



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109683552 B

(45)授权公告日 2020.04.28

(21)申请号 201811427216.0

审查员 梁兵

(22)申请日 2018.11.27

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109683552 A

(43)申请公布日 2019.04.26

(73)专利权人 大连理工大学

地址 116024 辽宁省大连市甘井子区凌工
路2号

(72)发明人 徐金亭 徐隆坤 耿真

(74)专利代理机构 大连理工大学专利中心

21200

代理人 温福雪 侯明远

(51)Int.Cl.

G05B 19/19(2006.01)

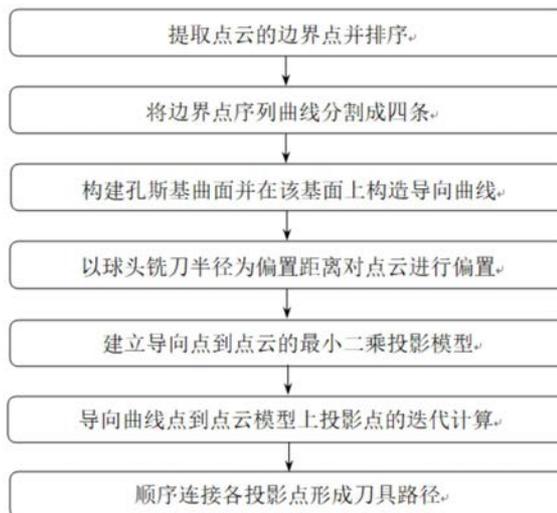
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

一种基面曲线导向的复杂点云模型上的数控加工路径生成方法

(57)摘要

本发明属于数控加工技术领域,一种基面曲线导向的复杂点云模型上的数控加工路径生成方法。首先,提取点云的边界点并排序,形成有序的边界点序列曲线,再将其分割成四条边界点序列曲线;根据四条点序列曲线构建孔斯基曲面并在该基面上构造导向曲线;然后,以球头铣刀半径为偏置距离对点云进行偏置;建立导向点到点云的最小二乘投影模型,给出该模型工作点的权值确定方法和投影方向计算策略;将导向曲线沿着计算的投影方向迭代投影到偏置点云上,从而生成无干涉刀具路径。本发明方法越过了点云数据到CAD参数模型的复杂构造过程,直接基于测量点云进行刀具路径规划,有效缩短从零件原型测量到零件制造的生产制造周期,降低加工制造的成本。



1. 一种基面曲线导向的复杂点云模型上的数控加工路径生成方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤a,提取点云的边界点并对边界点进行排序,形成有序的边界点序列曲线,再将其分割成四条边界点序列曲线;

具体步骤包括:

a1. 选取点云上任意一点p,并以p为原点建立局部坐标系,坐标系中 $\mathbf{e}_1^{(L)}$ 是p点和其K邻域点集 $C_K(p)$ 中任意一点连线方向的单位向量, $\mathbf{e}_3^{(L)}$ 是p点和其K邻域点集 $C_K(p)$ 所拟合平面的单位法线向量, $\mathbf{e}_2^{(L)}$ 是 $\mathbf{e}_1^{(L)}$ 和 $\mathbf{e}_3^{(L)}$ 的向量积;

a2. 将K邻域点集 $C_K(p)$ 投影到 $\mathbf{e}_1^{(L)} - \mathbf{e}_2^{(L)}$ 所在的平面内得到投影点集 $C_K^{\text{pro}}(p)$,对于任意一点 $\mathbf{q}_j^{\text{pro}} \in C_K^{\text{pro}}(p), j=1, \dots, k$, φ_i 表示点p和点 $\mathbf{q}_j^{\text{pro}}$ 的连线和轴 $\mathbf{e}_1^{(L)}$ 的角度;

a3. 计算所有夹角 φ_i 以及两个连续夹角的差值 $\Delta\varphi_i$,若最大角差 $\Delta\varphi_{\max}$ 超过指定的角度阈值 $\Delta\varphi_{\text{th}}$,则该点p就是边界点;

a4. 对边界点进行排序:找边界点集中任意一点作为起始边界点 $\mathbf{p}_{\text{st},0}^{\text{B}}$,找到其在边界集中的最近点 $\mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}}$,然后将向量 $\overrightarrow{\mathbf{p}_{\text{st},0}^{\text{B}}\mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}}}$ 作为下一个边界点的搜寻方向 \bar{s} ;

a5. 令 $\mathbf{p}_{\text{st}}^{\text{B}} = \mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}}$,然后沿着搜寻方向 \bar{s} 在边界点集中寻找距离 $\mathbf{p}_{\text{st}}^{\text{B}}$ 最近的边界点 \mathbf{p}_j^{B} ,则令 $\mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}} = \mathbf{p}_j^{\text{B}}$,更新搜寻方向 $\bar{s} = \overrightarrow{\mathbf{p}_{\text{st}}^{\text{B}}\mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}}}$,直到搜索至起始边界点 $\mathbf{p}_{\text{st},0}^{\text{B}}$ 时终止;

步骤b,根据四条边界点序列曲线构建孔斯基曲面并在该基面上构造导向曲线;

导向曲线点的构建方程如下:

$$\mathbf{p}_{i,j}^{\text{g}} = (\mathbf{r}_{i,j}, \mathbf{n}_{i,j}) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{r}_{i,j}$ 表示第i个导向曲线上的第j个导向点, $\mathbf{n}_{i,j}$ 表示该导向点在基面上的单位法向量;

步骤c,以球头铣刀半径为偏置距离对点云进行偏置;

步骤d,建立导向点到点云的最小二乘投影模型,确定投影方向及参与投影点计算的工作点的权值,将导向曲线沿着计算的投影方向迭代投影到偏置点云上,生成无干涉刀具路径;

具体步骤包括:

d1. 导向曲线上的点到点云模型的平面最小二乘投影模型为:

$$E(d_{\text{pro}}) = \sum_{i=0}^n w_i \|\mathbf{p}^{\text{g}} + d_{\text{pro}} \mathbf{n}^{\text{pro}} - \mathbf{p}_i^{\text{o}}\| \quad (2)$$

