

文章编号: 1001-3806(2011)06-0734-04

## 实体材料的激光3维雕刻射线算法研究

桑玉蕾, 刘晓东\*, 刘榴, 黄中琨

(华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

**摘要:** 为了解决硬质材料的3维深雕问题,在充分分析3维图像空间遮挡关系的基础上,提出一种用激光在实体材料上雕刻真正3维图形的新算法。首先利用盒子算法,使3维空间图像对应一个空间大盒子,再利用平行于z轴的射线射切三角片,得到一种3维模型文件格式(STL)完备的包络点,同时,把点归一化到空间小盒子,并置位对应的被遮挡的小盒子列,从而得到STL实体雕刻数据。该算法已经应用于激光3维雕刻系统,处理一个面片数目为130000片量级的STL 3维文件,尺寸268mm×422mm×253mm,算法仅耗时2s~5s。结果表明,该算法实用高效。

**关键词:** 激光技术; STL; 盒子算法; 射线算法

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.003

### Study on 3-D carving ray algorithm for laser ablation of solid material

SANG Yu-lei, LIU Xiao-dong, LIU Liu, HUANG Zhong-kun

(National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to carve 3-D deep images on hard material, after analyzing the relationship of 3-D image space shading, a new algorithm was put forward for carving real 3-D images on solid material by means of laser ablation. At first, the 3-D image was mapped to a big space box based on the box algorithm. Then complete envelope points of STL (stereo lithography, a 3-D model file format) can be obtained with rays parallel to the z-axis intersecting the STL triangular facets. At the same time, by normalizing the points to the small space boxes and marking the corresponding small shaded space boxes, the data for carving solid material were obtained. The algorithm was used in a 3-D laser carving system to deal with a STL in 268mm×422mm×253mm including 130000 facets, it took 2s~5s. The results show that the algorithm is practical and efficient.

**Key words:** laser technique; STL; box algorithm; ray algorithm

## 引言

激光雕刻技术目前多应用于激光标刻,国内主要是以2维平面标刻为主。传统的3维雕刻主要是机械雕刻和手工雕刻,实体材料的激光3维深雕鲜有报道,只有少数的研究机构在做初步的研究。国外对于激光3维深雕的研究有一定进展,有设备商已经开发出激光3维深雕系统并应用,如加拿大VIRTEK公司研制的FOBA-G-SERIES,目前主要应用在模具雕刻行业,设备价格昂贵。国内有些企业声称已经开发出激光3

维深雕设备,能够完成实体材料3维深雕,但仅是简单的坡度雕刻,立体感不够强,是伪3维。国内报道可以完成真正3维深雕图像的专业文献很少,偶有给出雕刻实例的,其图像也相对简单<sup>[1]</sup>,实体材料单一,加工方向受限<sup>[2]</sup>。本文中提出的射线算法,能在多种实体材料(大理石、铝材、铸铁等)上雕刻复杂的3维图像,并可通过变换射线与图像的角度,展现3维图像不同的角度,无加工盲区。

## 1 算法原理

### 1.1 盒子算法

无论系统选择何种扫描方式,激光标刻处理的对象都是一幅1/0二值点阵图像<sup>[3]</sup>。3维深雕由一层的2维标刻形成,据此,3维深雕需要的数据形式就是2维标刻数据的一层层叠加,如图1a所示。一般可以把此数据形式看作一个“大盒子”,“大盒子”内栅格化成一个一个的“小盒子”,如图1b所示。

基金项目:广东省教育部产学研结合项目资助项目(2006D90304014)

作者简介:桑玉蕾(1986-),女,硕士研究生,现主要从事激光先进加工技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: lxdwuhuan888@163.com

