

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0358-06

激光再制造中零件 3D 形貌重建的新型网格模型

刘美丽 杨洗陈 方 艳

(天津工业大学激光工程中心, 天津 300160)

摘要 逆向工程模型重建过程中在曲面和实体转换时常会出现曲面缝隙过大难以缝合成实体的情况,而且不同的造型软件系统精度不同,经常存在转换失败的现象,因此,在某些应用上用网格化模型代替实体模型能简化造型过程,获得较高的效率。获取高质量的三角网格模型是逆向重建的关键。但是目前空间点云数据得到的网格化模型的形状无法控制,细节特征表现也不足,不能很好地指导机器人加工,故在基于体算法的基础上提出了法矢量过滤法。实验证明,改进后的算法极大地提高了空间点云网格化的精度,能保证最终生成的三角网格与原型的拓扑结构一致,并能很好地用于激光再制造中指导机器人的加工。

关键词 激光技术;再制造;逆向工程;三角网格化;法矢量过滤

中图分类号 TN249;TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0358

A New Mesh Model for Reconstructing 3D Shape of Parts in Laser Remanufacturing

Liu Meili Yang Xichen Fang Yan

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract Since the difference between accuracy of modeling software, the conversions from surface to solid often fail in model reconstruction. Therefore, the replacement of the solid modeling by grid model can simplify process of surface models and obtain high efficiency in some applications. So high-quality triangular grid model is crucial in the reconstruction. However, the shape of the current grid model of points is not well controlled and lacks detailed characterization. Therefore a normal vector filter criteria on the basis of body algorithm is present in this paper. The experiment proves that improved algorithm greatly enhances the precision of space point cloud mesh. That method guarantees that final triangular mesh has the same topology as the prototype, which can be well used for laser remanufacture to guide the robot processing.

Key words laser technique; remanufacturing; reverse engineering; triangular mesh; normal vector filter

1 引 言

随着激光再制造技术和机器人技术的发展,自动化、智能化已经成为激光再制造技术的发展方向,激光修复再制造机器人也已成为下一代激光加工机器人发展的主攻方向。激光机器人再制造技术是一种先进的现场修复手段^[1],它是集激光技术、光电检测技术、先进数控和计算机技术和 CAD/CAM 技术为一体的^[2],主要包括激光扫描得到零件的点云数据,

利用逆向工程重建零件的三维模型,以此进行路径规划生成机器人的运动轨迹,编译生成机器人可执行的文件,下载程序到机器人中运行完成零件的加工。

要实现机器人对零件的精确加工,逆向三维模型重建是特别重要的^[3]。逆向工程模型重建一般是先构建曲面,根据实际需要才转化成实体模型,但是由于数据需要在不同的软件之间进行传输,而且不同的软件系统精度不同,经常存在不能转换的区域

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(60478004)和天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)资助课题。

作者简介: 刘美丽(1984—),女,硕士研究生,主要从事逆向工程方面的研究。E-mail: liumeili913@gmail.com

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com(通信联系人)

和转换失败的现象,可能会导致实体转换不能完成重建的现象。所以在某些工程应用上,用网格化模型代替实体模型来指导机器人的加工可以实现较高的效率,但是目前很多三角剖分的算法都是针对平面三角剖分的,如何将空间点云三角化一直是个难点,对它的研究很不成熟,还没达到实用化的程度。

本文针对以上遇到的问题,在基于体的算法基础上提出了法矢量过滤法,该方法可以保证所生成三角网格的拓扑和原型的拓扑结构保持一致,提高了三角网格化的精度,实验证明该方法具有很强的

实用性,可以很好地指导机器人加工。

2 三维重建原理和试验方法

采用 Handyscan 3D 激光扫描仪扫描获取点云数据,手持式 Handyscan 3D 扫描仪通过一根 FireWire(火线)电缆与计算机相连接,可以非常容易、快速、高质量地完成扫描工作,该扫描仪的扫描速度为 18000 s^{-1} ,扫描精度为 $50\text{ }\mu\text{m}$,Z 轴分辨率为 0.1 mm ,扫描过程如图 1 所示。