式中, \mathbf{p}^{g} 为导向曲线点, $\mathbf{p}_i^{\text{o}}, i=0, \dots, n$ 是点云数据, w_i 是与数据点 \mathbf{p}_i^{o} 相关的权值因子; d_{pro} 表示投影距离, \mathbf{n}^{pro} 表示投影方向;

d2. 公式(2)中 $E(d_{\text{pro}})$ 取得最小值的条件为 $dE(d_{\text{pro}})/dd_{\text{pro}}=0$,由此得到 d_{pro} 为:

$$d_{\text{pro}} = \left(\sum_{i=0}^n \left[w_i (\mathbf{p}_i^{\circ} - \mathbf{p}^{\text{g}}) \cdot \mathbf{n}_{\text{pro}} \right] \right) / \sum_{i=0}^n w_i \quad (3)$$

d3. 投影方向为:

$$\mathbf{n}_{i,j}^{\text{pro}} = - \frac{\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}} + \mathbf{n}_{i,j}}{\|\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}} + \mathbf{n}_{i,j}\|} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}_{i,j}^{\text{pro}}$ 表示投影的方向向量, $\mathbf{n}_{i,j}$ 表示该导向点在基面上的单位法向量, $\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}}$ 表示点云上最靠近 $\mathbf{p}_{i,j}^{\text{g}}$ 的点 $\mathbf{p}_{i,j}^{\text{cls}}$ 的单位法向量;

d4. 权值因子 w_j 按下式确定:

$$w_i \leftarrow w_i / \sum_{i=0}^n w_i, \quad w_i = \frac{1}{1 + \text{dist}(\mathbf{p}_i^{\circ}, \mathbf{p}^{\text{g}})^4 + \text{dist}(\mathbf{p}_i^{\circ}, L_p)^4} \quad (5)$$

式中, $\text{dist}(\mathbf{p}_i^{\circ}, \mathbf{p}^{\text{g}})$ 为方向曲线点 \mathbf{p}^{g} 与工作点 \mathbf{p}_i° 间的距离, $\text{dist}(\mathbf{p}_i^{\circ}, L_p)$ 为 \mathbf{p}_i° 和投影线 L_p 的距离;

d5. 将导向曲线沿着计算的投影方向迭代投影到偏置点云上, 当两次迭代的差值满足给定的误差精度或达到最大迭代次数时终止迭代。

一种基面曲线导向的复杂点云模型上的数控加工路径生成方法

技术领域

[0001] 本发明属于及数控加工技术领域,特别涉及一种基面曲线导向的复杂点云模型上的数控加工路径生成方法。

背景技术

[0002] 目前,随着3D扫描设备的快速发展,稠密而且精确的点云可以更加细致地表示零件物理原型的几何形状,已经被应用于各行各业,如逆向工程(RE),快速原型造型(RP)等。为了实现这些零件物理原型的快速制造,传统的处理过程是先利用接触或非接触测量设备获取零件原型的测量点云,再从点云数据重构参数CAD模型,在CAD模型上规划数控加工刀具路径。但从测量数据到参数CAD模型的重构却是一个复杂而且耗时的过程,占整个设计、制造周期的60%以上。尽管目前的商业CAD软件如CATIA、Imageware等都已提供了从点云数据到参数曲面的逆向设计功能,但依赖于设计人员经验的点云复杂区域分割、区域面片间的拼接裁剪、逼近精度和连续性控制以及由此导致的不可避免的模型反复修改,已严重限制了基于参数曲面的数控加工方法在面向点云数据时的实现运行和在制造企业的实际应用。越过离散数据到参数曲面的繁琐构造过程,直接基于点云数据实现复杂曲面零件的高效数控加工无疑是突破上述问题的有效途径。张英杰等人申请的中国发明专利“一种基于测量数据的刀具轨迹直接生成方法”通过采用有向投影的方法生成数控加工的刀具轨迹(专利号:CN 102608954 A),但是该方法与本发明所采用的更能反映曲面形状及特征的孔斯基面和迭代最小二乘投影方法明显不同。文献“Zhang YJ,Ge LL.Adaptive tool path generation on point-sample surfaces.Precis Eng 2011;35(4):591-601.”中提出了一种基于水平集的点投影技术,从而在点云上直接生成刀具路径。文献“Liu Y,Xia S,Qian X.Direct numerical control (NC) path generation:from discrete points to continuous spline paths.ASME Trans,J Comput Inf Sci Eng2012;12(3):031002-1-12”中提出了一种基于移动最小二乘曲面投影的方法。目前,国内外针对基于点云模型的数控加工路径生成方法,主要是先将散乱点云数据转换为简单的Z-map或三角网格模型,再利用截面法生成刀具路径。已提出的基于水平集投影和移动最小二乘平面投影的方法也与本发明点云直接最小二乘迭代投影的方法具有明显不同。本发明致力于寻找一种可以在接触或非接触扫描设备测量的点云上直接生成刀具轨迹的方法,不涉及非线性优化且数学计算过程简单直观,越过了点云数据CAD参数模型的构造过程,避免了模型转换的过程中出现的一些问题,能够有效缩短新产品的开发周期以及从零件原型测量到零件制造的生产制造周期,降低加工制造的成本。

发明内容

[0003] 为克服现有的点云模型上加工路径生成方法的不足,本发明提供了一种基面曲线导向的复杂点云模型上的数控加工路径生成方法,实现直接基于点云数据生成加工路径方

法。

[0004] 本发明的技术方案：

[0005] 一种基面曲线导向的复杂点云模型上的数控加工路径生成方法，包括以下步骤：

[0006] 步骤a，提取点云的边界点并对边界点进行排序，形成有序的边界点序列曲线，再将其分割成四条边界点序列曲线；

[0007] 具体步骤包括：

[0008] a1. 选取点云上任意一点p，并以p为原点建立局部坐标系，坐标系中 $\mathbf{e}_1^{(L)}$ 是p点和其K邻域点集 $C_K(p)$ 中任意一点连线方向的单位向量， $\mathbf{e}_3^{(L)}$ 是p点和其K邻域点集 $C_K(p)$ 所拟合平面的单位法线向量， $\mathbf{e}_2^{(L)}$ 是 $\mathbf{e}_1^{(L)}$ 和 $\mathbf{e}_3^{(L)}$ 的向量积；