收稿日期:2011-03-18;收到修改稿日期:2011-04-12

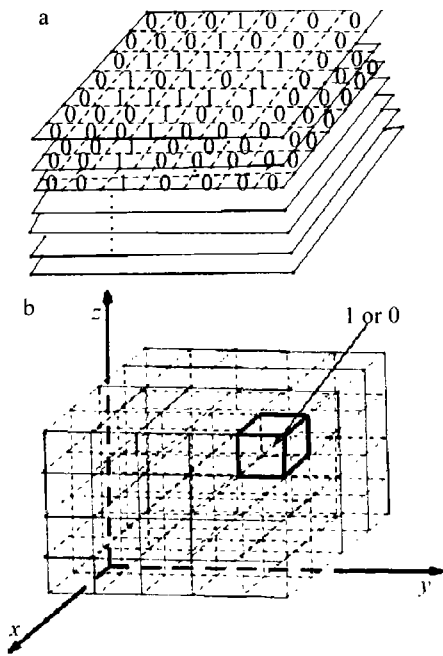


Fig. 1 Box-structure

该盒子化方式,一方面对应了3维深雕所需的数据形式,另一方面很好地解决了空间遮挡的难题。

### 1.2 射线算法

射线算法的原理:从某一个方向,产生平行于该方向的一族射线,让这一族射线穿透3维模型文件格式(stereo lithography, STL)3维实体,会得到一系列的交点<sup>[4,5]</sup>;控制好射线的密度,再结合盒子算法,即可得到所需的数据。由于STL 3维实体是用很多小三角面片来逼近3维实体的,拥有完备的包络面,从而得到的一系列交点也是一族完备的点云数据。下面以一个简单的三棱锥来说明思路。以z轴面向为例,在STL 3维实体对应的大盒子的x-y平面上,产生一族平行于z轴的射线,见图2。射线射切STL得到完备的三棱锥包络点,见图3。将包络点归一化到对应小盒子,并置位相应小盒子纵列。从原理的表述中可知,射线算法把获取3维信息点的问题转化成为空间直线与空间三角形的求交运算。

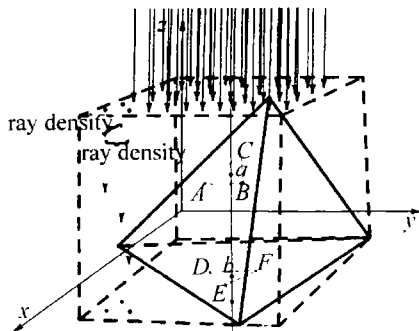


Fig. 2 Process of rays intersecting the STL facets

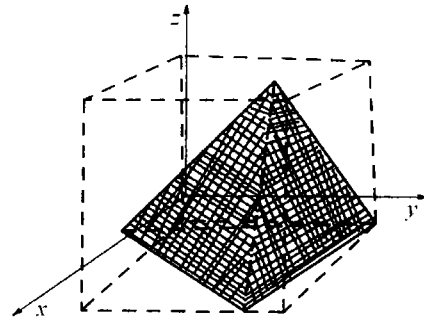


Fig. 3 Envelope points of STL

### 1.3 射线与三角面片的相交判定

如图4所示,射线与空间三角形存在3种位置关系:射线和三角形交于三角形的棱边,见图中p点;两者交于三角形内部,见图中q点所示;两者不相交,见图中射线l。

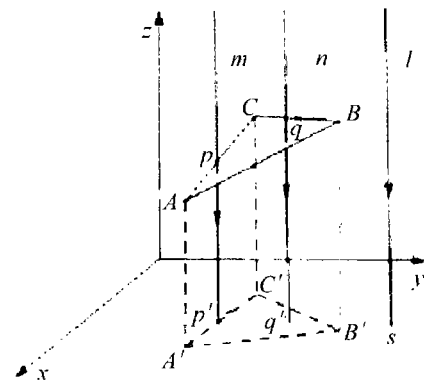


Fig. 4 Position relation between rays and triangular faces

由图中点 $p', q', s$ 和三角形 $A'B'C'$ 的位置关系可以发现,其与点 $p, q, l$ 和三角形 $ABC$ 的位置关系是一一对应的。所以,可以运用投影法来判定射线和空间三角形的位置关系,将其转化为射线投影点与三角形投影面的位置关系判定,即最终转化为一个点是否在三角形的内部、边上或外部的问题。

判断一个点与平面三角形的位置关系,可以运用叉乘的方法:顺着三角形的边,按顺时针(或者逆时针)的方向走,利用叉乘来判断,如果这个点在三角形的每条边的右边(或者左边)时,说明这个点在此三角形的内部,否则,说明这个点在此三角形的外部。如图5所示。

