

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.006

基于等距映射特征匹配的薄壁件 镜像加工刀路补偿算法

郭景浩, 张立强, 王 勇

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要:在大型薄壁件的镜像铣削加工时,装夹过程会造成工件的变形,如果使用初始的刀具路径会导致薄壁件厚度不均匀,过切或欠切。为了提高加工精度,在铣削加工之前添加激光扫描环节,并提出一种基于等距映射特征匹配的薄壁件镜像加工刀路补偿算法。应用运动学变换公式将激光扫描数据转换为点云,通过点云预处理简化过程,对理论曲面和实际曲面进行 Delaunay 三角网格曲面重构和计算定位点和匹配点任意两点间的测地线距离,再运用非线性最小二乘法迭代计算完成基于等距映射理论的曲面特征匹配,最后基于面积坐标公式完成刀路的补偿。经过加工测量实验,该算法能减少 67% 加工误差,验证了该算法的有效性。

关 键 词:薄壁件;镜像铣;刀路补偿;等距映射;非线性最小二乘法

中图分类号:V261.23

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)06-0025-08

Tool-Path Compensation Algorithm of Mirror Machining for Thin-Walled Piece Based on Equidistant Mapping Feature Matching

GUO Jinghao, ZHANG Liqiang, WANG Yong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In a mirror milling of large thin-wall parts, the clamping process can cause deformation of the work piece. Using the initial tool path will lead to uneven thickness of the thin wall parts, cutting too much or not. In order to improve the machining accuracy, laser scanning was added before milling, and the tool-path compensation algorithm of mirror milling machining of large thin-walled piece based on laser scanning was proposed. In this algorithm, the laser scanning data was transformed into point cloud through kinematics transformation formula and the point cloud was simplified after the point cloud preprocessing. Then, the Delaunay triangular mesh surface was reconstructed from the theoretical surface and the actual surface and the geodesic distance was calculated between the anchor point and the match point. Then, the matching of surface feature is completed based on isometric mapping theory through iterative computation of nonlinear least squares. Finally, the compensation of the tool path was completed based on the area coordinate formula. The machining measurement experiment shows that the algorithm can reduce the machining error by 67%, and the validity of the algorithm is verified.

Keywords: thin-walled parts; mirror milling; tool path compensation; isometric mapping; nonlinear least squares method

随着近年来航空航天、国防、装备等行业的飞速发展,大型曲面蒙皮和壁板被广泛的使用。法国的 Dufieux 公司^[1]开发了一种新型的镜像铣削系统,该系统主要用于蒙皮类零件的铣削加工,与传统化铣工艺

的高污染和低精度相比,这种镜像铣削系统既保证了工件的最终加工精度又提高了工件的整体生产效率。针对大飞机蒙皮件的加工,中航工业洪都集团引进了国内第一台镜像铣设备^[2],上海拓璞数控有限公司也

收稿日期:2018-05-29;修回日期:2018-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51775328)。

第一作者简介:郭景浩(1993),男,山东冠县人,硕士研究生,主要研究方向为复杂曲面精密加工。通信作者:张立强(1979),男,山东博兴人,副教授,主要研究方向为数控技术与制造系统。E-mail:zhanglq2009@126.com

研发了一系列镜像铣设备。上述公司所研发生产的薄壁件加工系统在加工工艺方面具有一定的突破,所加工工件的加工精度有所提高。但在飞机蒙皮等薄壁件的镜像铣削加工中,加工前的支撑、装夹等工艺,会造成大型薄壁件的变形。为解决此问题,在镜像铣机床上添加在线激光扫描测量功能,利用补偿算法对刀位轨迹进行补偿。基于激光扫描对刀路补偿的研究已有很多,Maarten Moesena 等^[3]将激光扫描技术应用在快速成型的刀路补偿上并提出了一种补偿算法,极大地提高了加工精度。课题组将激光扫描应用于大型薄壁件的镜像铣削加工中,并提出一种以 Delaunay 三角网格、测地线距离、等距映射、非线性最小二乘法 and 面积坐标等理论为基础的薄壁件镜像加工刀路补偿算法。

1 激光扫描数据转换为点云

线激光传感器安装在镜像铣削机床支撑侧的主轴上,由于其测得的数据不能直接使用,需要经过坐标信息提取和运动学变换公式转换,最终得到的点云才能使用。在线激光传感器得到的测量数据中,每行数据包括时间、坐标和激光信息。经过转换最终得到含有 x, y 和 z 的点云, x, y 和 z 为测量点在工件坐标系下的坐标。镜像铣削机床的支撑侧为 AB 双摆头五轴数控机床。假设初始状态下 $X=0, Y=0, Z=0, A=0, B=0$, 其中 X, Y, Z, A 和 B 是各轴的运动量。刀具坐标系在 A 轴对应坐标系下的坐标为 $(L_{atx}, L_{aty}, L_{atz})$, A 轴对应坐标系在 B 轴对应坐标系下的坐标为 $(L_{bax}, L_{bay}, L_{baz})$ 。若铣削侧在工件坐标系下的刀位点和法向为 (x, y, z, i, j, k) , 则支撑侧对应的工件坐标系得到的刀位点和法向为 $(-x, y, -z, i, -j, k)$ 。

