DOI: 10.3901/JME.2013.03.137

基于 ABF 的自由曲面上三维复杂图案的雕刻方法*

徐金亭 汪顺可 张向奎

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116024)

摘要: 利用五轴数控机床在自由曲面上快速生成美观的图案在珠宝纹饰雕刻、吹塑/挤压模具图案制作、复杂产品外观图案的自动喷绘等方面具有潜在的广泛应用。针对目前图案映射对单一参数曲面参数域处理的依赖,提出一种可应用于复合裁剪曲面、网格曲面甚至点云曲面的三维复杂图案雕刻方法。利用图像边界处理技术,将二维的数字图案转化为可用于数控加工的离散点集。进而根据保角映射(Angle-based flattening, ABF)原理,将目标曲面映射到二维平面域,建立三维曲面与二维平面域之间的一一映射关系。以此映射为向导,提出基于面积坐标的线性映射方法,将离散图案逆映射到目标曲面上。根据选择的刀具参数及给定的切削深度,生成用于三维复杂图案雕刻的刀具轨迹,并进行雕刻仿真试验和实际雕刻加工试验。试验结果证明,所提方法简单实用,能够在复杂自由曲面上生成美观的雕刻图案。

关键词: 自由曲面 图案雕刻 刀具轨迹

中图分类号: TP391

An ABF-based Method for 3D Complex Pattern Sculpting on Free-form Surfaces

XU Jinting WANG Shunke ZHANG Xiangkui

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Sculpting pattern onto free-form surfaces in five-axis CNC machine tools is a potential method for many applications such as jewelry, glass blow-molding, injection molding, even automatically spray painting on the surfaces, etc. Since traditional methods map the pattern placed in parameter domain onto the part surface by using the surface equation, this may not be feasible for multiple trimmed surfaces, mesh surfaces and cloud of point surfaces. An angle-based flattening (ABF) based method for pattern sculpting on free-form surfaces is developed. 2D pattern is converted into discrete data points for tool path generation from digital image using image boundary processing technique. To map the discrete pattern onto the part surface, ABF is introduced, which is used for flattening the part surface onto 2D plane. Using this mapping of the part surface to 2D region, a linear mapping method is proposed to inversely map the pattern onto the part surface. On basis of this, according to the selected cutter parameters and the depth of cut, tool path for pattern sculpting is generated. Simulation and real machining is implemented on several sample surfaces and experimental results demonstrate the validity of the proposed method.

Key words: Free-form surface Pattern sculpting Tool path generation

0 前言

为了产品外形更为美观,设计者经常在产品外表面设计各种极具创意的图案,此类图案通常是在处理图形图像的CAD软件中进行设计,然后手动或利用三轴或五轴数控机床在产品或其模具表面进行雕刻加工。图案的自动雕刻属于数控加工领域的

范畴,在珠宝表面纹饰雕刻、吹塑/挤压模具图案制作、复杂产品外观图案的自动喷绘等方面具有潜在的广泛应用。

目前,对数控加工的研究大多集中在平面雕刻、型腔铣削和自由曲面加工等方面^[1-4],对自由曲面上的三维图案雕刻却少有报道^[5]。对于三维图案雕刻而言,其实现的关键在于两维设计图案到三维目标曲面的映射。一个最为直观的处理方法就是将二维设计图案直接投影到三维曲面,生成用于数控加工的刀具轨迹^[6]。这一过程的数学本质:计算设

* 国家自然科学基金(51105058)和国家自然科学基金重大(11290143)资助项目。20120621收到初稿,20121129收到修改稿

计图案的投影直线与目标曲面的交点,其涉及繁琐的迭代过程和初始交点位置的选择。PIEGL 等^[7]曾指出直线与曲面的交点或点到曲面最近点计算的迭代处理耗时且易于出错的,有时在初始点非常靠近精确解的情况下也会出现计算错误。PARK^[8]进一步将空间曲线离散成许多直线段,利用包含直线段的垂直曲面与目标曲面的逼近网格相交,将空间曲线投影到三维曲面上。KIM 等^[9]提出将目标曲面区域的简单逼近曲面作为设计轨迹的导动曲面,然后利用导动曲面与目标曲面之间的对应关系将设计轨迹投影到目标曲面。由于刀具轨迹需要事先在导动曲面上进行设计,很难直接推广应用于自由表面上的三维图案雕刻。

