

五轴数控系统的三维曲面激光加工关键技术

陈良辉¹ 赵盛宇² 周泳全^{1,2} 周逸²

¹深圳信息职业技术学院数字媒体学院, 广东 深圳 518172

²深圳市海目星激光科技有限公司, 广东 深圳 518110

摘要 在介绍了产品三维曲面激光打标、模具型腔激光蚀纹和激光直线成形(LDS)活化激光加工的需求背景下,描述了以三维激光振镜系统和两轴数控回转台而构成的五轴数控三维曲面激光技术的基本原理,阐述了二维(2D)矢量纹理的纹理映射技术方法,论述了适用于五轴数控加工的整体分割技术方法和五轴数控加工等关键技术。实验证明了该设备关键技术的可靠性和加工质量的优良性,既能进行大批量的曲面高效打标和LDS活化加工,也能进行模具蚀纹的精密精细加工。

关键词 光学制造; 五轴数控; 三维曲面; 激光加工; 纹理映射; 分割

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071406

Key Technologies of Laser Machining of 5-Axes CNC System for Three-Dimensional Freeform Surface

Chen Lianghui¹ Zhao shengyu² Zhou Yongquan^{1,2} Zhou Yi²

¹School of Digital Media, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518172, China

²Shenzhen Hymson Laser Co. Ltd, Shenzhen, Guangdong 518110, China

Abstract Under the introduction of background of demand pertaining to laser marking of three-dimensional (3D) freeform surface of product, laser texturing of mold cavity and laser direct structuring (LDS) of 3D-MID component, the principle of 3D freeform surface laser machining based on the 5-axes CNC system composed by both 3D laser galvanometer scanners and 2-axes CNC rotation table has been presented, the key technologies of texture mapping of two dimensional (2D) vector texture, the whole texture segmentation and 5-axes CNC machining, have been described. The experiments assure that the key technologies of the device is reliable, its machining quality is excellent. The device can laser mark and laser direct structure freeform surface in mass production efficiently, and can laser etch and texture mold cavity with accurate and fine performance.

Key words optical fabrication; 5-axes CNC; three dimensional freeform surface; laser machining; texture mapping; segmentation

OCIS codes 140.3460; 220.4000; 240.6700

1 引言

现代产品内外部零件,已越来越多地需求激光对其三维(3D)曲面进行加工^[1-3]。图1所示的在鼠标曲面进行的三维激光打标,在IT电子产品和可穿戴设备等领域均有强劲的需求;在手机外壳三维曲面进行的激光直接成形(LDS)激光活化加工,体现了3D-MID三维模塑互联器件的发展方向,使IT和消费类电子超多功能小型化日臻完善;在注塑模具型腔曲面进行的三维激光蚀纹,使三维纹理转印在注塑成型的塑料零件,则是欧洲国家模具制造业模具蚀刻的主流,已完全取代了污染严重的传统模具化学蚀纹工艺。

目前,除了三维任意曲面激光打标机在国内外鲜有报道外,从国外进口的模具型腔三维曲面的激光蚀纹加工设备和3D-MID三维模塑互联器件的LDS激光活化设备,已在国内市场崭露头角,国内已有几家企业仿制了LDS激光活化设备,但国内仍没有模具型腔三维曲面的激光蚀纹加工设备问世。研发的基于五轴激光数控的三维激光复合设备,集成了三维打标机、模具蚀纹机和LDS活化设备的功能,能完成三维曲面的激光加工。

收稿日期: 2015-01-27; 收到修改稿日期: 2015-04-10; 网络出版日期: 2015-06-26

基金项目: 广东省自然科学基金(S2013010015726)、深圳市科技计划(CXZZ20130321145942564)

作者简介: 陈良辉(1963—),男,硕士,讲师,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: chenliangh@sziit.edu.cn