激光点位置如图 1 所示,激光原点(第 400 个点)在刀具坐标系下的齐次坐标为:

$${}^T P_0 = (x_{L_0} \ y_{L_0} \ z_{L_0} \ 1)^T. \quad (1)$$

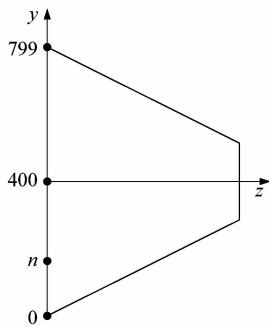


图 1 激光点位置

Figure 1 Laser point position

线激光上相邻两个测量点之间的距离为 Δd 。第 n 个测量点的高度为 H , 则此点相对于激光原点, 沿 X, Y 和 Z 方向的偏移量为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= 0; \\ \Delta y &= (n - 400) \times \Delta d; \\ \Delta z &= H. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在刀具坐标系中, 测量点的齐次坐标为:

$$\begin{aligned} {}^T P_0 &= (x_L \ y_L \ z_L \ 1)^T = \\ &= (x_{L_0} + \Delta x \ y_{L_0} + \Delta y \ z_{L_0} + \Delta z \ 1)^T = \\ &= (x_{L_0} \ y_{L_0} + (n - 400) \times \Delta d \ z_{L_0} + H \ 1)^T. \end{aligned} \quad (3)$$

在工件坐标系中, 测量点的齐次坐标为:

$${}^W P = (-x \ y \ -z \ 1)^T. \quad (4)$$

将刀位点分别从刀具坐标系映射到工件坐标系:

$${}^W P = {}^M T^{-1} {}^M T_B {}^B T_A {}^A T_1 {}^T P_0. \quad (5)$$

式中: ${}^M T$ 是工件坐标系到机床坐标系的变换矩阵; ${}^M T_B$ 是 B 轴坐标系到机床坐标系的变换矩阵; ${}^B T_A$ 是 A 轴坐标系到 B 轴坐标系的变换矩阵; ${}^A T_1$ 是刀具坐标系到 A 轴坐标系的变换矩阵。

将公式(3), 公式(4)和各变换矩阵代入公式(5)得:

$$\left. \begin{aligned} x &= -X - \cos B(x_L + L_{atx} + L_{bax}) - \sin B[L_{baz} + \\ &\quad \sin A(y_L + L_{aty}) + \cos A(z_L + L_{atz})] + L_{bax} + L_{atr}; \\ y &= Y + \cos A(y_L + L_{aty}) - L_{aty} - \sin A(z_L + L_{atz}); \\ z &= -Z + \sin B(x_L + L_{atx} + L_{bax}) - \cos B[L_{baz} + \\ &\quad \sin A(y_L + L_{aty}) + \cos A(z_L + L_{atz})] + L_{baz} + L_{atz}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将各项参数代入公式(6)便可得到在工件坐标系下各个测量点的坐标, 即将激光扫描数据转化成了点云, 初始点云如图 2 所示。

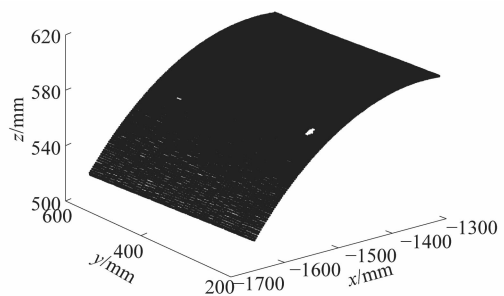


图 2 初始点云

Figure 2 Initial point cloud

2 点云预处理

随着激光扫描技术的不断进步, 采样点的精度不断提高, 采样点的数量也急剧增加。在进行曲面重构

和使用这些原始数据点进行其他后续处理时,将会消耗大量的时间和空间。因此,在保证足够的精度和为模型重建提供必要的信息前提下,对原始点云进行简化是十分必要的。国内外学者对点云的简化进行了大量的研究:Li等^{[4]463}提出一种基于二次误差度量的点云简化算法;Huang^{[5]348}提出一种保留边界点的点云简化算法;Song等^{[6]1273}则提出一种保留特征点的点云简化算法;Zhao等^{[7]5581}在原有的聚类算法基础上提出了一种保留边界点和特征点的分层聚类算法来对原始点云进行简化;Huang等^{[8]1}采用网格法对离散点云数据进行划分,提取出边界点和特征点,并将点云进行简化。课题组在原有的基于八叉树的点云简化算法基础上,在保留特征点以及边界点的前提下利用八叉树对点云进行划分和简化,将简化后的点云进行曲面重构对真实曲面的还原度更高。

2.1 基于八叉树理论的点云简化

由于点云数据通常只包含点和坐标信息而不能直接用于简化,因此,有必要建立点的拓扑结构和通过相关联点之间的关系处理点云。课题组采用 Octree 的方式分割空间建立 K 近邻,从而提高算法的效率。具体步骤如下:

1) 首先,遍历点云数据,在点云中找到 X, Y, Z 的最大值和最小值,计算八叉树第一个立方体的边长 L 和中心点 O ,公式如下:

$$\left. \begin{aligned} L &= (X_{\max} - X_{\min}, Y_{\max} - Y_{\min}, Z_{\max} - Z_{\min})_{\max}; \\ O(x, y, z) &= (X_{\min} + \frac{L}{2}, Y_{\min} + \frac{L}{2}, Z_{\min} + \frac{L}{2}) \end{aligned} \right\} (7)$$

式中: $X_{\max}, Y_{\max}$ 和 $Z_{\max}$ 分别是点云在 X, Y 和 Z 方向上的最大值; $X_{\min}, Y_{\min}$ 和 $Z_{\min}$ 分别是点云在 X, Y 和 Z 方向上的最小值; $\max$ 是返回各元素最大值的函数。

给定一个阈值 $d_{\min}$,也就是八叉树最小立方体的边长,计算八叉树的最大递归深度

$$n = \text{ceil}(\log_{10}(L/d_{\min})/\log_{10} 2)。 \quad (8)$$

式中: L 是最大立方体的边长; ceil 是返回大于或者等于指定表达式的最小整数的函数。

2) 进行八叉树的建立:①将最初的立方体进行 8 等分,将点云数据相应的存入 8 个小立方体(子节点)中,若发现子立方体所分配到的单位元元素数量不为零且跟父立方体是一样的,则该子立方体停止细分;②判断有没有到达最大递归深度。循环执行以上步骤直至达到最大递归深度,最终得到的八叉树中每个叶节点中都包含或多或少的点,从而建立了 K 邻域。③提取八叉树中每个叶节点的特征点。如图 3 所示,

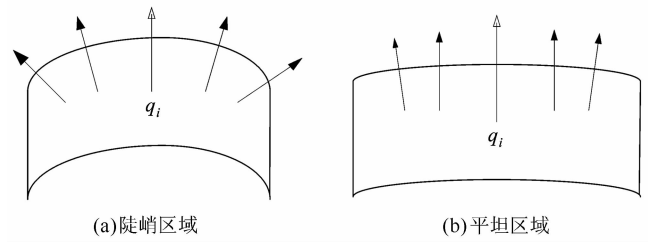


图 3 曲面法向量分布

Figure 3 Normal vector distribution of surface

如果在局部区域的法向量变化平缓,则该区域就相对较平坦;相反,如果法向量的变化很大,则意味着该区域就相对陡峭,该区域所包含的信息就更丰富。所以我们将法向量变化大的点当作特征点,将一个点 q_i 的法向量与它的 K 近邻点点集的法向量的算数平均值定义为 q_i 的特征度:

$$f_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \theta_{ij}。 \quad (9)$$

式中: i, j 是点的序号, $i, j = 1, 2, \dots, k$; θ_{ij} 即为点 q_i 的法向量与它的近邻点 q_j 的法向量之间的夹角。

可以知道,一个点的特征度越大,这个局部区域的变化就越大,提取每个叶节点中的 f_i 最大的点 q_i 为特征点,最终组成特征点点集 Q_1 。最后保留特征点之外距离八叉树叶节点中心最近的点,组成点集 Q_2 。

2.2 边界点的提取

在基于八叉树的简化过程中,很容易丢失点云的外边界。在薄壁件的铣削加工过程中曲面的边界尤为明显,外部边界直接描述了点云的形状,边界的丢失将导致在简化之后重构为不完全的模型。为了避免出现这一问题,在进行基于八叉树理论的点云简化之前,通过下述算法快速提取点云的边界点。由于铣削加工时,切深方向为 Z 轴方向,所以在点云中的 $x-y$ 方向包含更详细的边界信息。因此,在点云边界的提取中,选择轴的 $x-y$ 方向来划分和计算,得到 $x-y$ 边界。具体算法如下:

1) 将点云中所有的点都按照 X 轴大小进行排序,有序点云按顺序分组,每个组的数量为阈值 ε_1 。根据加工点云的密度选择 ε_1 ,点云密度越大, ε_1 越大,得到每个组 Y 坐标最大值和最小值的点。

2) 将点云中所有的点都按照 Y 轴大小进行排序,有序点云按顺序分组,每个组的数量为阈值 ε_2 。根据加工点云的密度选择 ε_2 ,点云密度越大, ε_2 的值越大,得到了每个组 X 坐标最大值和最小值的点。

边界点提取完成后,将边界点存储在动态数组中,

组成点集 Q_0 。然后进行基于八叉树理论的点云简化得到点集 Q_1 和 Q_2 。最终得到简化后的点云 $Q = Q_0 \cup Q_1 \cup Q_2$, 如图 4 所示。