[0009] a2. 将K邻域点集 $C_K(p)$ 投影到 $\mathbf{e}_1^{(L)} - \mathbf{e}_2^{(L)}$ 所在的平面内得到投影点集 $C_K^{\text{pro}}(p)$ ，对于任意一点 $\mathbf{q}_j^{\text{pro}} \in C_K^{\text{pro}}(p)$ ， $j=1, \dots, k$ ， φ_i 表示点p和点 $\mathbf{q}_j^{\text{pro}}$ 的连线和轴 $\mathbf{e}_1^{(L)}$ 的角度；

[0010] a3. 计算所有夹角 φ_i 以及两个连续夹角的差值 $\Delta\varphi_i$ ，若最大角差 $\Delta\varphi_{\text{max}}$ 超过指定的角度阈值 $\Delta\varphi_{\text{th}}$ ，则该点p就是边界点；

[0011] a4. 对边界点进行排序：找边界点集中任意一点作为起始边界点 $\mathbf{p}_{\text{st},0}^{\text{B}}$ ，找到其在边界点集中的最近点 $\mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}}$ ，然后将向量 $\overrightarrow{\mathbf{p}_{\text{st},0}^{\text{B}} \mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}}}$ 作为下一个边界点的搜寻方向 $\bar{\mathbf{s}}$ ；

[0012] a5. 令 $\mathbf{p}_{\text{st}}^{\text{B}} = \mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}}$ ，然后沿着搜寻方向 $\bar{\mathbf{s}}$ 在边界点集中寻找距离 $\mathbf{p}_{\text{st}}^{\text{B}}$ 最近的边界点 \mathbf{p}_j^{B} ，则令 $\mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}} = \mathbf{p}_j^{\text{B}}$ ，更新搜寻方向 $\bar{\mathbf{s}} = \overrightarrow{\mathbf{p}_{\text{st}}^{\text{B}} \mathbf{p}_{\text{cls}}^{\text{B}}}$ ，直到搜索至起始边界点 $\mathbf{p}_{\text{st},0}^{\text{B}}$ 时终止；

[0013] 步骤b，根据四条边界点序列曲线构建孔斯基曲面并在该基面上构造导向曲线；

[0014] 导向曲线点的构建方程如下：

$$[0015] \quad \mathbf{p}_{i,j}^{\text{g}} = (\mathbf{r}_{i,j}, \mathbf{n}_{i,j}) \quad (1)$$

[0016] 式中， $\mathbf{r}_{i,j}$ 表示第i个导向曲线上的第j个导向点， $\mathbf{n}_{i,j}$ 表示该导向点在基面上的单位法向量；

[0017] 步骤c，以球头铣刀半径为偏置距离对点云进行偏置；

[0018] 步骤d，建立导向点到点云的最小二乘投影模型，确定投影方向及参与投影点计算的工作点的权值，将导向曲线沿着计算的投影方向迭代投影到偏置点云上，生成无干涉刀具路径；

[0019] 具体步骤包括：

[0020] d1. 导向曲线上的点到点云模型的平面最小二乘投影模型为：

$$[0021] \quad E(d_{\text{pro}}) = \sum_{i=0}^n w_i \|\mathbf{p}^{\text{g}} + d_{\text{pro}} \mathbf{n}^{\text{pro}} - \mathbf{p}_i^{\text{o}}\| \quad (2)$$

[0022] 式中， \mathbf{p}^{g} 为导向曲线点， \mathbf{p}_i^{o} ， $i=0, \dots, n$ 是点云数据， w_i 是与数据点 \mathbf{p}_i^{o} 相关的权值因子，由公式 (5) 确定；

[0023] d2. 公式 (2) 中 $E(d_{\text{pro}})$ 取得最小值的条件为 $dE(d_{\text{pro}})/dd_{\text{pro}}=0$ ，由此得到 d_{pro} 为：

$$[0024] \quad d_{\text{pro}} = \left(\sum_{i=0}^n [w_i (\mathbf{p}_i^o - \mathbf{p}^g) \cdot \mathbf{n}_{\text{pro}}] \right) / \sum_{i=0}^n w_i \quad (3)$$

[0025] d3. 投影方向为:

$$[0026] \quad \mathbf{n}_{i,j}^{\text{pro}} = - \frac{\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}} + \mathbf{n}_{i,j}}{\|\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}} + \mathbf{n}_{i,j}\|} \quad (4)$$

[0027] 式中: $\mathbf{n}_{i,j}^{\text{pro}}$ 表示投影的方向向量, $\mathbf{n}_{i,j}$ 表示该导向点在基面上的单位法向量, $\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}}$ 表示点云上最靠近 $\mathbf{p}_{i,j}^g$ 的点 $\mathbf{p}_{i,j}^{\text{cls}}$ 的单位法向量;

[0028] d4. 权值因子 w_j 按下式确定:

$$[0029] \quad w_i \leftarrow w_i / \sum_{i=0}^n w_i, \quad w_i = \frac{1}{1 + \text{dist}(\mathbf{p}_i^o, \mathbf{p}^g)^4 + \text{dist}(\mathbf{p}_i^o, L_p)^4} \quad (5)$$

[0030] 式中, $\text{dist}(\mathbf{p}_i^o, \mathbf{p}^g)$ 为导向曲线点 \mathbf{p}^g 与工作点 \mathbf{p}_i^o 间的距离, $\text{dist}(\mathbf{p}_i^o, L_p)$ 为 \mathbf{p}_i^o 和投影线 L_p 的距离;

[0031] d5. 将导向曲线沿着计算的投影方向迭代投影到偏置点云上, 当两次迭代的差值满足给定的误差精度或达到最大迭代次数时终止迭代。

[0032] 与现有的技术相比, 本发明的有益效果: 本发明直接基于测量点云进行刀具路径的构造, 越过了点云数据曲面拟合的过程, 能够有效缩短从零件原型测量到零件制造的生产制造周期, 降低设计制造成本。