*通信联系人。E-mail: bruce@hymson.com

2 三维曲面激光加工工作原理

图1是在三维曲面进行打标、模具蚀刻和LDS活化加工的样例。图2则揭示了三维曲面激光加工的原理。

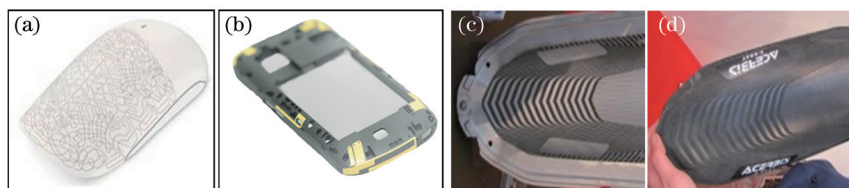


图1 三维曲面的激光加工。(a) 产品曲面打标; (b) 曲面LDS活化; (c) 模具型腔蚀纹; (d) 模具注塑零件

Fig.1 Laser machining of 3D freeform surface. (a) Product surface marking; (b) freeform surface LDS activation; (c) mold cavity erosion pattern; (d) injection molding parts

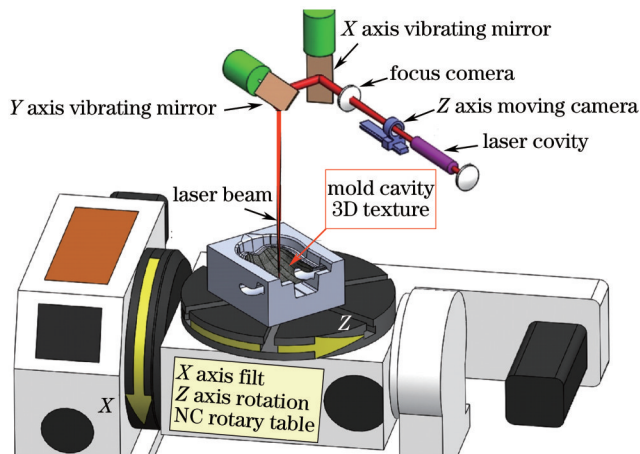


图2 五轴数控激光加工原理

Fig.2 5-axes CNC principle of laser machining

曲面的三维打标、模具曲面的蚀纹和3D-MID三维模塑互联器件的LDS激光活化加工,其共同的特点,均是将事先指定的文字、纹理、图案和图像(统称为纹理)等平面设计的信息,以纹理映射的方法,按指定的位置、朝向和大小,“帖”在三维曲面表面,获得相应的三维纹理数学模型。基于五轴数控的三维激光复合加工设备,可通过激光将该三维纹理数学模型加工在三维曲面对应位置。

欧洲某些先进国家的模具型腔三维曲面的激光蚀纹加工设备,是基于五轴数控机床的基础上开发的,对加工单个模具型腔零件非常适合,但这种依靠控制机械数控轴的运动方式,相对产品曲面打标和LDS活化加工等大批量生产而言,加工效率极低,成本居高不下,因此不宜采用。开发的三维激光复合加工设备,能兼顾单件生产和大批量生产的特点。以模具型腔的蚀纹蚀刻加工为例,阐述基于五轴数控的三维激光复合加工设备的结构及其工作原理。图2所示,激光束从激光腔体发出后,分别通过Z轴移动振镜和聚焦镜头,入射到X、Y两扫描振镜上。控制X、Y振镜反射镜的反射角度,可使激光束在X、Y两个方向进行扫描合成,从而达到激光束偏转的目的,使具有一定功率密度的激光聚焦点在模具型腔三维曲面上,按所指定的要求运动,并在曲面上留下永久的蚀刻标记(打标)。与二维(2D)激光振镜系统相比,除X、Y振镜外,三维激光振镜系统增加了Z轴移动振镜,构成了三轴的数控系统,可根据曲面被加工点的高度特征(Z轴坐标),自动调节激光的焦距,保持激光聚焦点正好落在三维曲面上。按预先设定的三维纹理数学模型,编辑和控制激光聚焦点在三维曲面的运动轨迹,就能实现了模具型腔三维曲面清晰、连续的蚀纹蚀刻加工。因三维激光振镜的工作角度一般为 $\pm 30^\circ$,因此在拔模角度较小的曲面部位,往往不处于振镜的加工区域,但增加一个数控回转台后,模具型腔通过X轴的倾斜旋转角度以及Z轴回转角度的数控调整,可以使这些拔模角度较小的曲面部位,也处于三维振镜的加工范围,这样,三维激光振镜的X、Y、Z三个移动轴和数控回转台的 \hat{X} 、 \hat{Z} 两个旋转轴,便构成了数控五轴分别是X、Y、Z、 \hat{X} 、 \hat{Z} 的三维激光复合加工设备。因数控回转台的 \hat{X} 、 \hat{Z} 两个旋转轴首先旋转到位,并不与三维激光振镜的X、Y、Z三个移动轴联动,因此不影响三维激光振镜的高速加工效率。