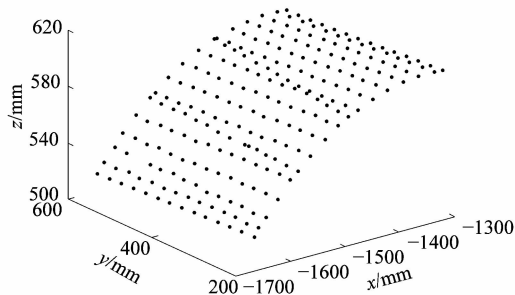


图 4 稀疏点云

Figure 4 Sparse point cloud

3 曲面特征匹配

在点云简化过程中,简化后的点云虽然可以对实际曲面的轮廓进行重构,进而由实际曲面重新生成刀具路径,但根据这样的刀具路径加工的零件会随着曲面的变形而变形。因此,我们需要将理论曲面映射到实际曲面,最终获得补偿的刀具路径,提高零件的加工精度。进行曲面特征匹配需要准备一些数据作为输入,包括理论曲面数据、实际曲面数据、理论定位点、实际定位点、理论匹配点和实际匹配点。经过曲面特征匹配过程,就能够得到最终的实际匹配点。

3.1 Delaunay 三角网格划分

平面上的 Delaunay 三角化有很多种算法,典型的有 Lawson 算法^[9]、分治算法^[10]和三角网生长算法^[11]等。二维三角剖分技术已经非常成熟,而且网上现成的实现代码也很多;文中涉及的是三维曲面的三角剖分,如图 5 所示,采用平面投影法,具体算法流程如下:

- 1) 将三维点投影到 z 为恒定值 500 的 $x-y$ 平面;
- 2) 在 $x-y$ 平面内应用分治算法进行三角剖分;
- 3) 对三角网格进行局部优化过程处理;
- 4) 经平面各点的连接关系映射到曲面上,最终得到三维的 Delaunay 三角网格曲面划分。

3.2 三角网格面上的测地线距离计算

随着测地线的计算在图像处理、计算机视觉和计算机图形学等领域的广泛应用,人们对测地线的计算进行了大量的研究。其中,对三角网格曲面上计算测地线距离的研究主要有近似测地线算法和精确测地线算法。Fast Marching 算法^[12]是经典的近似测地线算法,主要通过从一源点出发单调的进行面的传播,通过在传播过程中存储各个点的测地距离近似的计算测地

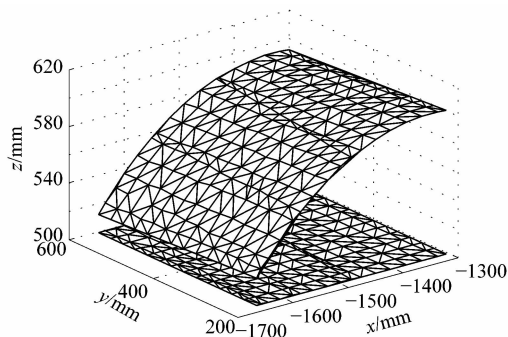


图 5 三维 Delaunay 三角网格划分原理

Figure 5 Schematic diagram of three-dimensional Delaunay triangular mesh division

线。MMP 算法^[13]是典型的精确测地线算法,是基于点光源光线直线传播的原理求解三角网格表面上的测地线距离。为了减少计算量和节省存储空间,课题组采用的是近似测地线的算法,首先将计算测地线的 2 个点 P_1 和 P_2 插入到三角网格上作为三角形网格的顶点,利用 Fast Marching 算法计算近似测地线 L_0 。具体步骤如下:

1) 将点 P_1 和 P_2 插入到三角网格曲面中作为网格曲面中三角形的顶点。将一个点插入到网格曲面会出现 3 种情形,需要针对每种情形做相应的处理:如图 6(a)所示,插入点正好在三角形的顶点,则三角形网格曲面不做任何变化;如图 6(b)所示,插入点在三角形的内部,则将三角形的 3 个顶点与插入点连接,将三角形一分为三;如图 6(c)所示,插入点在三角形的边上,则将这条边相对的顶点与插入点连接。

2) 利用 Fast Marching 算法^[12]计算近似测地线 L_0 。

3.3 曲面特征匹配

曲面特征匹配算法主要是基于 LM 阻尼最小二乘法进行迭代计算,满足理论曲面和实际曲面的测地线距离近似相等的要求,即满足等距映射。具体流程如下:

1) 利用三维 Delaunay 三角网格划分的方法,将理论曲面数据和实际曲面数据进行三角网格曲面重构。定义常数 u 的初始值为 0.001。

2) 用计算测地线距离的方法计算理论定位点与理论匹配点任意两点之间的测地线距离,生成测地线距离矩阵 D_1 ;计算实际定位点与实际匹配点任意两点之间的测地线距离,生成测地线距离矩阵 D_2 。将矩阵中重复的距离和点到自身的距离去除之后保存到向量中,相应的得到理论测地线距离向量 V_1 和实际测地线距离向量 V_2 。