附图说明

[0033] 图1是本发明方法的流程图。

[0034] 图2是点云边界数据点的提取示意图。

[0035] 图3(a) 是散乱数据点的排序示意图。

[0036] 图3(b) 是四条边界点序列曲线的分割示意图。

[0037] 图4(a) - (c) 是点云偏置的示意图。

[0038] 图5是投影方向计算的示意图。

[0039] 图6是所获得加工路径的例子。

具体实施方式

[0040] 本发明的一种基面曲线导向的复杂点云模型上的数控加工路径生成方法的流程图如图1所示。下面结合附图和实施步骤对本发明的具体实施过程进行详细描述:

[0041] 步骤1. 提取点云的边界数据点。

[0042] 步骤1.1. 首先选取点云上任意一点 p , 并以 p 为原点建立局部坐标系 $\xi^{(L)}$, 在坐标系中, $\mathbf{e}_1^{(L)}$ 是 p 点和其 K 邻域点集 $C_K(p)$ 中任意一点连线方向的单位向量, $\mathbf{e}_3^{(L)}$ 是 p 点和其 K 邻域点集所拟合平面的单位法线向量, $\mathbf{e}_2^{(L)}$ 是 $\mathbf{e}_1^{(L)}$ 和 $\mathbf{e}_3^{(L)}$ 的向量积。

[0043] 步骤1.2. 将 K 邻域点集 $C_K(p)$ 投影到 $\mathbf{e}_1^{(L)} - \mathbf{e}_2^{(L)}$ 平面上, 得到投影点集 $C_K^{\text{pro}}(p)$, 对于

任意一点 $q_j^{\text{pro}} \in C_K^{\text{pro}}(p)$, $j=1, \dots, k$, φ_i 表示点 p 和点 q_j^{pro} 的连线和轴 $e_1^{(L)}$ 的角度, 用下式表示:

$$[0044] \quad \varphi_i = \begin{cases} \arccos \left(\frac{q_j^{\text{pro}} - p}{\|q_j^{\text{pro}} - p\|} \cdot e_1^{(L)} \right), & q_j^{\text{pro}} \in \text{I, II} \\ 2\pi - \arccos \left(\frac{q_j^{\text{pro}} - p}{\|q_j^{\text{pro}} - p\|} \cdot e_1^{(L)} \right), & q_j^{\text{pro}} \in \text{III, IV} \end{cases} \quad (1)$$

[0045] 步骤1.3. 计算邻域点集 $C_K(p)$ 每一点对应的夹角 φ_i , 并计算两个连续夹角的差值 $\Delta\varphi_i = \varphi_{i+1} - \varphi_i$, 如果最大角差 $\Delta\varphi_{\max}$ 超过指定的角度阈值 $\Delta\varphi_{\text{th}}$:

$$[0046] \quad \Delta\varphi_{\max} = \max \{ \Delta\varphi_1, \dots, \Delta\varphi_{k-1} \} > \Delta\varphi_{\text{th}} \quad (2)$$

[0047] 则该点 p 就是边界点。图2为提取边界数据点的示意图。

[0048] 步骤1.4. 照此步骤搜索点云上所有的点, 得到边界点集 $\{p_j^{\text{B}}\}$ 。

[0049] 步骤2. 边界数据点的排序。在边界点集中选择任一点 $p^{\text{B}} \in \{p_j^{\text{B}}\}$ 作为起始边界点 $p_{\text{st},0}^{\text{B}}$, 然后按照以下步骤对散乱的边界点进行排序:

[0050] 步骤2.1. 在边界点集合 $\{p_j^{\text{B}}\}$ 中寻找距离点 $p_{\text{st},0}^{\text{B}}$ 最近的点 $p_{\text{cls}}^{\text{B}}$, 然后将向量 $\overrightarrow{p_{\text{st},0}^{\text{B}} p_{\text{cls}}^{\text{B}}}$ 作为下一个边界点的搜寻方向 \bar{s} , 如图3(a)所示。

[0051] 步骤2.2. 令 $p_{\text{st}}^{\text{B}} = p_{\text{cls}}^{\text{B}}$, 然后沿着搜寻方向 \bar{s} 寻找距离 p_{st}^{B} 最近的边界点 p_j^{B} , 同时点 p_j^{B} 应该满足下式:

$$[0052] \quad \theta_j = \arccos \left(\frac{p_{\text{st}}^{\text{B}} p_j^{\text{B}}}{\|p_{\text{st}}^{\text{B}} p_j^{\text{B}}\|} \cdot \bar{s} \right) \leq \theta_{\text{th}} \quad (3)$$

[0053] 其中 θ_{th} 是指定的角度阈值。

[0054] 步骤2.3. 若 (3) 式成立, 则令 $p_{\text{cls}}^{\text{B}} = p_j^{\text{B}}$, 更新搜寻方向 $\bar{s} = \overrightarrow{p_{\text{st}}^{\text{B}} p_{\text{cls}}^{\text{B}}}$ 。

[0055] 步骤2.4. 直到搜索至起始边界点 $p_{\text{st},0}^{\text{B}}$ 时终止, 否则跳转至步骤2.2继续搜索。

[0056] 步骤3. 构建Coons基曲面及导向曲线

[0057] 步骤3.1. 通过交互操作指定四个角点, 利用四个角点将步骤2得到的经过排序的边界曲线分割成4段点序列曲线 (PSC), 如图3(b)所示, 每个分段用三次B样条曲线进行拟合:

$$[0058] \quad r_s(u) = \sum_i^m d_{i,s} N_{i,3}(u), \quad s=0,1 \quad \text{and} \quad r_t(v) = \sum_j^n d_{j,t} N_{j,3}(v), \quad t=0,1 \quad (4)$$

[0059] 其中 $0 \leq u, v \leq 1$, $r_0(u)$ 、 $r_1(u)$ 、 $r_0(v)$ 和 $r_1(v)$ 满足节点向量的兼容性条件。