根据不同的加工要求,三维激光复合加工设备可以配置不同功率(5~30 W)的光纤红外激光器或紫外激光器。

3 纹理映射及其分割技术

纹理映射技术是计算机图形学的一个重要研究方向,在计算机图形和图像处理领域应用广泛^[4],但用于工业化制造领域却十分少见。与广义的纹理映射技术强调色彩和灰度渲染特点^[5-6]不同,面向五轴数控激光加工的纹理映射技术,注重的是将平面纹理的形状,按指定的尺寸比例、角度和朝向,准确无误地“贴”在被加工零件的三维曲面的指定位置^[7]。为达到此目的,实现被加工零件的三维曲面的参数化展开,是纹理映射技术的关键。

在三维激光加工(标识、蚀刻和LDS活化等)之前,需要确定激光在三维曲面的加工轨迹^[1-2,8],即最终通过激光加工而印记在三维表面上的纹理信息,这可以通过纹理映射的方法,求取三维纹理数学模型获得。目前国内外的大部分的三维激光标识设备,均是通过平面纹理投影到曲面后获得三维纹理数学模型的。图3左侧是将系列正六边形投影在鼠标外壳表面时生成的三维纹理,可以发现在高斯曲率较大的区域,存在严重的图案变形,这种现象在产品曲面的三维激光加工中,是绝对不能接受的。纹理映射技术在三维激光加工领域应运而生(图3右侧),通过该技术获得的高斯曲面的纹理,其变形程度,相对投影而言,得到了非常有效地控制,从而推动激光加工在三维打标、模具蚀纹和LDS活化领域的广泛应用。

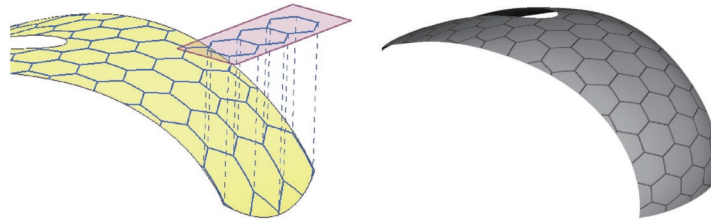


图3 通过投影和映射方法获得的三维正六边形纹理的比较

Fig.3 Comparison of 3D hexagon texture achieved by projection and mapping

在文献[6-7]成功开发纹理映射算法,并获得曲面网格的参数化结果之后,需要得到二维矢量图到曲面网格的映射。目前,处理的二维矢量图中仅包含线段作为基本图元。即二维矢量图可以表示为 $S = \{P, L\}$, 其中 $P = \{p_i, p_i \in R^2\}$, $L = \{l_i\}$ 分别代表图中二维点与线段的集合。最直观的方法是将 P 中的每个点映射到三维网格模型中,即:

$$v(p) = (v_a \ v_b \ v_c) \varphi(p), \quad (1)$$

式中 $\varphi(p)$ 是 p 点所落在的曲面参数化平面三角形 t_i 的质心坐标,它满足

$$\varphi(p) = \begin{pmatrix} u_a & u_b & u_c \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} p \\ 1 \end{pmatrix} = \bar{W}^{-1} \begin{pmatrix} p \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