考虑到二维设计图案到三维曲面的映射,目前广泛应用于实际加工的等参数刀具轨迹的设计思想^[10-12],利用曲面方程将二维参数域的等参数线映射到三维曲面上作为刀具轨迹,可用于三维图案雕刻。基于这一考虑,CAN 等^[5]将设计图案缩放变换到目标曲面 $u-v$ 参数域的合适位置,然后利用曲面方程将设计图案映射到目标曲面,用于生成图案雕刻的刀具轨迹。该方法充分利用了参数域与三维曲面之间的映射关系,避免了繁琐的投影求交的迭代计算。然而,它却依赖于设计图案在曲面参数域上的处理以及曲面的映射方程,也很难用于描述实际工业产品的复合裁减曲面。为了解决这一问题,本文针对复合裁减表面上的三维图案雕刻展开论述,给出不依赖于曲面方程的二维平面域到三维曲面的映射方法,进而根据图案雕刻的加工特点,生成用于自由表面上复杂三维图案雕刻的刀具轨迹。

1 离散设计图案的获取

二维设计图案通常存储为 JPEG、BMP、TIFF 等图像处理格式,此类格式的设计图案并不能直接用于后续的数控加工。为了解决这一问题,本文采用图像处理中的边界提取技术将像素格式的设计图案转化为可用于刀具轨迹规划的离散点集。在边界提取过程中,直接调用 Matlab 中有关图像处理的库函数“edge”,利用 Canny 算子将设计图案转化为离散点图案,如图 1 所示。从图 1 中可以看到,经图像处理获得的离散边界并不十分光滑,可进一步采用 B 样条曲线对离散边界点进行拟合光滑,以样条曲线的采样点替代初始的离散边界。利用 Matlab 获取图像边界的基本程序图 2 所示。

图 1 离散图案的获取

```
img=imread(图片存储位置\文件名); %读取图片
imshow(img); %显示原始图片
im = rgb2gray (img); %将彩色图片转化为灰度图
edg = edge( im, 'canny'); %利用 Canny 算子提取边界
imshow(edg); %显示提取出的边界
[xx, yy] = find(edg==1); %将边界点存放到数组中
zz(1:size(xx,1),1) = 0; %z 坐标设置为 0;
new = [xx, yy, zz]; %三维数组存储点云坐标
save 文件名.txt -ASCII new; %数据保存
```

图 2 设计图案边界提取的程序代码

2 基于保角映射的目标曲面展平

为了生成用于图案雕刻的刀具轨迹,必须将二维设计图案的离散点集映射到目标曲面。对于单张参数曲面片而言,可简单地利用曲面的参数方程将变换到参数域上的设计图案映射到三维曲面。但受限于曲面片间的裁减、拼接操作,此方法并不适用于复合裁减曲面、网格曲面以及点云曲面。为了能够在表达实际工业产品模型的复合裁减曲面上雕刻出美观的设计图案,本文将采用广泛应用于图形学纹理映射领域的保角映射(Angle-based flattening, ABF)^[13-14]展平目标曲面,建立三维曲面与平面域之间的映射关系,进而以此映射为向导将设计图案逆映射到目标曲面。在利用 ABF 展平网格曲面之前,必须将目标曲面离散成三角网格曲面。这不仅仅是为了实现 ABF 保角映射的需要,也可为后续雕刻刀具轨迹的设计带来方便。在用户给定的逼近误差下,利用离散网格获得的刀具轨迹对采用直线插补的数控机床而言是完为全合适的^[15-17]。

假设 $\Delta = \{T_i, i = 0, 1, \dots, m; v_k, k = 0, 1, \dots, n\}$ 为目标曲面的逼近三角网格, v_k 为网格顶点, T_i 为组成

网格曲面的三角面片。在此网格曲面上, ABF 映射方法可以被认为是一种拥有自由边界的非线性参数化方法, 其本质是尽可能控制三角面片三个内角的变形最小, 优化目标函数为

$$F(\alpha) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^3 w_i^j (\alpha_i^j - \phi_i^j)^2 \quad (1)$$