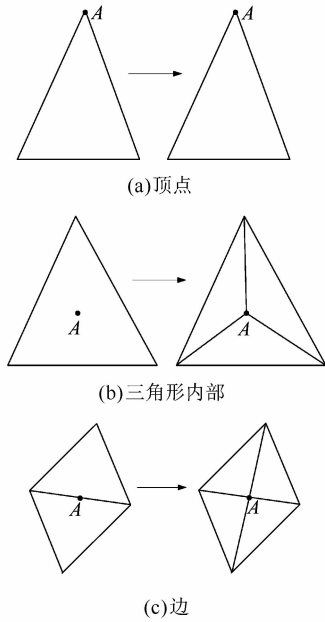


图6 插入点在三角形的位置

Figure 6 Position of insertion point in triangle

$$D_1 = \begin{bmatrix} d_{r_1 p_1} & d_{r_1 p_2} & \cdots & d_{r_1 p_n} \\ d_{r_2 p_1} & d_{r_2 p_2} & \cdots & d_{r_2 p_n} \\ d_{p_1 p_1} & d_{p_1 p_2} & \cdots & d_{p_1 p_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{p_n p_1} & d_{p_n p_2} & \cdots & d_{p_n p_n} \end{bmatrix}_{(n+2) \times n} ;$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} d_{r'_1 p'_1} & d_{r'_1 p'_2} & \cdots & d_{r'_1 p'_n} \\ d_{r'_2 p'_1} & d_{r'_2 p'_2} & \cdots & d_{r'_2 p'_n} \\ d_{p'_1 p'_1} & d_{p'_1 p'_2} & \cdots & d_{p'_1 p'_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{p'_n p'_1} & d_{p'_n p'_2} & \cdots & d_{p'_n p'_n} \end{bmatrix}_{(n+2) \times n} \circ$$

式中: r_1, r_2 代表理论定位点; r'_1, r'_2 代表实际定位点; $p_1, p_2, \dots, p_n$ 代表理论匹配点; $p'_1, p'_2, \dots, p'_n$ 代表实际匹配点; d_{ij} ($i, j = r_1, r_2, p_1, \dots, p_n$ 或 $r'_1, r'_2, p'_1, \dots, p'_n$) 为指定两点之间的测地线距离。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= (d_{r_1 p_1}, \dots, d_{p_{n-1} p_n})_{2n + \frac{n(n-1)}{2}}; \\ V_2 &= (d_{r'_1 p'_1}, \dots, d_{p'_{n-1} p'_n})_{2n + \frac{n(n-1)}{2}} \circ \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3) 计算测地线距离的 Jacobi 矩阵。假设从一个点 i 到其他所有点的测地线距离符合二阶麦克劳林展式, 假设麦克劳林展式为:

$$d_i(x, y) = a + bx + cy + ex^2 + fxy + gy^2. \quad (12)$$

式中: a, b, c, e, f 和 g 分别为麦克劳林展式的各项系数。

将实际匹配点的 x, y 坐标与步骤 2) 得到的测地

线距离代入公式, 根据最小二乘法计算分别得到 a, b, c, e, f 和 g , 从而得到测地线距离的二阶多项式。然后计算二阶多项式在各实际匹配点处关于 x 和 y 的微分, 最终得到 Jacobi 矩阵

$$J = \begin{bmatrix} \frac{d_{r_1}(x, y)}{\partial x} \Big|_{p_1} & \frac{d_{r_1}(x, y)}{\partial y} \Big|_{p_1} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{d_{p_n}(x, y)}{\partial y} \Big|_{p_n - (2n + \frac{n(n+1)}{2}) \times 2n} \end{bmatrix} \circ \quad (13)$$

4) 计算目标函数值 T 和测地线距离的最大误差 E :

$$T = \sqrt{(d_{r'_1 p'_1} - d_{r_1 p_1})^2 + \cdots + (d_{p'_{n-1} p'_n} - d_{p_{n-1} p_n})^2}; \quad (14)$$

$$E = f_{\max}(d_{r'_1 p'_1} - d_{r_1 p_1}, \dots, d_{p'_{n-1} p'_n} - d_{p_{n-1} p_n}). \quad (15)$$

式中: $f_{\max}$ 是返回各个元素最大值的函数。

5) 判断当前迭代次数是否达到设定的迭代数, 目标函数值 T 是否在要求的范围内, 最大误差是否小于设定的公差。如果上述条件都满足的话, 本次得到的实际匹配点就是最终的实际匹配点。如果上述条件只要有一项不满足, 判断目标函数值 T 是否小于设定值, 如果小于设定值则 u 缩小 5 倍, 否则增大 5 倍, 然后更新实际匹配点的位置, 重复执行步骤 2) ~ 步骤 5), 直到满足所有条件得到最终的实际匹配点。

$$\left. \begin{aligned} V &= -(J^T T + u)^{-1} J^T (V_2 - V_1); \\ p'_{i+1} \cdot x &= p'_{i+1} \cdot x + V(2i), i=0, 1, \dots, n-1; \\ p'_{i+1} \cdot y &= p'_{i+1} \cdot y + V(2i+1), i=0, 1, \dots, n-1. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: V 是更新实际匹配点的方向向量; $p'_{i+1} \cdot x$ 表示实际匹配点在 x 方向的分量; $p'_{i+1} \cdot y$ 表示实际匹配点在 y 方向的分量。