而如果 p 不落在任何的参数化平面三角形内,即 $p_i \notin T$,则认为该点处对应的三维曲面坐标没有定义,记为 $v(p) = \Theta$ 。然而,直接用 $\{\varphi(P), L\}$ 作为得到的三维纹理数字模型可能带来不理想的效果。这主要有两个原因: 1) 对于矢量图中的某条线段 $l_i = (p_i, p_j)$, 可能存在 $p_i \notin T, p_j \in T$ 的情况,从而去掉 l_i 或者保留 l_i 都会使得到的三维纹理数字模型与给定矢量图不一致; 2) 如果矢量图中的某条线段 $l_i = (p_i, p_j)$ 对应于三维网格曲面中的一条曲线,仅仅将 p_i, p_j 映射到三维用直线连接将无法准确表达该曲线的形状。

为了解决上述问题,一个直观的方法是对 L 中的线段进行细分,当细分后的线段足够短时,就可以避免上述问题。但这样会生成大量不必要的点与线段,影响后续的加工效率。为了在不影响三维纹理网格模型效果的前提下,尽可能地简化模型,采用以下两种方法来解决上述问题:

1) 对于矢量图中的线段 $l_i = (p_i, p_j)$ 穿出 \bar{M} 的情况,计算出 l_i 与 \bar{M} 边界的交点 p , 取 $(p_i, p), (p, p_j)$ 中落在 \bar{M} 内的部分作为新的线段;

2) 对于矢量图中的线段 $l_i = (p_i, p_j)$ 对应 \bar{M} 上一条曲线的情况,沿 p_i, p_j 方向依次计算出 l_i 与 \bar{M} 中三角形的交点 p_k ($k=1, p_0=p_i$), 如果 $\varphi(p_{k-1}), \varphi(p_k)$ 对应的法向方向的角度差大于一定阈值,则保留 p_k , 并生成一条新的线段 $[\varphi(p_{k-1}), \varphi(p_k)]$, 否则抛弃 p_k , 继续处理下一个交点,相关结果如图5所示,左图为二维矢量纹理,右图为三维映射结果。

因三维激光振镜加工角度的限制,与 Z 轴夹角较小的某些三维曲面区域,不在加工区域内,因此必须把

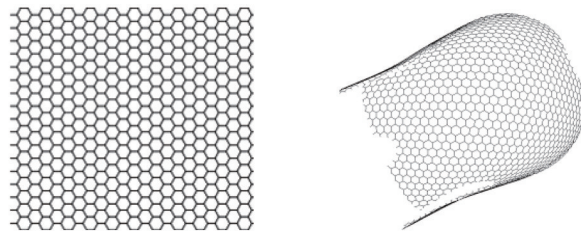


图4 矢量纹理的映射结果

Fig.4 Mapping result of vector texture

整体纹理进行分割,把与Z轴夹角较小的被分割的纹理,旋转到三维激光振镜能够加工的区域。图5(a)是原始的三维模型,图5(b)是纹理映射结果,图5(c)是三维整体纹理数学模型,图5是按加工要求而分割的4块纹理。图5(d)中的标示为②的被分割纹理,需要通过X和Z轴的相应旋转,使其处于三维激光振镜的加工区域,如图6所示。被分割的纹理中,不需要进行旋转的被分割纹理,称之为基准纹理(W_0)。图5(d)中的标示为①的被分割纹理,就是基准纹理。

