K. Cline, R. L. Renka. Storage efficient method for construction of a thiesen triangulation [J]. *Rockey Mountain Journal of Mathematics*, 1984, **24**(2):119~139
- 7 Sun Jiaguang, Yang Changgui. Computer Graphics [M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 1998. 344~348 (in Chinese)
- 8 G. Farin. Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A Practical Guide [M]. Academic Press, 1993