[0060] 四个角点满足以下条件:

$$[0061] \quad \begin{aligned} \mathbf{r}(0,0) &= \mathbf{r}_{s=0}|_{u=0} = \mathbf{r}_{t=0}|_{v=0}, \mathbf{r}(1,0) = \mathbf{r}_{s=0}|_{u=1} = \mathbf{r}_{t=1}|_{v=0} \\ \mathbf{r}(0,1) &= \mathbf{r}_{s=1}|_{u=0} = \mathbf{r}_{t=0}|_{v=1}, \mathbf{r}(1,1) = \mathbf{r}_{s=1}|_{u=1} = \mathbf{r}_{t=1}|_{v=1} \end{aligned} \quad (5)$$

[0062] 步骤3.2.通过四条边界曲线的双线性插值来构造Coons基面。最简单的双线性Coons曲面表示如下：

$$[0063] \quad \mathbf{r}(u,v) = s_1(u,v) + s_2(u,v) - s_3(u,v) \quad (6)$$

[0064] 其中 $s_1(u,v)$ 和 $s_2(u,v)$ 是分别位于 $r_0(u)$ 和 $r_1(u)$ 以及 $r_0(v)$ 和 $r_1(v)$ 之间的线性放样曲面, $s_3(u,v)$ 是一个张量积曲面,该曲面是由公式(5)中的四个角点定义的双线性曲面。

[0065] 步骤3.3.构建导向曲线点。导向曲线点的构建方程如下：

$$[0066] \quad \mathbf{p}_{i,j}^g = (\mathbf{r}_{i,j}, \mathbf{n}_{i,j}) \quad (7)$$

[0067] 其中 $r_{i,j}$ 表示第 i 个导向曲线上的第 j 个导向点, $n_{i,j}$ 表示该导向点在基面上的单位法向量。将第 i 条PSC导向曲线记为 $\mathbf{C}_i^g = \{\mathbf{p}_{i,j}^g\}$ 。

[0068] 步骤4.点云的偏置

[0069] 为了避免刀具与点云模型间的加工干涉,以球头铣刀刀具半径为偏置距离进行偏置,每一数据点的偏置方向为该点的法线方向。

[0070] 步骤4.1.为了估算点云中每一数据点的法线方向,可先计算该点 K 邻域点集的协方差矩阵。令 $C_K(p)$ 表示点 p 的 K 邻域点集,则其 3×3 的协方差矩阵 H_p 由下式计算：

$$[0071] \quad \mathbf{H}_p = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\mathbf{q}_j - \mathbf{p})(\mathbf{q}_j - \mathbf{p})^T \quad (8)$$

[0072] 其中 $q_j \in C_K(p)$, $j=1, \dots, k$ 。对 H_p 进行奇异值分解,则 H_p 最小特征值对应的特征向量就是 p 点的法向量 n_p ,即 $n_p = e_{\min}$ 。图4(a)为用上述方法所计算出的点云法向量。

[0073] 步骤4.2.统一法线的方向,并使所有法线指向点云的加工侧,如图4(b)所示。首先使点云角点 p 点的法线方向与其在基面上对应角点的法线方向一致,再调整 p 点的每个邻域点的法线方向,使得 p 点的法线方向和 p 点的每个邻域点的法线方向的角度不超过指定角度阈值：

$$[0074] \quad \arccos(\mathbf{n}_p \cdot \mathbf{n}_{\text{neig}}) \leq \varpi_{\text{th}} \quad (9)$$

[0075] 其中 n_p, n_{neig} 分别是 p 点和其邻域点的法线方向, ϖ_{th} 是角度阈值,其大小通常小于 $\pi/2$ 。

[0076] 步骤4.3.点云的偏置 P_{offset} 可由下式计算：

$$[0077] \quad P_{\text{offset}}: p^o = p + n_p R_c \quad (10)$$

[0078] 其中是 R_c 球头刀半径。图4(c)表示的是点云偏置示意图

[0079] 步骤5.计算投影方向,如图5所示,投影方向由下式确定：

$$[0080] \quad \mathbf{n}_{i,j}^{\text{pro}} = -\frac{\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}} + \mathbf{n}_{i,j}}{\|\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}} + \mathbf{n}_{i,j}\|} \quad (11)$$

[0081] 式中 $\mathbf{n}_{i,j}^{\text{pro}}$ 表示投影的方向向量, $n_{i,j}$ 表示该导向点在基面上的单位法向量, $\mathbf{n}_{i,j}^{\text{cls}}$ 表示点云上最靠近 $\mathbf{p}_{i,j}^g$ 的点 $\mathbf{p}_{i,j}^{\text{cls}}$ 的单位法向量。

[0082] 步骤6. 建立导向点到点云的最小二乘投影模型, 确定工作点的权值因子。

[0083] 步骤6.1. 导向曲线点沿投影方向在偏置点云上的投影表示如下:

$$[0084] \quad q^{\text{pro}} = p^g + d_{\text{pro}} n^{\text{pro}} \quad (12)$$

[0085] 式中, q^{pro} 为待求的投影点, d_{pro} 表示投影距离, n^{pro} 表示投影方向。

[0086] 步骤6.2. 导向曲线点到点云的最小二乘投影模型为:

$$[0087] \quad E(d_{\text{pro}}) = \sum_{i=0}^n w_i \| p^g + d_{\text{pro}} n^{\text{pro}} - p_i^o \| \quad (13)$$

[0088] 式中, 其中 $p_i^o, i=0, \dots, n$ 是点云数据, w_i 是与数据点 p_i^o 的权值因子, 由公式 (16) 确定。

[0089] 步骤6.3. 公式 (13) 中目标函数 $E(d_{\text{pro}})$ 取得最小值的条件为:

$$[0090] \quad \frac{dE(d_{\text{pro}})}{dd_{\text{pro}}} = 0 \quad (14)$$

[0091] 由此可以得到:

$$[0092] \quad d_{\text{pro}} = \left(\sum_{i=0}^n [w_i (p_i^o - p^g) \cdot n_{\text{pro}}] \right) / \sum_{i=0}^n w_i \quad (15)$$

[0093] 步骤6.4. 权值因子 w_i 按下式确定

$$[0094] \quad w_i = \frac{1}{1 + \text{dist}(p_i^o, p^g)^4 + \text{dist}(p_i^o, L_p)^4} \quad (16)$$