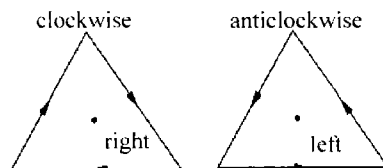


Fig. 5 Track along the triangles

假设 $\Delta V_1 V_2 V_3$ 是待判断的空间三角形的投影三角形,点O是射线的投影点,如图6所示。具体的判别过程描述如下。

(1) 分别求出各个向量:  $\vec{V}_1\vec{O}$ ,  $\vec{V}_1\vec{V}_2$ ,  $\vec{V}_2\vec{O}$ ,  $\vec{V}_2\vec{V}_3$ ,  $\vec{V}_3\vec{O}$ ,  $\vec{V}_3\vec{V}_1$ 。

如  $\vec{V}_2\vec{O} = (O_x - V_{2x})\vec{x} + (O_y - V_{2y})\vec{y}$ ,  $\vec{V}_3\vec{V}_1 = (V_{1x} - V_{3x})\vec{x} + (V_{1y} - V_{3y})\vec{y}$ , 其余类似。

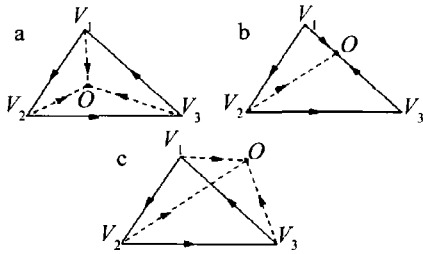


Fig. 6 Cross product discrimination

(2) 计算  $\vec{V}_1\vec{O} \times \vec{V}_1\vec{V}_2$ ,  $\vec{V}_2\vec{O} \times \vec{V}_2\vec{V}_3$ ,  $\vec{V}_3\vec{O} \times \vec{V}_3\vec{V}_1$ , 其中“ $\times$ ”表示叉乘。如  $\vec{V}_3\vec{O} \times \vec{V}_3\vec{V}_1 = (O_x - V_{3x})(V_{1y} - V_{3y}) - (O_y - V_{3y})(V_{1x} - V_{3x})$ 。

(3) 判断叉乘的值。规定以下叉乘结果大于0, 表示方向是正方向; 小于0表示是反方向; 等于0表示做叉乘的两矢量同向或者反向, 即重合。

(a) 若  $\vec{V}_1\vec{O} \times \vec{V}_1\vec{V}_2 > 0$ ,  $\vec{V}_2\vec{O} \times \vec{V}_2\vec{V}_3 > 0$ ,  $\vec{V}_3\vec{O} \times \vec{V}_3\vec{V}_1 > 0$  或者  $\vec{V}_1\vec{O} \times \vec{V}_1\vec{V}_2 < 0$ ,  $\vec{V}_2\vec{O} \times \vec{V}_2\vec{V}_3 < 0$ ,  $\vec{V}_3\vec{O} \times \vec{V}_3\vec{V}_1 < 0$ , 即3个叉乘值同号, 则说明点O在三角形每条边的同一侧, 从而说明点O在三角形内部, 如图6a所示。

(b) 若其中一个叉乘值为0, 而另外两个同号(同为正, 或者同为负), 则说明点在叉乘值为0的边上。如图6b所示,  $\vec{V}_3\vec{O} \times \vec{V}_3\vec{V}_1 = 0$ ,  $\vec{V}_1\vec{O} \times \vec{V}_1\vec{V}_2 > 0$ ,  $\vec{V}_2\vec{O} \times \vec{V}_2\vec{V}_3 > 0$ , 点O在  $\Delta V_1V_2V_3$  的棱边上。

(c) 不满足以上两个条件者, 则点O在三角形的外部, 如图6c所示。

这个判定算法只用到了3次叉乘, 只涉及加法和乘法, 没有涉及到会影响计算机处理速度的除法、平方、三角函数等复杂运算, 所以效率非常高。而且是利用叉乘来判断方向, 进而达到判断位置关系的目的, 不依赖于具体数值, 没有浮点误差, 所以精度也非常高。在算法过程中, 需要频繁进行求交判断, 而此方法简单高效, 对于减少算法整体的运算时间大有帮助。