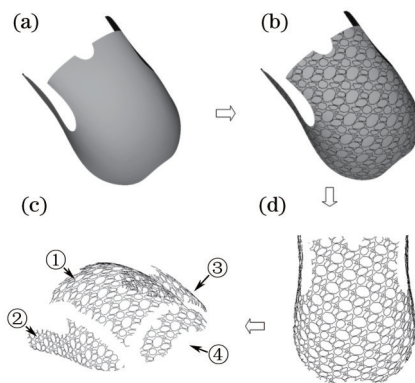


图5 整体纹理的生成与分割

Fig.5 Generation of whole texture and its segmentation

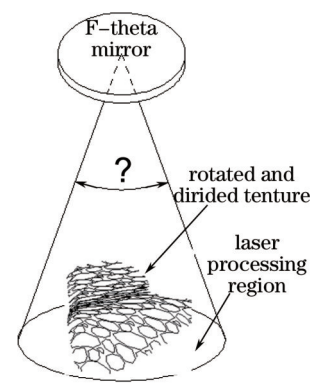


图6 被分割纹理的加工示意

Fig.6 Demo of laser machining of divided texture

整体纹理可分割为 $m+1$ 个剖分纹理,其中1为基准纹理剖分, m 是需要旋转加工的其他剖分纹理的个数。为了直接生成 $m+1$ 个剖分的纹理映射模型,在文献[6-7]开发的纹理映射算法的基础上,需要添加一些额外的纹理剖分步骤。首先用交互的方法选择在纹理上的分割位置。设用户将纹理分割成了 $A=\{a_i, |A|\in\{1,m\}\}$ 的小区域。那么区别于整体纹理映射中将整个平面纹理位图或矢量图转换为整个线段的集合 $S(P,L)$,将位图(矢量图)转化为基本剖分和 m 个剖分的线段集合,对于其中每一部分 $S_i(P,L)$ 有 $P=\{p_j, p_j \in a_i\}$ 。最后,只需将每一部分的线段分别以整体纹理映射的方法生成对应的纹理映射模型,即可获得 $m+1$ 个剖分纹理。

4 数控五轴激光加工

目前,国内外有多家企业提供技术比较成熟的三维激光振镜加工的驱动软件。在其提供的二次开发界

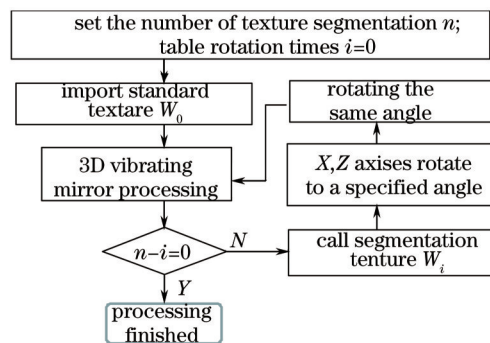


图7 数控五轴激光加工的工艺流程

Fig.7 Flowchart of 5-axes CNC laser machining

面中,增加了数控回转工作台的控制界面。在首先加工基准纹理之后,同步旋转数控回转台到指定的角度,启动三维激光振镜加工的驱动程序加工对应的被分割纹理。数控五轴激光加工的工艺流程如图7所示。

5 加工实验

图8所示的多台阶低压电器开关外壳的大批量打标,如使用平面激光打标机加工,需要制作7套夹具,进行7次打标,单件加工耗时3~4 min;而利用三维激光复合加工设备(内置光纤红外激光器)加工,无需制作夹具,数控回转台仅转动2次,加工时间仅50 s。