[0095] 式中, $\text{dist}(p_i^o, p^g)$ 为待投影点 p_i^o 和导向曲线点 p^g 之间的距离, $\text{dist}(p_i^o, L_p)$ 为 p_i^o 和投影线 L_p 的距离。投影曲线方程如下:

$$[0096] \quad L_p = p^g + t n^{\text{pro}} \quad (17)$$

[0097] 步骤7. 迭代计算导向曲线点到点云上的投影点, 顺序连接投影点, 形成刀具路径。

[0098] 步骤7.1. 选择偏置点云作为初始工作点集 P_0 , 利用公式 (12) (15) 计算投影点 q^{pro} ;

[0099] 步骤7.2. 按公示 (18) 计算第1次迭代中权值因子 $\{w_i\}$ 的阈值 w_{limit} ;

$$[0100] \quad w_{\text{limit}} = \begin{cases} w_{\text{mean}} & , l = 0 \\ w_{\text{mean}} + \frac{w_{\text{max}} - w_{\text{mean}}}{11 - l} & , 0 < l < 10 \\ w_{\text{mean}} + \frac{w_{\text{max}} - w_{\text{mean}}}{2} & , \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

[0101] 式中, w_{mean} 和 w_{max} 分别为所有权值因子 $\{w_i\}$ 的平均值和最大值。

[0102] 步骤7.3. 如果工作点集中的点 P_1 的权值因子 w_j 大于阈值 w_{limit} , 则保留在工作点集中; 否则将其从工作点集中删除, 从而更新工作点集;

[0103] 步骤7.4. 根据新的工作点集, 计算第 $l+1$ 次迭代中的投影点 q_{l+1}^{pro} , 并计算如下迭代结束准则:

$$[0104] \quad \| q_{l+1}^{\text{pro}} - q_l^{\text{pro}} \| \leq \varepsilon_{\text{pr}} \text{ 或 } l > K_{\text{max}} \quad (19)$$

[0105] 式中, ε_{pr} 为给定的计算精度, K_{max} 为最大迭代次数。如果满足上述迭代终止准则, 迭代终止; 否则, 将待投影点更新为 q_{i+1}^{pr} , 继续上述迭代过程直至迭代终止准则被满足。

[0106] 综上所述, 本发明直接基于测量点云进行刀具路径的构造, 越过了点云数据到CAD参数模型的构造过程, 能够有效缩短从零件原型测量到零件加工制造的生产周期, 降低设计制造成本。由于在简单基面上可以更方便地规划高效刀具运动模式, 从而使刀具能够在点云上最合适的路径拓扑进行高效加工。