4 刀路补偿

经过曲面特征匹配得到最终的实际匹配点, 接下来就需要基于面积坐标公式对刀位点进行补偿了。具体步骤如下:

1) 利用曲面特征匹配中的 Delaunay 三角网格划分的方法, 对理论匹配点和实际匹配点分别进行 Delaunay 三角网格划分。

2) 将理论匹配点生成的三角网格曲面和补偿前的刀位点投影到 $x-y$ 平面内, 并且计算每个刀位点落

在相应三角形内的面积坐标:

$$P(L_i, L_j, L_m) = \left(\frac{S_i}{S}, \frac{S_j}{S}, \frac{S_m}{S} \right). \quad (17)$$

式中: S 是三角形的面积; S_i, S_j 和 S_m 分别是三角形的 3 个角点所对应的小三角形的面积, 面积坐标如图 7 所示。

其中, $L_i + L_j + L_m = 1$ 。

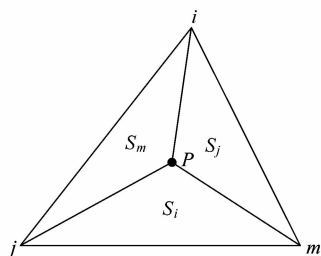


图 7 面积坐标

Figure 7 Area coordinates

3) 将求得的面积坐标分别对应到实际匹配点生成的三角网格曲面的三角形中, 得到空间点坐标。

4) 将上面得到的空间点投影到实际曲面点云生成的三角网格中, 并计算投影点坐标, 即为补偿后的刀位点坐标。并将此三角形的法向量作为刀轴方向。从而得到最终的刀位点坐标 (x, y, z, i, j, k) 。

经过激光数据转换为点云、点云预处理、曲面特征匹配和基于三角形面积坐标的刀路补偿等一系列步骤, 最终完成刀具路径的补偿。具体的算法流程如图 8 所示。

5 实验验证

为了验证刀路补偿算法在实际加工时的有效性, 我们在镜像铣设备上对一个局部的小平面进行加工。采用不经补偿的刀具路径和经过补偿后的刀具路径分别加工一块矩形区域, 经过与理论曲面的对比并计算各自误差的大小, 从而验证补偿算法的有效性。

在 Microsoft Visual Studio 2015 开发环境下, 用 C++ 基于 ACIS 开发平台开发补偿软件实现大型薄壁件镜像铣加工刀路补偿算法。如图 9(a) 所示, 对代加工曲面利用支撑侧的激光器进行曲面扫描生成测量数据。如图 9(b) 所示配置各项参数, 然后点击确定按钮即生成补偿后的刀具路径。将生成的补偿后的刀具路径经过后置处理重新生成 NC 代码, 然后进行平面的加工, 如图 9(c) 所示。再将工件沿着 Y 方向平移, 用补偿前的刀具路径经过后置处理生成 NC 代码, 对工件进行铣削加工。