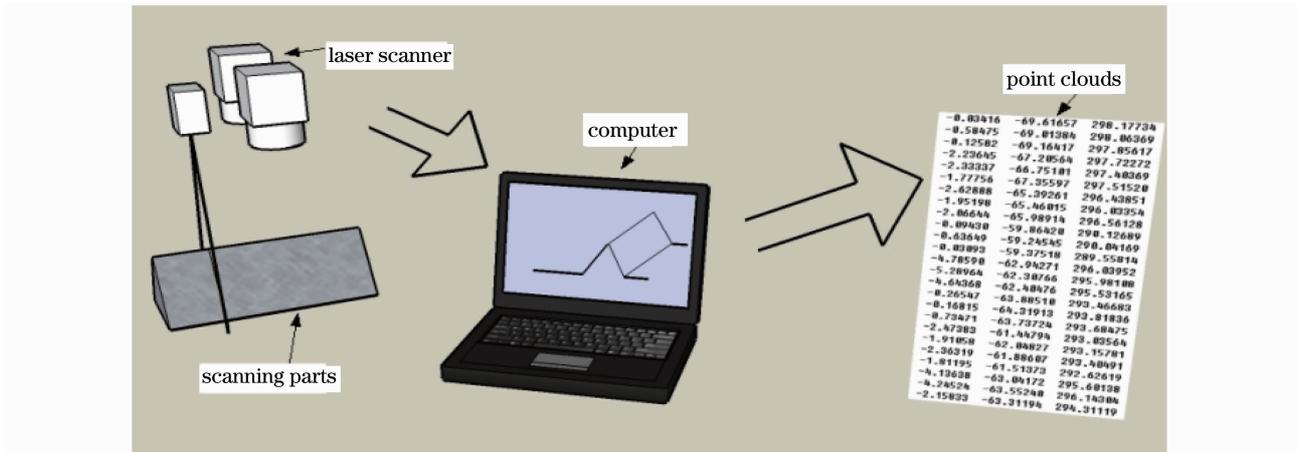


图 1 激光扫描示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser scanning

三维网格模型重建首先由 Handyscan 3D 激光扫描仪扫描铸件获取点云数据;由于所获取的是海量的散乱数据,需要对其进行排序去噪等数据处理;

对处理完的数据进行三角剖分和网格优化^[4];最后得到和原型拓扑结构一致并可以在计算机上显示的三维特征网格模型,具体的流程如图 2 所示。

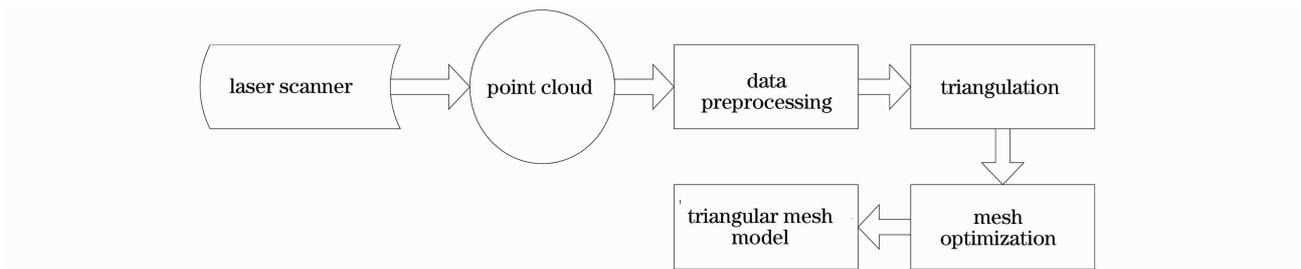


图 2 三角网格模型建立流程图

Fig.2 Flow chart of triangular mesh

3 三维网格模型建立

3.1 点云数据处理

由于环境等因素的影响,获得的点云数据存在噪声,所以在进行三角网格化之前要对点云数据进行去噪处理,用 Matlab 中的 smooth 函数^[5]来实现中值、均值和高斯三种形式的滤波,具体的形式为

$$Y = \text{smooth}(y, \text{span}, \text{method}), \quad (1)$$

式中 y 为输入的点云数据, Y 为滤波后的点云数据,

span 为需要滤波的步长。 method 为选择的滤波方式, moving (均值滤波)和 median (中值滤波)很好地消除了环境等原因造成的噪声,而 Gaussian (高斯滤波)很好地保持了点云的细节特征。