## 2 算法优化

对于一个算法, 优化主要从两个方面来考虑: 算法的时间复杂度和空间复杂度<sup>[6]</sup>。在本文中提出的算法, 时间复杂度和空间复杂度与两个问题规模有关: STL三角面片的规模(记为  $m$ ) 和大盒子栅格化后小盒子的规模(记为  $n$ )。对于STL三角面片的规模  $m$ ,  $T(m) = O(f(m))$ ; 对于大盒子栅格化后小盒子的规模  $n$ , 为便于讨论和比较, 不失一般性的假设STL外框(即大盒子)是正方体, 则小盒子问题规模  $n$  转化成  $x$ ,

$y$  或  $z$  某一个轴方向上的小盒子数, 比如  $T(n) = O(f(n))$ ,  $n$  为  $z$  轴方向上的小盒子数。

### 2.1 时间复杂度优化

由射线算法的原理可知, 求交运算只涉及简单的数学运算, 故求交过程的时间复杂度可视为小常数, 可不计; 而在判定过程中, 利用叉乘巧妙判断射线和三角面片的相交关系, 时间复杂度也可视为小常数, 把两者合并记为  $O(c)$ , 可不计。原射线算法的时间复杂度主要与射线产生过程和穿透过程有关, 则原射线算法的时间复杂度为  $O(m) + O(m \times n^2)$ , 测试STL 3维文件: 面片数目为130000片量级、尺寸为268mm  $\times$  422mm  $\times$  253mm、小盒子边长为2, 实际结果表明, 原算法思路所耗时间为: 45s ~ 57s 之间。

在上述射线算法的介绍中, 是以射线为主线, 在  $x-y$  面上产生平行于  $z$  轴的射线。可换个角度, 把三角面片作为主线, 如图7所示。

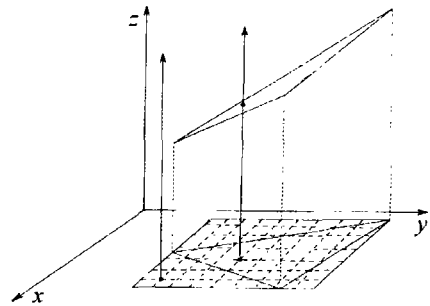


Fig. 7 Rays generation on the triangular faces projection domain

根据原射线算法的思路, 对于每条射线, 都要遍历全部STL三角面片, 而一条射线顶多穿透两个三角面片, 这样的查找显然是效率低下的。上述改进的思路, 把三角面片投影到  $x-y$  平面, 在投影的外接长方形区域产生射线。显而易见, 在这个区域中产生的射线大部分与三角面片相交, 目标明确, 大大降低了无用判定过程, 效率极高。更为重要的是, 产生的射线数目只与三角面片投影三角形形状有关, 即与三角面片形状有关, 与问题规模  $m$  和  $n$  没有关系。改进后, 射线密度是根据三角面片产生, 是对三角面片而言的, 射线非均匀分布。而算法的目的就是要捕捉3维图像的空间信息, 这样做不但没有降低信息的精度, 相反捕捉到了更多的空间信息, 效率和质量都得到了提高。优化后, 测试同一STL文件, 算法耗时2s ~ 5s。

### 2.2 空间复杂度优化

算法过程中, 最主要的空间占用与两个方面有关: (1) 存储STL 3维信息; (2) 盒子体数据空间。其它的空间占用相对这两个方面来说, 可忽略不计。

在原算法思路中, 根据小盒子参量直接构建了两个盒子体存储结构: 一个盒子用于存储算法处理后得

到的3维体数据;另一个盒子存储盒子点对应的法向量,用于3维显示。这个思路相当于静态地看待问题,直接构建最后结果所对应的数据结构。

而看待问题,也可以采用动态的观点:对于 STL 外包络点而言,能够在 STL 投影中找到一一对应的点,则只要记录投影面的数据,就一一对应着 STL 外包络点;另一方面,对于某一个包络点,点本身有价值的信息是其盒子高度和其所在的三角面片的法线。所以,根据这个思路,可以把3维体存储压缩成2维面存储,即把盒子体数据转变成网格数据,见图8。