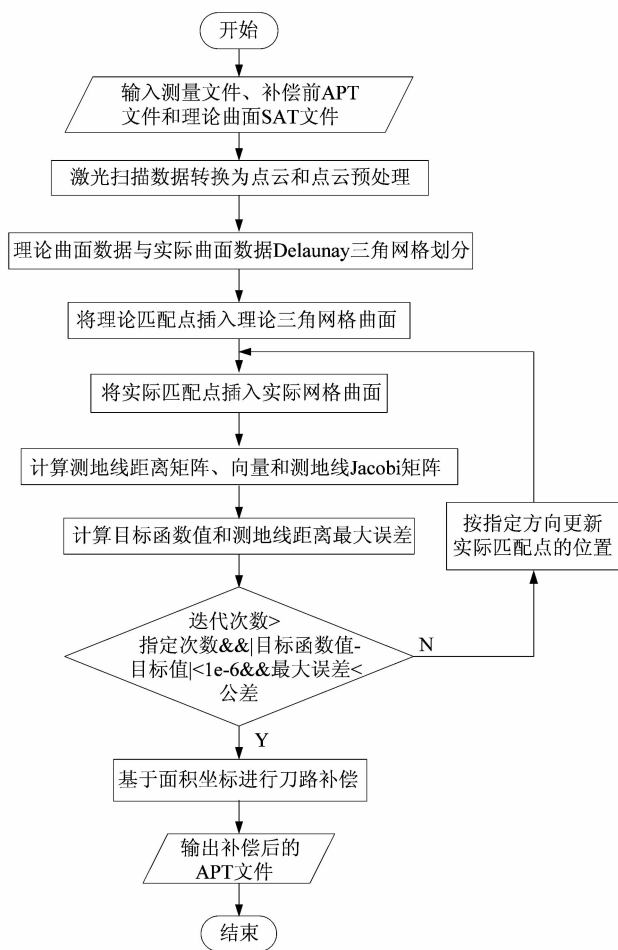


图 8 刀路补偿算法流程

Figure 8 Flow of tool path compensation algorithm



(a) 激光扫描



(b) 参数设置



(c) 铣削加工

图9 实验验证

Figure 9 Verification of experimental

经过上述的实验过程,形成了2个已加工矩形平面,分别为未经补偿的加工平面和经过补偿后的加工平面。用激光扫描两个已经加工好的面分别得到未补

表1 未补偿加工和补偿加工的误差数据

Table 1 Error datas of uncompensated processing and compensated processing

X	Y	Z	Z_1	E_1	Z_2	E_2
-860.180 0	375.087 0	12.200 0	12.495 4	0.295 4	12.297 6	0.097 6
-870.180 0	375.087 0	12.200 0	12.310 6	0.110 6	12.238 6	0.038 6
-880.180 0	375.087 0	12.200 0	12.201 9	0.001 9	12.200 8	0.000 8
-890.180 0	375.087 0	12.200 0	12.036 8	-0.163 2	12.145 6	-0.054 4
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
-860.180 0	335.087 0	12.200 0	12.346 5	0.146 5	12.253 6	0.053 6
-870.180 0	335.087 0	12.200 0	12.320 0	0.120 0	12.218 0	0.018 0
-880.180 0	335.087 0	12.200 0	12.067 3	-0.132 7	12.163 0	-0.037 0
-890.180 0	335.087 0	12.200 0	11.946 8	-0.253 2	12.119 2	-0.080 8

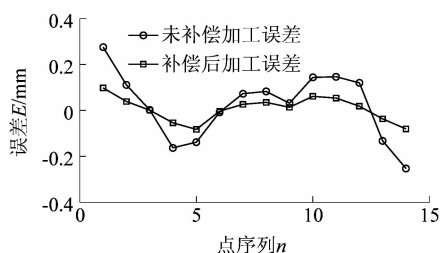


图10 加工误差

Figure 10 Error of machining

6 结语

课题组提出一种基于在线激光扫描的大型薄壁件镜像铣削加工的刀具路径的补偿算法,针对理论模型生成的刀具路径,经过补偿算法补偿后提高了加工精度。该算法应用运动学变换公式将激光扫描数据转换为点云,通过点云预处理过程得到简化后的点云,然后对理论曲面和实际曲面进行 Delaunay 三角网格曲面重构,计算定位点和匹配点任意两点之间的测地线距离,并运用非线性最小二乘法的迭代计算完成基于等

距映射的表面测量数据和补偿加工的表面测量数据,经过坐标转换得到工件坐标系下的点云坐标。在未补偿加工的点云中随机选择一些点,将点 Z 方向的值记为 Z_1 ,相应的在补偿加工的点云中选择 x 和 y 相同的点,将选取点的 z 方向对应的值记为 Z_2 。由于我们实验所加工的面是平面,所以理论曲面上任意点的 z 值都是相同的,记为 Z_0 。然后将加工曲面上的 Z 值与理论平面上的 Z 值作差作为误差,分别记为 E_1 和 E_2 ,来评定加工的精度,从而判断补偿算法是否有效。表1所示为未补偿加工和补偿加工的误差数据。图10所示为加工误差。从图10中可以得出经过补偿后的加工误差比减少了67%,从而验证了课题组所提出的补偿算法的有效性。

距映射理论的曲面特征匹配,最后基于面积坐标公式完成刀路的补偿。对矩形平面的加工实验表明,该补偿算法能够减小67%的加工误差,并且补偿后的加工误差能够控制在0.2 mm以下,满足了大型工件的加工要求。课题组在计算测地线环节中,为了提高补偿效率采用了近似算法;并且在实验环节只采用了最简单的矩形平面进行加工,并不能够验证该算法的广泛适用性。在下一步研究工作中,应在不牺牲补偿效率的前提下进一步提高算法的精确性,并且应该采用复杂的曲面进行补偿加工来验证算法的有效性。

参考文献:

- [1] 鲁达. 新一代飞机蒙皮绿色加工技术[J]. 航空制造技术, 2010, 53(16): 102-103.
- [2] 徐明, 向兵飞, 李响, 等. 蒙皮镜像铣切系统及先进制造工艺的应用[J]. 制造技术与机床, 2014(11): 40-43.
- [3] MOESEN M, CRAEGHS T, KRUTH B J P, et al. Robust beam compensation for laser-based additive manufacturing[J]. Computer-aided design, 2011, 43(8): 876-888.
- [4] LI Yibo, ZHU Qiong. A new mesh simplification algorithm based on