3.2 三角剖分

三角网格化模型建立的关键是三角剖分算法^[6],三角剖分的目的是将各数据点之间以三角形相互连接,形成一张互不重叠的三角形网格,用该

三角网格来表示点集形成的曲面,三角形的集合即为该曲面的三角剖分,实质是以三角网格反映数据点与其邻近点之间的拓扑连接关系,而正确的拓扑连接关系将有效地揭示点集所蕴涵的原始物体表面的形状和拓扑关系。基于 delaunay 三角剖分原理建立三维网格^[7],delaunay 三角剖分是一种较合理的三角剖分,可以方便地描述散乱数据点集之间的邻近关系,并且数据结构较为简单。这种三角剖分总是尽可能避免“狭长”三角形的出现,自动向等边三角形靠近,使得各个散乱数据点对整个数据场的影响尽可能局部化与平均化,是一种优化的三角剖分,图 3 为数据点集 delaunay 三角剖分及 voronoi 图。

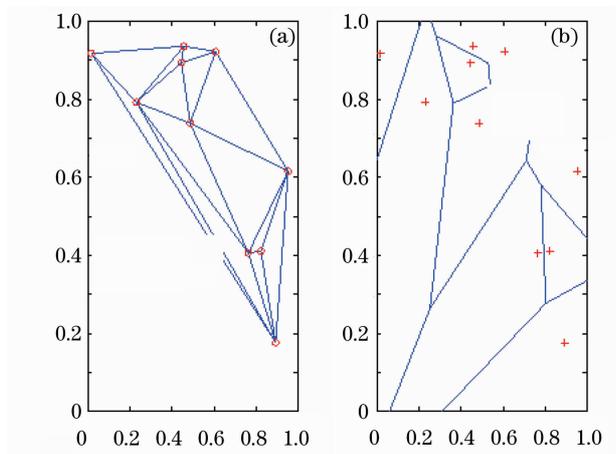


图 3 (a) delaunay 三角网格图, (b) voronoi 图

Fig. 3 (a) Meshes diagram of delaunay triangular, (b) voronoi diagram

采用 delaunay 方法来对空间的点云数据进行剖分,空间三角剖分是用基于体的方法对点云数据进行三角剖分,在空间中对数据点做四面体网格三角剖分,得到一个包含所有数据点的凸包,如果此凸包内无数据点,则凸包面上的三角网格便是曲面上数据点三角剖分网格,如果所得到的凸包内存在数据点,则需要从凸包面开始删除部分四面体,以保证四面体网格拓扑关系不变的情况下,所有的点均为四面体网格边界三角网格上的顶点,此时四面体网格的边界的三角网格为点云数据的三角剖分网格^[8]。

3.3 法向量过滤

在完成初始三角网格创建时,会出现很多不合理的三角剖分,为了使生成的三角网格模型拓扑结构正确,利用法向量进行过滤,使三角网格整体上尽量均匀,没有任何点被遗漏也尽量没有冗余。主要的算法思想是首先遍历所有生成的三角形的索引,

通过标记公共的顶点也就是寻找具有相同边的三角形,把具有相同边的相邻三角形存入数组,利用计算两个三角面之间的法矢量的夹角来确定阈值,通过设定合适的阈值,把具有相同顶点的不同三角面的法矢量方向与整个三角外形为中心偏向来对三角网格进行优化,删除明显偏离中心的法矢量的三角面,并且利用外接球准则对过滤的三角网格模型进行优化,通过法向量过滤方法可以很好地保持与原有模型的拓扑结构一致,三角网格模型的法向量的计算如图 4 所示。