式中, j 表示三角面片中三个角度的索引值, α_i^j 是未知的平面网格三角面片的角度, ϕ_i^j 是对应于 α_i^j 的优化角度值。 $w_i^j = (\phi_i^j)^{-2} > 0$ 为加权系数, 其基本反映了角度的相对变形量。 ϕ_i^j 可按式(2)计算

$$\phi_i^j = \begin{cases} \beta_i^{j(k)} \frac{2\pi}{\sum_i \beta_i^{j(k)}} & v_k \text{ 为内部顶点} \\ \beta_i^{j(k)} & v_k \text{ 为边界顶点} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\beta_i^{j(k)}$ 为空间三角面片 T_i 在顶点 v_k 处的角度。为了保证映射到平面后角度的有效性, 需要加入三个约束条件: ① $g_i^{(1)} \equiv \alpha_i^1 + \alpha_i^2 + \alpha_i^3 - \pi = 0$, $i = 0, 1, \dots, n$; ② $g_k^{(2)} \equiv \sum_i \alpha_i^{j(k)} - 2\pi = 0$, $k = 0, 1, \dots, m_{\text{int}}$; ③ $g_k^{(3)} \equiv \prod_i \sin(\alpha_i^{j(k)+1}) / \prod_i \sin(\alpha_i^{j(k)-1}) - 1 = 0$, $k = 0, 1, \dots, m_{\text{int}}$; 如果 $j(k) = 3$, 则 $j(k) + 1 = 1$; 如果 $j(k) = 1$, 则 $j(k) - 1 = 3$ 。

第一个约束条件保证映射后平面三角形的内角和为 π ; 第二个约束条件保证三角网格内部顶点的一环邻域角度之和为 2π ; 第三个约束条件保证两个三角形的公共边长度相等。考虑上述三个约束条件, 可建立如下的拉格朗日方程

$$F(\alpha) + \sum_{i=0}^n \lambda_i g_i^{(1)}(\alpha) + \sum_{k=0}^{m_{\text{int}}} \mu_k g_k^{(2)}(\alpha) + \sum_{k=0}^{m_{\text{int}}} \nu_k g_k^{(3)}(\alpha) \quad (3)$$

SHEFFER 等^[13]采用 Newton 迭代法求解上述方程的最优解。对于 Newton 迭代中所产生的稀疏线性方程系统, 可采用目前比较成熟的稀疏矩阵方程求解器如 UMFPACK、TAUCS 等进行求解。图 3 给出了一个利用 ABF 方法展平卷曲类曲面的例子。

3 设计图案到目标曲面的映射

利用 ABF 保角映射展平目标曲面, 就建立了三维曲面与二维平面网格之间的对应关系。现在, 就可以通过坐标变换将设计图案放置到平面网格上的理想位置, 进而利用平面网格到三维目标曲面的逆映射, 将设计图案映射到目标曲面上, 从而为后续图案雕刻刀具轨迹的生成奠定基础。

(a) 原始网格曲面渲染图

(b) 展平后的网格曲面

图 3 基于 ABF 的目标曲面展平

3.1 设计图案的坐标变换

为了将设计图案和平面网格显示在同一坐标系下, 应将设计图案的中心点与平面网格的中心点对齐。再根据设计图案的实际位置要求进行调整。首先对平面网格的顶点进行遍历, 得到平面网格的最小包围盒 $B_{\text{mesh}}[x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}]$, 包围盒的中心坐标为

$$\begin{cases} x_{\text{center}} = (x_{\max} + x_{\min})/2 \\ y_{\text{center}} = (y_{\max} + y_{\min})/2 \end{cases} \quad (4)$$

同样, 对设计图案的离散点集 $\{q_j\}$ 进行遍历, 得到其最小包围盒 $B_{\text{pattern}}[x'_{\min}, x'_{\max}] \times [y'_{\min}, y'_{\max}]$, 包围盒的中心坐标为

$$\begin{cases} x'_c = (x'_{\max} + x'_{\min})/2 \\ y'_c = (y'_{\max} + y'_{\min})/2 \end{cases} \quad (5)$$

根据方程式(4)、(5), 可得到设计图案的平移矢量为

$$\begin{cases} dx = x_c - x'_c \\ dy = y_c - y'_c \end{cases} \quad (6)$$

另外, 经离散后设计图案的尺寸大小有可能超出平面网格区域或不满足图案布置的要求, 有必要对其进行缩放变换确定其合适的尺寸, 缩放因子可按如下方程计算。

$$s_s = \lambda \min \left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}}, \frac{y_{\max} - y_{\min}}{y'_{\max} - y'_{\min}} \right) \quad (7)$$