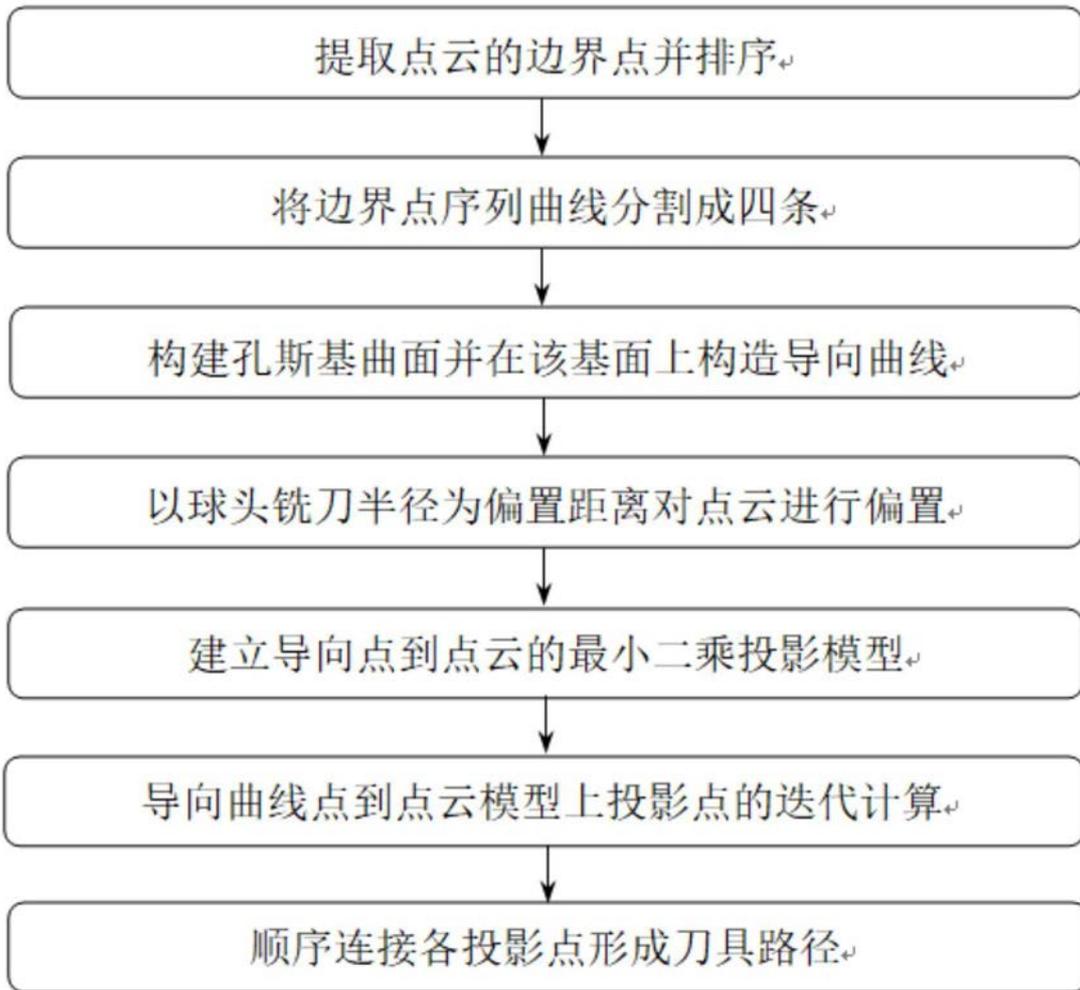


图1

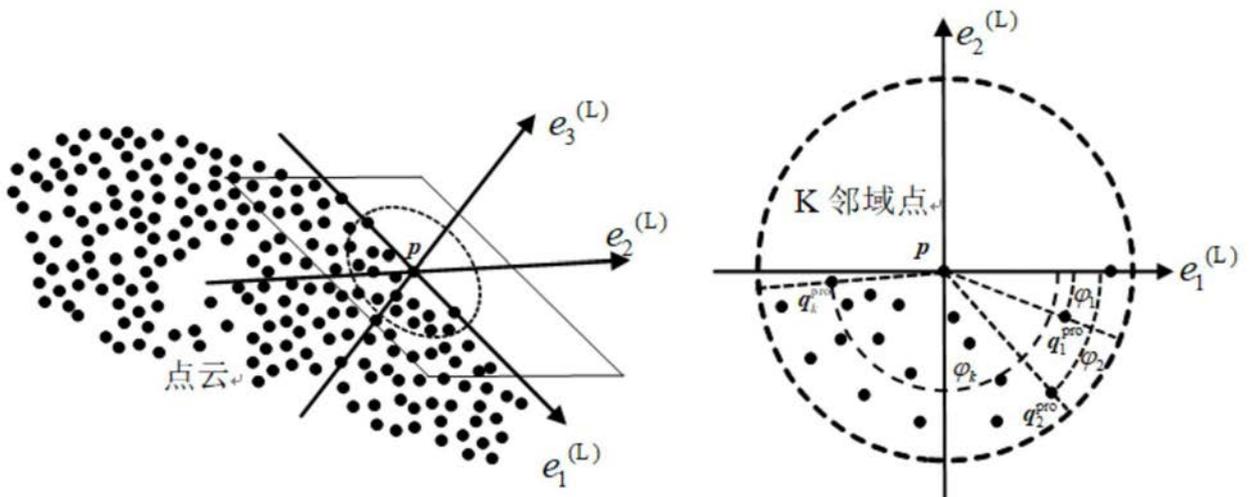


图2

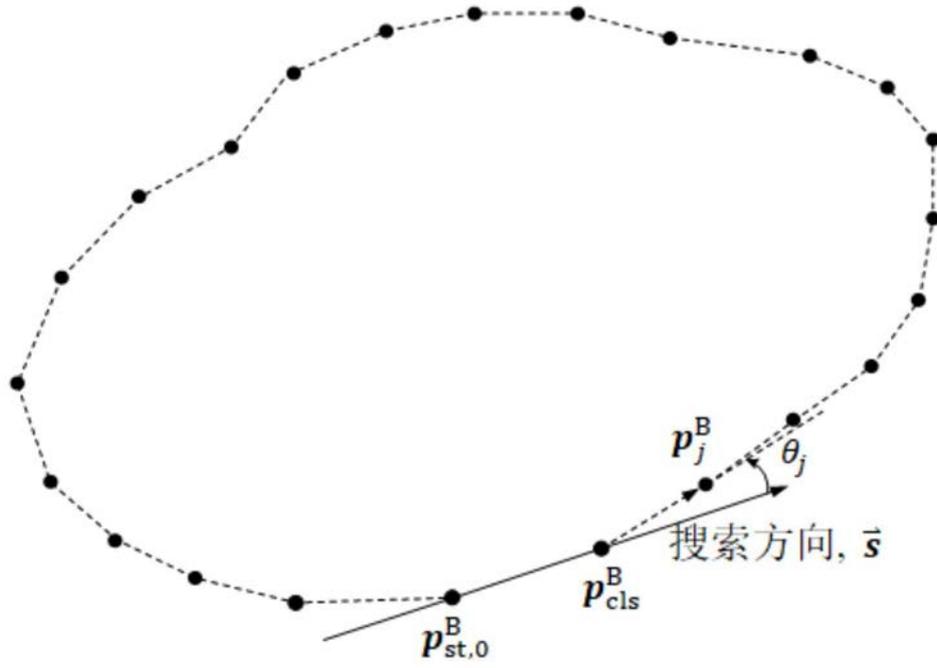


图3 (a)

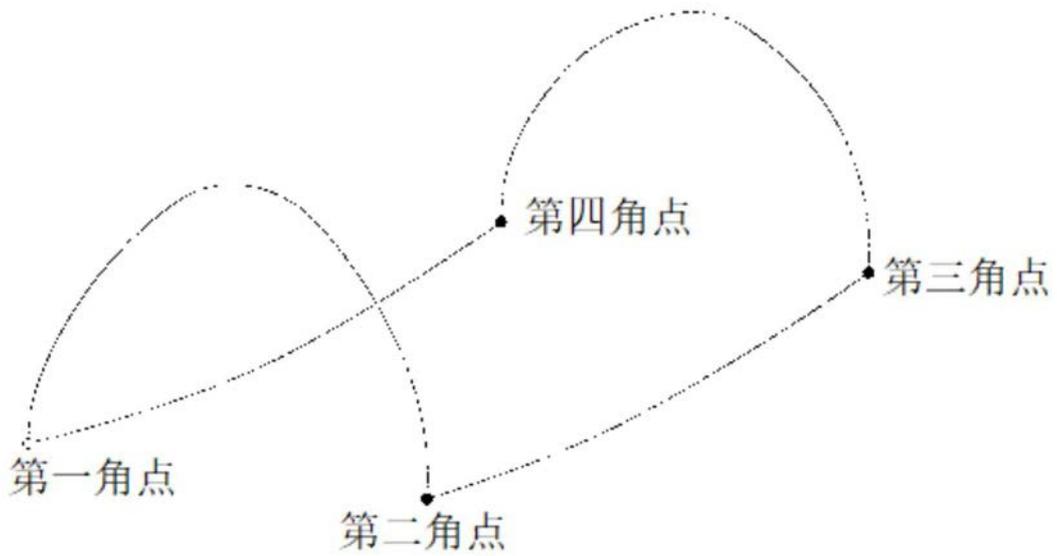


图3 (b)