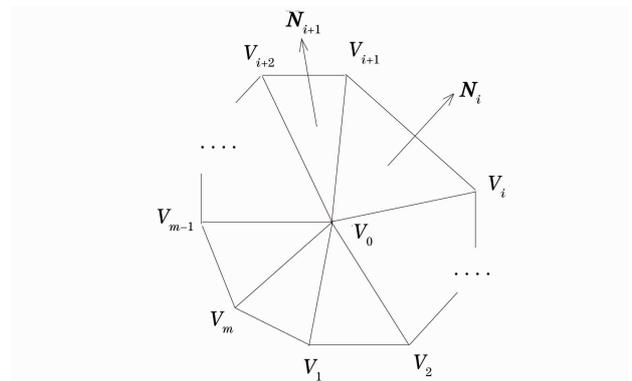


图 4 三角网格图的法矢图

Fig. 4 Normal vector map of triangular grid

设在点 V_0 周围有 m 个点 $V_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 与之相邻, m 个三角形所在的各方面有 m 个单位法矢 $\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2, \mathbf{N}_3, \dots, \mathbf{N}_m$, 由 V_0, V_i, V_{i+1} 所组成的三角形的法矢为^[8]

$$\mathbf{N}_i = \frac{(V_i - V_0) \times (V_{i+1} - V_0)}{\|(V_i - V_0) \times (V_{i+1} - V_0)\|}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (5)$$

由 V_0, V_i, V_{i+1} 所组成的三角形的面积为

$$S_i = \frac{\|(V_i - V_0) \times (V_{i+1} - V_0)\|}{2}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (3)$$

加权平均后, V_0 点处的法矢为

$$\mathbf{N}_{V_0} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i \mathbf{N}_i}{\sum_{i=1}^m S_i}. \quad (4)$$