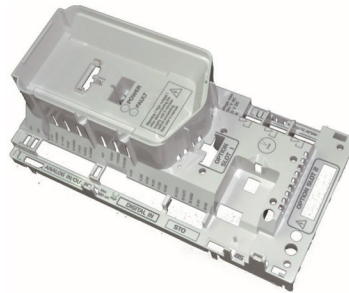


图8 多台阶面的开关电器外壳三维打标

Fig.8 3D laser marking of switch case

图9是三维激光复合加工设备(配置风冷式12 W紫外激光器)加工鼠标外壳的塑料注塑模具的型腔试验样品。在该型腔曲面分别加工了规则的正六边形纹理、皮纹和文字。

图10左侧是蚀刻后的正六边形线条的电荷耦合器件(CCD)检测镜像。为了检验激光光斑的大小,适当控制了光斑移动速度,以便分辨紫外激光光斑直径。检测结果显示,光斑直径为0.054 mm,也是正六边形的线条的宽度,线条加工均匀细致,这使配置紫外激光发生器的三维激光复合设备能够满足目前旺盛的模具精细的蚀纹蚀刻要求。



图9 鼠标模具型腔的激光蚀纹

Fig.9 Laser texturing of mouse mold cavity

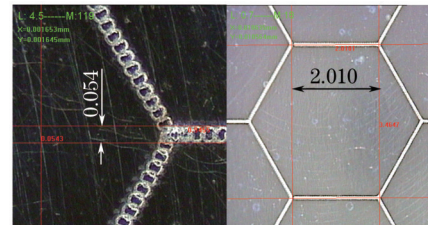


图10 激光光斑和加工纹理的CCD检测

Fig.10 CCD inspection of laser spot and etched texture

图10右侧是CCD投影仪对加工在图9模具型腔曲面的正六边形纹理的检测影像。通过对所有正六边形边长的检测,结果如表1所示。

表1 边长CCD检测结果

Table 1 CCD inspection result of side length

Design size	Maximum	Minimum	Average	Maximum deviation
2.000	2.05	1.98	2.009	2.5%

模具行业对曲面蚀纹的走样率要求^[8],通常不能大于5%,这种质量要求使传统的化学蚀纹工艺根本无法满足规则性纹理的加工需求,而上述系列正六边形纹理的激光加工,几乎从曲面的所有方向验证了纹理的变形程度,其最大走样率仅2.5%。

6 结论

随着五轴数控系统结构、纹理映射及其整体分割和五轴数控系统激光加工等关键技术的突破,基于五轴数控的三维激光复合加工设备能收到“一石三鸟”的效果,能进行产品任意三维曲面的激光数控打标,亦能进行模具型腔三维曲面的激光数控蚀纹,还能在LDS激光数控活化领域占有一席之地,是集五轴数控激光打标机、五轴数控模具型腔激光蚀纹机和LDS五轴数控激光活化设备于一体的数控复合设备。结果证明

该设备的关键技术可靠、加工质量优良,能够满足目前旺盛的三维曲面精密和精细的激光加工要求。

参 考 文 献

- 1 Wang C, Zeng X. Study of laser carving three dimensional structures on ceramics: Quality controlling and mechanisms[J]. Opt Laser Technol, 2007, 39(7): 1400-1405.
- 2 Henrikki P, Reino R, Jansson A. Advances in 3D laser processing in mold technology[C]. In Proceedings of the 25th International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics. ICALEO, 2006.
- 3 Gries D. Laser direct structuring creates 3D integrated circuit[J]. Laser Focus World, 2010, 46(10): 54-63.
- 5 Eugene Z, Konstantin M, Greg T. Feature-based surface parameterization and texture mapping[J]. ACM Trans Graph, 2005, 24(1): 1-27.
- 5 沈一帆, 徐 曼, 李宏宇, 等. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 152-170.
- 6 鲁安杰, 周泳全, 张松岭, 等. 三维激光打标机的纹理映射技术的研究[J]. 深圳信息职业技术大学学报, 2013, 11(1): 22-26.
- 7 Zhou Y Q, Zhang S L, Zhao S Y. Computer texture mapping for laser texturing of injection mold [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 681563.
- 8 Janez D, Drago B. Rapid and flexible laser marking and engraving of tilted and curved surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(2): 195-199.

栏目编辑: 张浩佳