式中, λ 反映了离散设计图案与平面网格的相对大小, 为了能在平面网格曲面上完整地显示图案, λ 一般取 0.5~0.8。此外, 如果设计图案的旋向不满足图案的布置要求, 在完成平移和缩放变换后, 可对设计图案进行绕 z 轴的旋转变换。

$$\mathbf{r}_r = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, θ 为绕 z 轴的旋转角度, 逆时针为正。经坐标变换后, 平面网格上的设计图案如图 4 所示。

图 4 平面网格上的设计图案

3.2 设计图案点所在三角面片的快速确定

坐标变换后设计图案的坐标真实反应了图案离散点在平面网格中的位置。为了将设计图案映射到目标曲面上, 需要首先在平面网格中找到每个图案点所在的三角面片, 然后根据空间三角面片与平面三角形面片的对应关系, 在空间三角面片内求出对应图案点的三维坐标。对于上述过程最为直观的算法执行是, 对于每一设计图案点 $\mathbf{q}_j$ 遍历平面网格的所有三角面片, 从中找到 $\mathbf{q}_j$ 所在的三角形。然而随着三角面片和图案点数量的增加, 上述算法的执行效率会迅速下降(时间复杂度为 $O(mn)$, m 为三角面片的数量, n 为图案点的数目)。为了加速算法的执行, 应首先搜索距离图案点 $\mathbf{q}_j$ 最近的网格顶点, 然后在该顶点一环邻接面确定 $\mathbf{q}_j$ 所在的三角形, 从而避免对所有三角面片的全搜索过程。为此, 本文采用区域分块的策略, 把图案数据点区域分成很多大小相同的正方形子区域, 并将所有网格顶点放入对应的正方形内。然后, 快速确定图片点所在的正方形区域, 通过缩小图案点最近网格顶点的搜索范围, 提高算法的搜索速度。

为了计算方便, 本文采用如图 5 所示的均匀网格划分方法。根据已经计算得到的平面网格的最小

包围盒 $B_m[x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}]$, 正方形网格的边长 L_s 可按式(9)计算

$$L_s = \alpha \sqrt{\frac{k}{n_p} (x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})} \quad (9)$$

式中, k 为每一正方形区域所要包含的平面网格顶点的数目; n_p 表示平面网格顶点的总数目; α 为标量因子, 用于调整正方形网格的尺寸。经试验分析, 对于不同疏密程度和不同拓扑结构的点云数据, k 的取值范围一般可为 6~12, α 的取值范围为 0.8~1.4。

图 5 平面网格的分割

于是, 可以得到正方形网格划分在 x 、 y 方向的分辨率

$$r_x = \text{int} \left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{L_s} \right) + 1 \quad r_y = \text{int} \left(\frac{y_{\max} - y_{\min}}{L_s} \right) + 1 \quad (10)$$

在实际的处理中, 考虑到计算机浮点数的表示精度, $x_{\max} - x_{\min}$ 和 $y_{\max} - y_{\min}$ 都被乘以一个比 1 稍大的数以保证位于最小包围盒边界上的数据点能落入其对应的正方形子空间中。至此, 包围盒 B_m 被分割成 $r_x \times r_y$ 个大小相等的正方形子空间, 再采用如下数据结构存储网格顶点

$$R[i][j] = \begin{cases} [i, j] \\ \{\mathbf{g}_i\} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $[i, j]$ 表示正方形子区域的索引; $\{\mathbf{g}_i\}$ 表示存储在该子区域中的平面网格顶点。上述数据结构建立完毕后, 就可以根据图案点 $\mathbf{q}_j(x_j, y_j)$ 的坐标计算其所在正方形子空间的索引, 即

$$i = \text{int} \left(\frac{x_j - x_{\min}}{L_s} \right) \quad j = \text{int} \left(\frac{y_j - y_{\min}}{L_s} \right) \quad (12)$$

然后, 在 $R[i][j]$ 所包含的网格顶点中搜索距离图案点 $\mathbf{q}_j$ 最近的网格顶点 $\mathbf{g}_i$, 再在 $\mathbf{g}_i$ 的一环邻接面中搜