4 实验结果及分析

由 Handyscan 3D 激光扫描仪扫描获取铸件的点云数据,为了使三角网格模型的处理过程更加清晰,截取了部分铸件的点数据进行实验。

1) 导入铸件的点云数据

如图 5 所示,导入铸件的点云数据的数目为

17290 个,分别是在扫描仪中所测得的铸件的三维坐标,图 5(b)所示的 1,2,3 列分别是点云数据在绝

对坐标系中的 x,y,z 坐标的值。

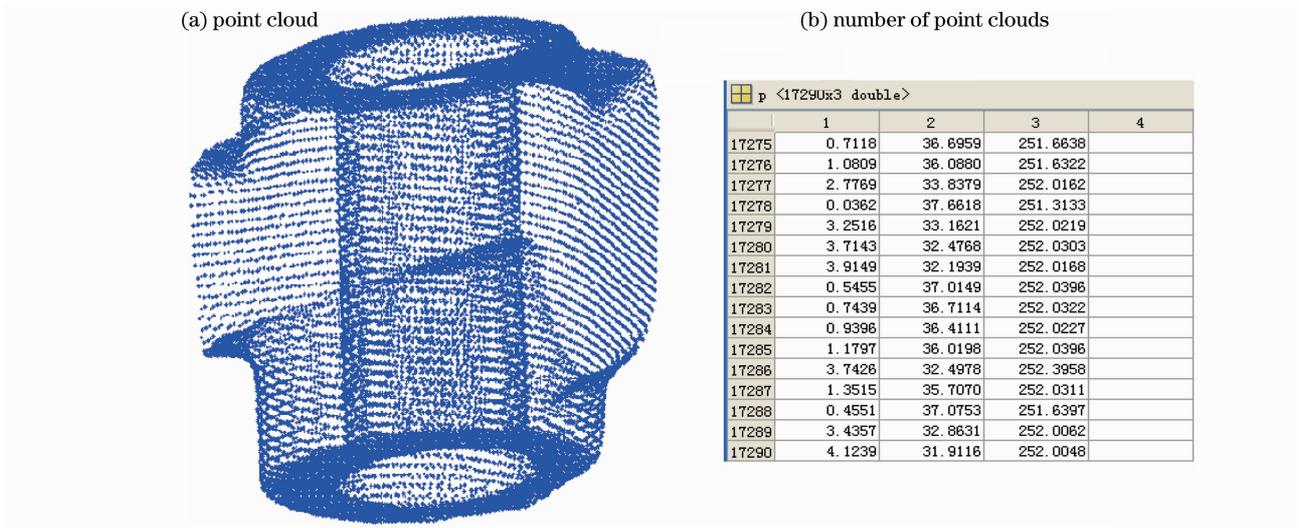


图 5 点云数据
Fig. 5 Point clouds

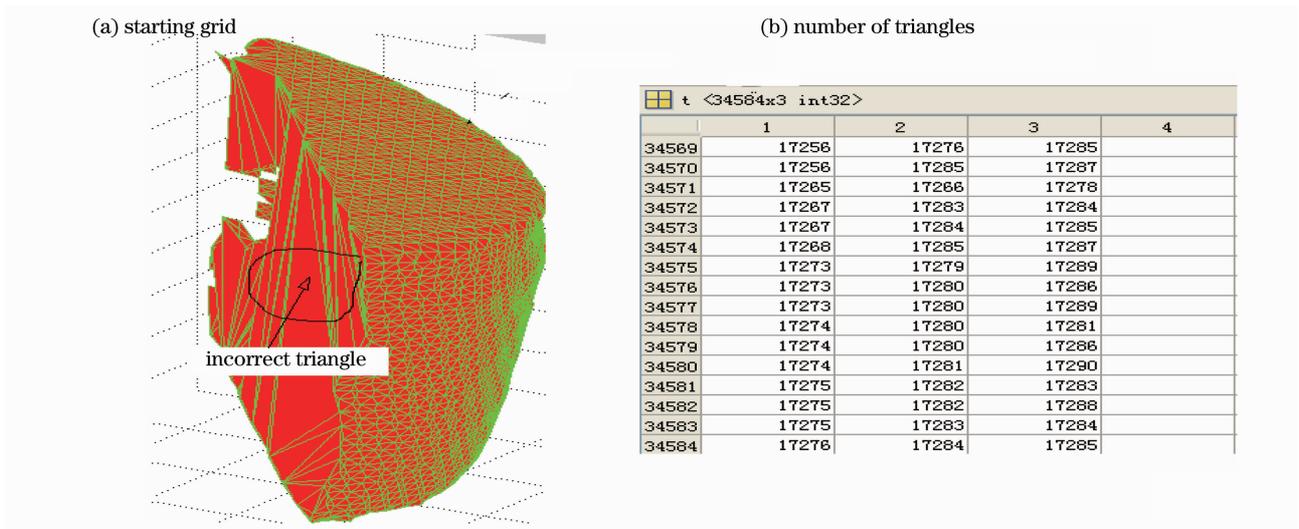


图 6 delaunay 初始三角网格模型
Fig. 6 Mesh model of the initial delaunay triangular

2) delaunay 建立三角网格模型

采用 delaunay 对铸件的点云数据进行三角剖分,初始生成 34584 个三角面,如图 6 所示,图中黑色区域标记的为拓扑结构不正确的三角面,图 6(b)中产生 3 列数据,1,2,3 列数据分别是点云数据的 ID(身份号),如图 7 所示,每三个点云构成一个三角面,图 7 中的 1,2,3,4,5 分别是点云数据的 ID,利用 ID 可以明确地定位三角面的位置。

3) 法矢量过滤

从图 8 中可以看出每个三角面的中心都存在一个中心方向向外的法矢量,从图 8(b)可以看出拓扑结构不正确的相邻三角面的法矢量夹角是很大的,

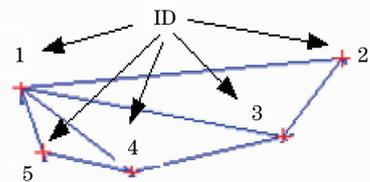


图 7 三角面的 ID
Fig. 7 ID of triangles

该算法是遍历所有的三角面数据,指定起始的搜索顶点,例如图 9 所示,tri_temp 中的数据为公共顶点的三角形,而 tri_temp1 中为相邻边的三角形,求出相邻法矢量的夹角,设定阈值范围,删除不满足阈值条件与点云拓扑结构不一致的三角形。