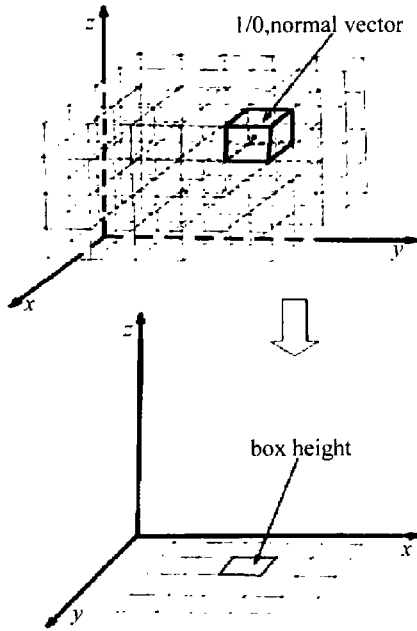


Fig. 8 Cuboid box and grid

从3维到2维,空间复杂度降低了一个量级。在此是以正方体来讨论的,而对于3维深雕来说,在保证 $x$ 和 $y$ 精度不变的情况下,总希望雕刻深度深一些,最后的实体显得更立体,则也就是希望雕刻方向上( $z$ 轴)的层数更多,即大盒子 $z$ 方向的边长越长越好,而优化的思路则刚好是把3维信息往这个方向压缩到2维,则增加 $z$ 层数对于优化后的算法无空间上的负担。所以在实际情形下,优化后的空间复杂度比之前的低一个量级以上,效果显著。

此优化是真正意义上的优化,不是拿时间换空间。优化涉及两个过程:从3维到2维;从2维到3维。从3维到2维的过程,即是填网格的过程,比置位操作更为简单,不但没有增加时间复杂度,反而有所改善。需要操作盒子体数据时,则需从2维到3维的过程,因为在原理上,算法模型不变,盒子仍存在,从存储的角度看,盒子体不存在,所以时间复杂度也不会增加。

### 3 实验结果

本研究中采用的是实验室自主研发的100W YAG

灯抽运激光深雕设备。图9至图11将展示激光3维深雕设备在射线算法的处理和系统软件的控制下,在多种不同材料上雕刻得到的实物图。



Fig. 9 Yellow crane tower carved on black aluminum

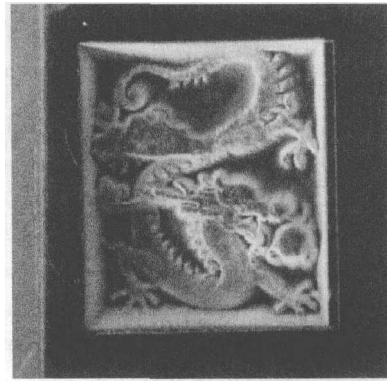


Fig. 10 Dragon carved on marble

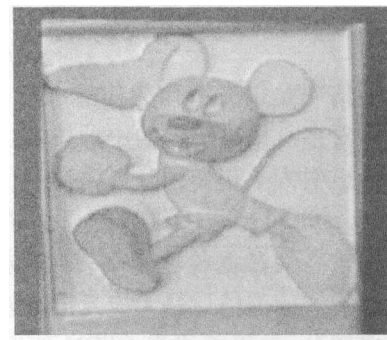


Fig. 11 Mickey mouse carved on aluminum

### 4 结论

介绍了盒子算法,深入研究了射线算法,将盒子算法和射线算法结合用于激光3维雕刻系统。算法处理一个面片数目为130000片量级的STL 3维文件,尺寸 $268\text{mm} \times 422\text{mm} \times 253\text{mm}$ ,耗时 $45\text{s} \sim 57\text{s}$ 。经时间复杂度优化,处理该文件仅需 $2\text{s} \sim 5\text{s}$ ;经空间复杂度优化,存储空间降低一个量级。本文中提出的射线算法,能在多种实体材料(大理石、铝材、铸铁等)上雕刻复杂的3维图像,并可通过变换射线与图像的角度,展现3维图像不同的角度,无加工盲区。本文中只针对

(下转第755页)