索图案点 q_j 所在的三角形。

3.3 基于面积坐标的设计图案点到目标曲面的映射

如图 6 所示, 假设图案点 q_j 所在的平面三角形为 $\Delta_i^P(g_i, g_{i+1}, g_{i+2})$, 其对应的目标表面上的空间三角形为 $\Delta_i^S(v_i, v_{i+1}, v_{i+2})$, 则平面三角形 Δ_i^P 到空间三角形 Δ_i^S 的映射可以表示为

$$f_i(g_i, g_{i+1}, g_{i+2}) = (v_i, v_{i+1}, v_{i+2}) \quad (13)$$

于是, 可以得到

$$f_i = (v_i, v_{i+1}, v_{i+2})(g_i, g_{i+1}, g_{i+2})^{-1} \quad (14)$$

所有对应三角形之间映射的集合 $\{f_i\}$ 就构成了从平面网格到空间目标曲面的分段线性映射 $f: P \rightarrow S$ 。如果 f_i 是可逆的, 则 $f^{-1}: S \rightarrow P$ 就是从目标曲面到平面网格的逆映射。利用此种线性映射关系, 即可得到设计图案点 q_j 在目标表面上的对应点

$$p_j = f_i q_j$$

或

$$q_j = f_i^{-1} p_j \quad (15)$$

在实际的处理中, 本文给一种更为直观简单的基于面积坐标的线性映射方法, 用于将设计图案点映射到目标表面上。对于平面网格三角形 Δ_i^P 上的设计图案点 q_j , 其在目标表面上的对应点可按式(16)计算

$$p_j = A_1 v_i + A_2 v_{i+1} + A_3 v_{i+2} \quad (16)$$

式中, A_1, A_2, A_3 是 q_j 在平面三角形 Δ_i^P 中的面积坐标, 并且满足 $A_1 + A_2 + A_3 = 1$, 其中

$$A_1 = \frac{A(\Delta q_j g_{i+1} g_{i+2})}{A(\Delta g_i g_{i+1} g_{i+2})} \quad (17)$$

A_2 和 A_3 可类似定义。利用上述方法就可以将离散设计图案快速地映射到目标表面上, 如图 7 所示。

图 6 基于面积坐标的平面三角形到空间三角形的线性映射

4 图案雕刻刀具轨迹生成

经面积坐标映射得到的三维设计图案可由三轴或五轴数控机床进行雕刻加工。但应该注意, 当

图 7 目标表面上的设计图案

采用三轴数控机床加工时, 由于刀轴矢量固定不变, 图案的雕刻深度和刀轨痕迹会随着刀触点处曲面曲率的变化而变化, 如图 8a 所示。由于五轴数控机床增加了两个旋转自由度, 使得刀轴矢量可以随曲面法矢的变化而进行调整, 从而可以保证均匀的雕刻深度和雕刻痕迹, 得到更为美观的雕刻图案。为此, 本文采用五轴数控机床进行雕刻加工。与传统的自由曲面数控加工不同, 经坐标映射得到的设计图案点并不是雕刻刀具与目标曲面的接触点即刀触点, 实际的刀触点 p_{CC} 可按式(18)计算

$$p_{CC} = p - d_c n_p \quad (18)$$

式中, p 是三维设计图案点, d_c 为图案的雕刻深度, n_p 为图案点 p 处的曲面法矢量。在实际处理中, 法矢量 n_p 依然采用面积坐标对 p 所在三角面片三个顶点的法矢量进行加权平均

$$n_p = A_1 n_i + A_2 n_{i+1} + A_3 n_{i+2} \quad (19)$$

式中, $A_i, i=1,2,3$ 是三维图案点 p 在其所在的三角面片 Δ_i^S 中的面积坐标。

由于数控机床所能识别的刀具轨迹是刀具在空间运动的位置点, 也就是刀位点的轨迹。因此, 在获得刀触点后必须进行适当的刀具偏置, 生成刀位轨迹。为了能够同时方便地描述球头铣刀和平底铣刀, 本文采用如图 8b 所示的环形铣刀作为统一的雕刻刀具的描述模型。当 $r=0$ 时, 环形铣刀就简化为平底刀; 当 $R=r$ 时, 环形刀实际就成为球头刀。在实际的雕刻过程中, 如果简单地调整刀轴矢量与曲面法矢一致, 就会导致雕刻刀具底端的切削速度为零, 造成刀具过早失效。为了避免零速切削, 一般将刀具沿切削进给方向稍微旋转一较小的角度(如 5°), 此时, 对于一般的环形铣刀而言, 其刀位点的计算公式为

$$p_L = p_{CC} + r n_p + (R - r) \frac{(n_t \times n_p) \times n_t}{\| (n_t \times n_p) \times n_t \|} \quad (20)$$