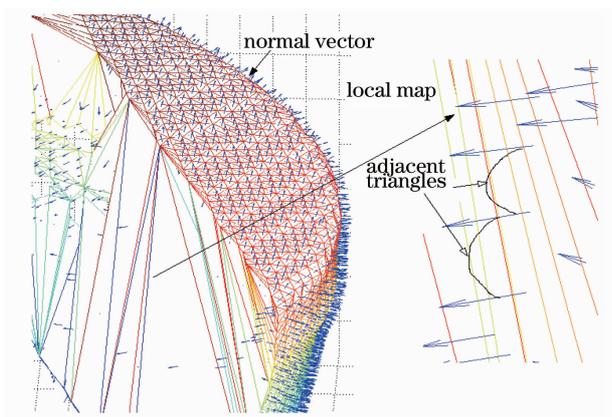


图 8 起始的三角网格的法矢图
Fig. 8 Initial normal vector map of triangular mesh

(a) triangles with adjacent points tri_temp=			(b) triangles meeting the threshold condition		
1	2	3			
1	2	5			
1	3	13			
1	4	5			
1	4	17			
1	13	16	1	2	5
1	16	17	1	4	5

图 9 实验数据

Fig. 9 Experimental data

经过法向量法过滤,如图 10 所示,最后得到满足阈值条件的三角形共有 34324 个,对比图 6,10 可以看出共删除 260 个不满足条件的三角形,形成了与点云拓扑结构一致的三角面,从图 11 的三角面的法矢量来看,所有相邻三角面的夹角都在阈值范围之内。最终的实验结果如图 12 所示。

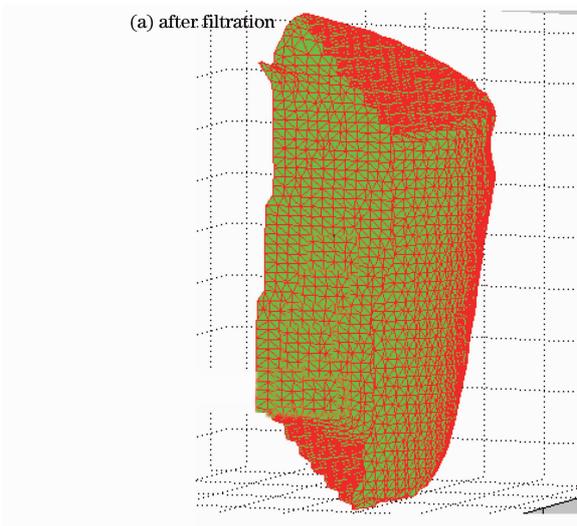


图 10 正确拓扑结构的三角网格
Fig. 10 Correct triangle topology

(b) number of triangles

tri <34324x3 int32>				
	1	2	3	4
34309	17256	17276	17285	
34310	17256	17285	17287	
34311	17285	17286	17278	
34312	17267	17283	17284	
34313	17267	17284	17285	
34314	17268	17285	17287	
34315	17273	17279	17289	
34316	17273	17280	17286	
34317	17273	17280	17289	
34318	17274	17280	17281	
34319	17274	17280	17286	
34320	17274	17281	17290	
34321	17275	17282	17283	
34322	17275	17282	17288	
34323	17275	17283	17284	
34324	17276	17284	17285	

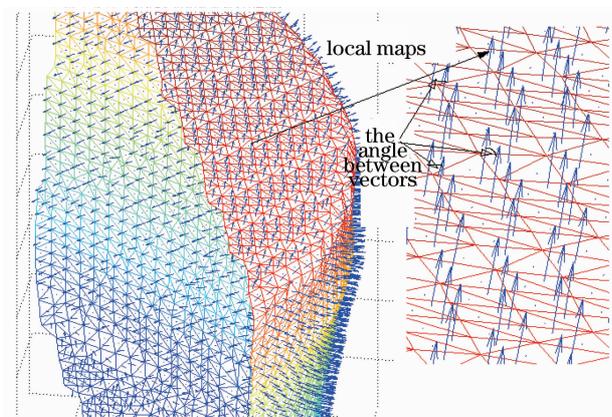


图 11 最终的三角网格的法矢图
Fig. 11 Final normal vector map of triangular mesh

5 结 论

在基于体的算法的基础上利用法向量过滤法很好地完成了点云数据的三角模型的建立,通过实验证明该方法建立的三角网格均匀,并且保证三角网格拓扑结构的正确性,精度高。三角网格模型是激光再制造机器系统中逆向工程的关键部分,在后续的激光机器人加工中可以根据三角网格模型的法向量来直接确定机器人加工时的姿态,这样可以节省实体造型的时间,提高工作效率。