- quadric error metrics [C]//2008 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. Phuket, Thailand; IEEE, 2008; 463-466.
- [5] HUANG Wenming, XIAO Zhaoxia, WEN Peizhi, et al. Point cloud simplification with boundary points reservation [J]. Journal of computer application, 2010, 30(2): 348-350.
- [6] SONG Dahu, LI Zhongke, WANG Zhong, et al. Feature preserving algorithm of point cloud iterative simplification [J]. Application research of computers, 2014, 31(4): 1273-1275.
- [7] ZHAO Pengcheng, WANG Yue, HU Qingwu. A feature preserving algorithm for point cloud simplification based on hierarchical clustering [C]//36th IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China; IEEE, 2016; 5581-5584.
- [8] HUANG Yuan, DA Feipeng, TANG Lin, et al. Research on fast simplification algorithm of point cloud data [C]//5th International Conference on Optical and Photonics Engineering. Singapore; Spie-int Soc Optical Engineering, 2017; 25-33.
- [9] LEWIS B A, ROBINSON J S. Triangulation of planar regions with applications [J]. The computer journal, 1978, 21(4): 324-332.
- [10] LEE D T, SCHACHTER B J. Two algorithms for constructing a delaunay triangulation [J]. International journal of computer & information sciences, 1980, 9(3): 219-242.
- [11] MAUS A. Delaunay triangulation and the convex hull of n points in expected linear time [J]. Bit numerical mathematics, 1984, 24(2): 151-163.
- [12] KIMMEL R, SETHINA J. Computing geodesic paths on manifolds [J]. Proceedings of national academy of sciences USA, 1998, 95: 8431-8435.
- [13] SURAZHISKY V, SURAZHISKY T, KIRSANOV D, et al. Fast exact and approximate geodesics on meshes [J]. ACM transactions on graphics, 2005, 24(3): 553-560.
- [14] POLTHIER K, SCHMIES M. Straightest geodesics on polyhedral surfaces [C]//ACM SIGGRAPH 2006 Courses. New York, USA; ACM, 2006; 30-38.

(上接第24页)

- [3] WU Yingfei, ZHOU Zhaoying. Design calculations for flexure hinges [J]. Review of scientific instruments, 2002, 73(8): 3101-3106.
- [4] 赵宏伟, 吴博达, 曹殿波, 等. 直角柔性铰链的力学特性 [J]. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(2): 144-146.
- [5] 陈应舒, 朱淳逸. 椭圆弧型柔性球铰的柔度矩阵计算与分析 [J]. 机械设计与研究, 2015, 31(5): 51-54.
- [6] YANG Miao, DU Zhijiang, DONG Wei. Modeling and analysis of planar symmetric superelastic flexure hinges [J]. Precision engineering, 2016, 46: 177-183.
- [7] 杜云松, 李铁民, 姜晓, 等. 平面柔性铰链机构的柔度计算方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(6): 633-639.
- [8] LIU Min, ZHANG Xianmin, FATIKOW S. Design and analysis of a multi-notched flexure hinge for compliant mechanisms [J]. Precision engineering, 2017, 48: 292-304.

欢迎订阅 2019 年《中国特种设备安全》杂志

《中国特种设备安全》(原《中国锅炉压力容器安全》)是国家市场监督管理总局主管,中国特种设备检测研究院、中国特种设备检验协会和中国锅炉与锅炉水处理协会主办的技术类学术期刊。创刊于 1985 年 5 月,是我国特种设备安全领域经文化部评选的全国优秀科技期刊,本刊论文目前已经被中国学术期刊网络出版总库、中国知识资源总库、中国核心期刊(遴选)数据库和万方数据——数字化期刊群等数据库确认收录。

《中国特种设备安全》创刊 30 多年来,坚持办刊宗旨,共计编辑出版期刊 34 卷 286 期(其中:正刊 259 期、增刊及专刊 12 期、英文版 15 期),共刊载 6 100 余篇,约 7 600 万字,多层次、多方位、多侧面地反映了特种设备安全领域科学技术的进步,忠实、全面、客观地记录了我国特种设备安全工程进展的历程。此外,本刊于 1992 年在北京市科技期刊评比中获得编辑质量奖、办刊条件奖、期刊效益奖等奖项,于 1997 年获第二届全国优秀科技期刊三等奖。

创刊 30 多年来,我们始终关注您的需要:在《政策导向》《科技视点》《创新论坛》《法规标准》《国家重点研发计划项目跟踪》《试验研究》《材料与设计》《科研足迹》《检验评价》《检测技术》《管理技术》《节能减排》《水处理》《安全分析》《事故警示》《应急救援》《特检之苑》《企业之窗》《行业动态》等栏目中,让您在了解国家政策的同时了解行业中的最新动态,在获取知识的同时获得高端阅读享受。

《中国特种设备安全》刊号 CN 11-5345/TK, ISSN 1673-257X。月刊,大 16 开,每期定价 28.00 元,全年定价 336.00 元,邮发代号 82-411,全国各地邮局均可订阅。

需要订阅 2019 年度《中国特种设备安全》杂志的读者与订户,请及时到当地邮局订阅,也可直接向本发行部订阅。

汇款地址及邮编:北京市朝阳区和平街西苑 2 号 E111 室 100029

户名:北京劳安特种书刊服务部 银行账号:交通银行北京和平里支行 110060224018001067649

联系人:庄晓 010-59068615; 010-84279798 孙海洋 010-59068612

传真:59068616 或 84279798 电子邮箱:zsz@csei.org.cn 网址: <http://www.csespub.org>

淘宝书店:中国特种设备安全书店