(a) 三轴雕刻和五轴雕刻加工

(b) 刀具几何

图 8 三轴雕刻和五轴雕刻的比较以及刀具几何

式中, n_i 为刀轴矢量。图 9 为利用本文所提方法生成的三维图案雕刻轨迹。

图 9 利用本文方法生成的图案雕刻轨迹

5 仿真与试验

以 Visual C++ 为工具, 上述所有算法已经被编程实现。测试模型在 Unigraphics NX4.0 中构造, 并利用 UG/Imageware 网格生成器将参数曲面离散成为三角网格曲面。同时, 利用 Matlab 中的图像处理函数, 得到设计图案的离散数据点。在此基础上,

利用 ABF 方法展平目标曲面, 以此映射为向导, 利用提出的基于面积坐标的线性映射方法将二维设计图案快速的逆映射到目标曲面上, 进而根据所选择的刀具和切削深度, 生成用于图案雕刻的刀具轨迹, 并在图 10 所示图案和模型曲面上进行验证。图 10a 所示为卡通兔被雕刻到一回转曲面上, 从图中可以看到所生成的刀具轨迹能够在三维曲面雕刻出理想的设计图案。但应该注意, 对于回转曲面而言, 利用参数域映射的方法也可以实现设计图案到三维曲面的映射。为了进一步验证所提方法处理复合裁减曲面的有效性, 在鼠标模具模型上表面雕刻了蝴蝶图案, 如图 10b 所示。鼠标的上表面为典型的由多曲面片经裁减拼接操作而成的自由曲面。仿真结果显示, 所提方法能够处理复合裁减自由曲面上图案雕刻问题。

在五轴数控加工中心 DMG60T 上, 进行了实际的雕刻试验, 二维图案如图 11a 所示, 为毛笔字“远”。首先, 利用本文所提方法得到二维图案的离散表达, 进而将其映射到工件曲面上生成五轴雕刻轨迹。在雕刻加工中, 使用 $\phi 1 \text{ mm}$ 的球头铣刀, 数控机床的主轴转速为 $8\ 000 \text{ r/min}$, 进给速度为 400 mm/min 。所得雕刻结果如图 11b 所示。从实际的雕刻结果也可以看到, 所提出的自由曲面上三维图案的雕刻方法能够产生美观的雕刻图案。

(a)

(b)

图 10 自由曲面上图案雕刻的加工仿真

(a) 二维图案

(b) 雕刻结果

图 11 “远”字在曲面上的实际雕刻

6 结论

(1) 利用 ABF 方法展平目标曲面, 建立了三维曲面与二维平面之间的对应关系, 避免了设计图案到三维曲面的映射操作对目标曲面参数域处理及曲面方程映射的依赖。

(2) 由于所提方法仅使用了目标曲面的逼近网格, 它不仅限于参数自由曲面, 也可用于网格曲面, 甚至在鲁棒的三角化算法前提下也可用于点云曲面上的复杂三维图案雕刻。

(3) 基于区域分割的图案点所在三角面片的搜索算法, 有效地缩小了三角面片的搜索范围, 而基于面积坐标的线性映射方法, 更为直观简单, 避免了相对复杂的矩阵求逆运算, 提高了算法的效率。