参 考 文 献

1 Yang Xichen, Li Huishan. Laser re-manufacturing technology and industrial application [J]. *China Surface Engineering*, 2003, 16(4): 43~46

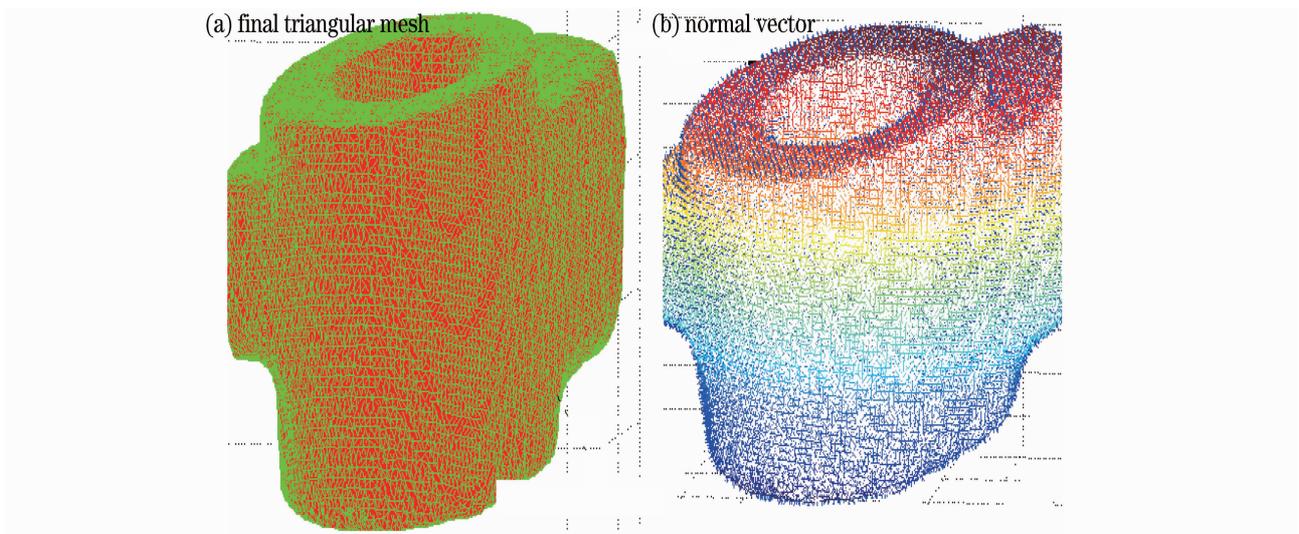


图 12 完整的三角网格模型
Fig. 12 Complete triangular mesh model

- 杨洗陈, 李会山. 激光再制造技术及其工业应用[J]. 中国表面工程, 2003, **16**(4): 43~46
- 2 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 3 Jin Tao. Tong Shuiguang. Reverse Engineering Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. 8
- 金涛, 童水光. 逆向工程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 8
- 4 Chen Wenlin, Wang Jian, Li Xuguang *et al.*. Reverse modeling of shell part[J]. *Mechanical Engineer*, 2009, (2): 91~93
- 陈文琳, 王荐, 李旭光等. 壳体零件反向建模[J]. 机械工程师, 2009, (2): 91~93
- 5 Dong Changhong. Matlab Image Processing and Applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. 1
- 董长虹. Matlab 图像处理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 1
- 6 Sun Jin, Li Yaoming. Development in key technologies of reverse engineering[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, **43**(1): 5~7
- 孙进, 李耀明. 逆向工程的关键技术及其研究[J]. 航空精密制造技术, 2007, **43**(1): 5~7
- 7 Zhang Defeng. Digital Image Processing Using Matlab [M]. Beijing: China Machine Press, 2009
- 张德丰. 数字图像处理 Matlab 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009
- 8 Zhu Xinxiong. Free Curves and Surfaces Modeling Technology [M]. Beijing: Science Press, 2000
- 朱心雄. 自由曲线曲面造型技[M]. 北京: 科学技术出版社, 2000