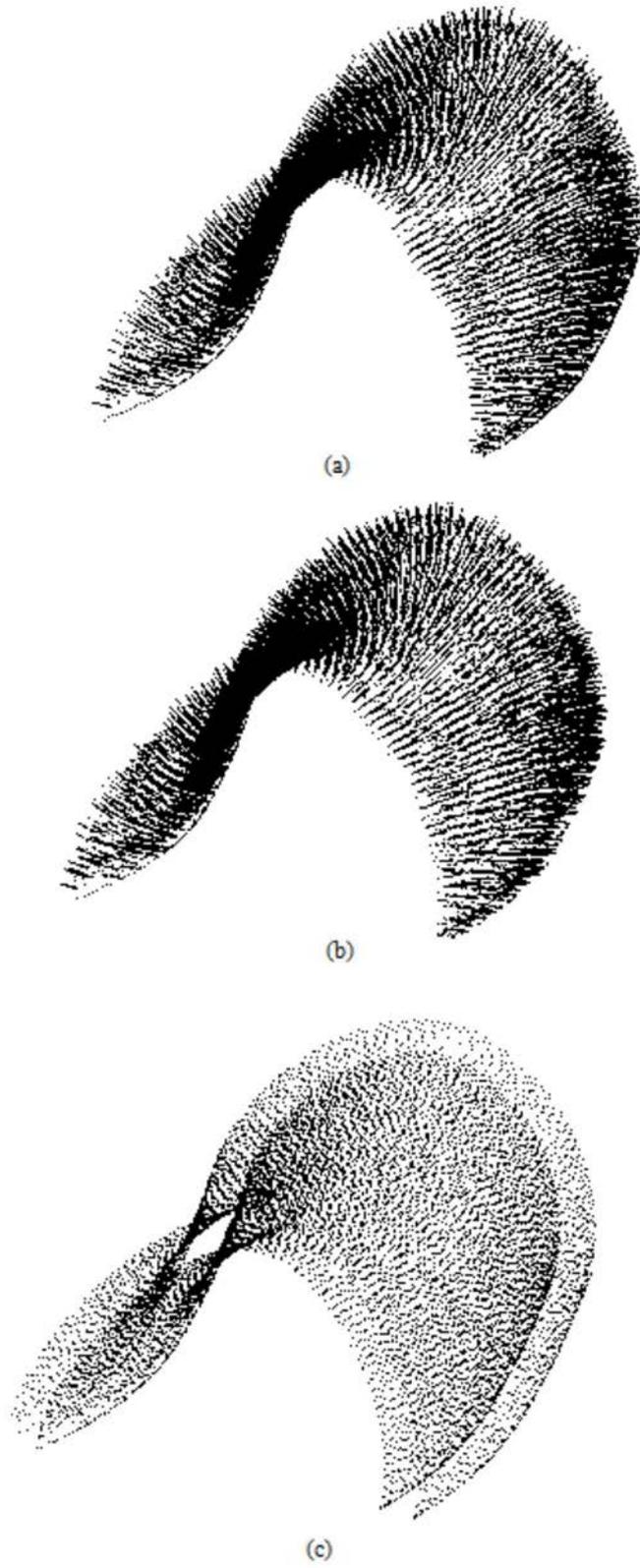


图4

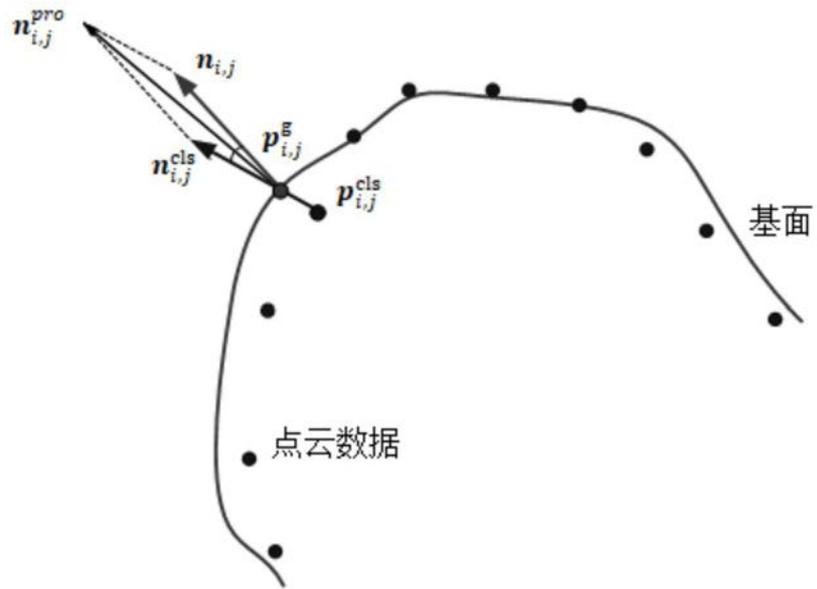


图5

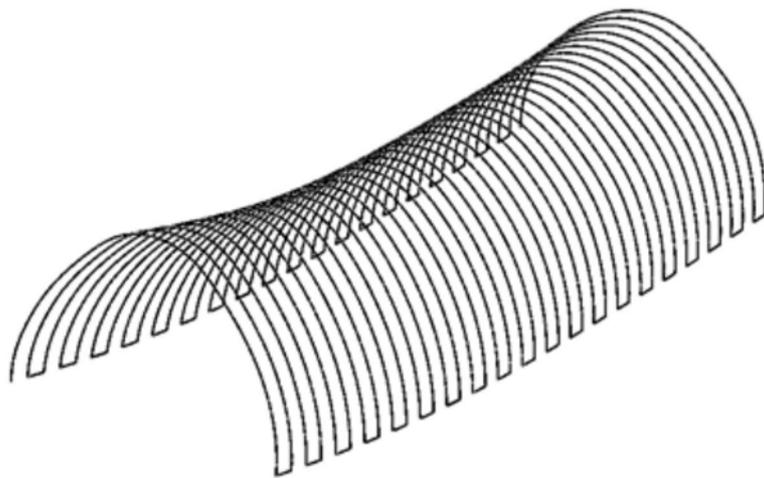


图6