(4) 所有的算法已经被编程实现, 并在不同类型的自由曲面进行验证, 仿真和试验的结果表明所提方法能够在自由曲面上雕刻出美观的三维图案。

参 考 文 献

- [1] CARMONA R M, JIMENO A, DAVIA M. Contour pocketing computation using mathematical morphology [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(3-4): 334-342.
- [2] DHANIK S, XIROUCHAKIS P. Contour parallel milling tool path generation for arbitrary pocket shape using a fast marching method [J]. Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(9-12): 1101-1111.
- [3] LASEMI A, XUE D Y, GU P H. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state of the review [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(7): 641-654.
- [4] MAKHANOV S S. Adaptable geometric patterns for five-axis machining: A survey [J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(9-12): 1167-1208.
- [5] CAN A, ÜNÜVAR A. Five-axis tool path generation for 3D curves created by projection on B-spline surfaces[J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9-12): 1047-1057.
- [6] CHOI B, JERARD R. Sculpture surface machining: Theory and applications[M]. Kluwer: Dordrecht, 1998.
- [7] PIEGL L A, TILLER W. Parametrization for surface fitting in reverse engineering[J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(8): 593-603.
- [8] PARK S C. Sculptured surface machining using triangular mesh slicing[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(3): 279-288.
- [9] KIM B H, CHOI B K. Guide surface based tool path generation in 3-axis milling: An extension of the guide plane method [J]. Computer-Aided Design, 2000, 32(3): 191-199.
- [10] LONEY G C, OZSOY T M. NC machining of free form surfaces [J]. Computer-Aided Design, 1987, 19(2): 85-90.
- [11] ELBER G, COHEN E. Tool path generation for freeform surface models [J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(6): 490-496.
- [12] SUN Y W, GUO D M, JIA Z Y, et al. Isoparametric tool path generation from triangular meshes for free-form surface machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(7-8): 721-726.
- [13] SHEFFER A, STURLER de A S E. Parameterization of faceted surfaces for meshing using angle-based flattening

[1] CARMONA R M, JIMENO A, DAVIA M. Contour pocketing computation using mathematical morphology

- [J]. Engineering with Computers, 2001, 17(3): 326-337.
- [14] SHEFFER A, LÉVY A, MOGILNITSKY M, et al. ABF++: Fast and robust angle based flattening [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(2): 311-330.
- [15] HWANG J S. Interference-free tool path generation in the NC machining of parametric compound surfaces [J]. Computer-Aided Design, 1992, 24(2): 667-676.
- [16] KISWANTO G, LAUWERS B, KRUTH J P. Gouging elimination through tool lifting in tool path generation for five-axis milling based on faceted models[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(3-4): 93-309.
- [17] CHEN T, SHI Z L. A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1-3): 259-263.

作者简介: 徐金亨(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为复杂曲面多轴数控加工理论、加工过程的动态建模与分析、复杂零件的三维测量及逆向重建。

E-mail: xujt@dlut.edu.cn

王顺可, 男, 1988 年出生。主要研究方向为复杂曲面数控加工。

张向奎, 男, 1976 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为汽车覆盖件设计与制造、车身及部件成形技术。

第 2 届上银优秀机械博士论文奖——银奖

准共光程干涉术之新式大尺度定位平台之研究

作者: 谢宏麟

毕业学校: 台湾大学

指导教师: 陈志臣、李朱育

本文提出一个以准共光程为架构, 可用以进行大行程位移运动的新型干涉仪式定位平台, 此干涉仪式位移平台包含一准共光程量测系统及一双伺服定位平台。

准共光程量测系统由一个外差光源、二维度的全像光栅、特制的半波片及锁相放大器等组件所组成。设计出两种不同形式的准共光程量测系统架构, 分别为单动式及差动式准共光程量测系统。其中, 差动式准共光程量测系统之灵敏度、分辨率及非线性相位误差均较单动式准共光程量测系统为佳。另外, 利用一维度及二维度的位移运动试验来验证所提出之准共光程量测系统的可行性及性能, 并分别将此系统之量测结果与商用电容式位移计、应变规、光学尺及干涉仪等仪器进行比对。由试验的结果可证明此准共光程量测系统拥有一维度长行程及二维度大面积的直线(度)与位移的量测能力, 并可同时维持高系统稳定性。

此外, 本研究将一微步进定位平台及一平板弹簧型式的压电致动平台结合在一起, 用以进行一维度及二维度的大行程精密定位。透过最佳化的设计方法, 提出了最适合此平板弹簧型式的压电致动平台的最佳化结构参数。

藉由结合此准共光程量测系统及双伺服定位平台, 本研究提出一以准共光程干涉仪为架构的精密定位系统, 此定位系统之分辨率及位移运动范围分别可达到奈米级及厘米级, 且同时具备极高之系统稳定性, 可使用于大行程定位之相关研究及应用。