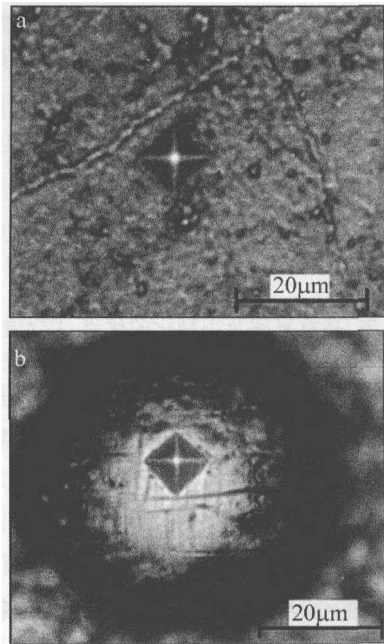


Fig.8 Comparison of indentation morphologies

a—indentation morphology without ball b—indentation morphology of ball

化铬层界面组织晶粒尺寸<sup>[7]</sup>和上述分析的激光淬火基体形貌已经延续到了铬层表面,为此对表面组织形貌的进一步细化研究和采用其它力学测试方法对各自区域的铬层表面力学性质进行评价也是解释激光离散淬火基体可以控制铬层表面主裂纹形貌需要开展的工作。

## 5 结论

激光离散淬火基体/电镀铬层结构的铬层表面形貌实验研究表明:铬层表面也形成了与其对应的密实球状组织条带和疏松球状组织条带离散相间的周期性形貌。密实球状组织区域对应着原始基体,而疏松球状组织区对应着激光淬火区。其机理是通过铬层界

面周期性形貌和铬层不同的生长方式,将激光离散基体特征传递给了铬层表面。

## 参 考 文 献

- [1] SOPOK S, RICKARD C, DUNN S. Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part one: theories and mechanisms[J]. *Wear*, 2005, 258(1/4): 659-670.
- [2] SOPOK S, RICKARD C, DUNN S. Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part two: modeling and predictions[J]. *Wear*, 2005, 258(1/4): 671-682.
- [3] CHEN G N, LUO G X, ZHANG K, *et al.* A new method for improving service life of chrome-plated gun barrels by laser strengthening [J]. *Acta Armamentaria*, 2003, 24 (s1): 6-10 (in Chinese).
- [4] ZHANG G X, CHEN G N, ZHANG K. Effect of mismatch of yielding strength and residual stresses along substrate interface on interfacial crack propagation [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2006, 36(3): 294-297 (in Chinese).
- [5] ZHANG G X, ZHANG K. The effect of laser hardened basal body on spread path of main cracks in chromium layer [J]. *New Technology & New Process*, 2006(9): 10-12 (in Chinese).
- [6] XU X Y, ZHANG K, CHEN G N, *et al.* Influence of laser hardening substrate on microstructure and bonding of electroplating chromium coating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(3): 413-416 (in Chinese).
- [7] LI H X, CHEN G N, ZHANG G X, *et al.* Characteristics of the interface of a laser-quenched steel substrate and chromium electroplate [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201(3/4): 902-907.
- [8] ZHANG G X, LI H X, CHEN G N. The study of the micro-crack morphologies on the initial electroplated chromium layer by substrate-chemically etching method [J]. *China Surface Engineering*, 2006, 19(4): 8-12 (in Chinese).
- [9] PINA J, DIDS A, FRANCOIS M, *et al.* Residual stresses and crystallographic texture in hard-chromium electroplated coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 96(2/3): 148-162.
- [10] HUANG Z X, WU Ch S. *The plating theory* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Machinery Press, 1982: 76, 26-43 (in Chinese).
- [11] WU G, SONG G M, HUANG W J. Influence of laser processing parameters on the case-depth and the hardness [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 163-165 (in Chinese).
- [12] WANG C. Study on three-dimensional carving technique by laser ablation of hard materials [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007: 8 (in Chinese).
- [13] NING G Q, ZHU Z Y, ZHU S W, *et al.* Figure and image processing in laser marking [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(4): 317 (in Chinese).
- [14] MAO H K, MAO W M, HOU H. Research on non-form 3-D mesh generation based on STL files [J]. *System Simulation Technology*, 2008, 4(3): 9-10 (in Chinese).
- [15] TAO Y R, ZHANG Y J, PEI S, *et al.* Analysis on mobile communication channel modeling based on ray-tracing [J]. *Radio Communications Technology*, 2010, 36(2): 13-14 (in Chinese).
- [16] YAN W M, WU W M. *Data structure* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 15-17 (in Chinese).
- [17] YU G H, ZENG X Y. Study on a new three-dimensional laser engraving technology [J]. *China High Technology Enterprises*, 2010(27): 13-14 (in Chinese).

(上接第 737 页)

STL 3 维模型展开了研究,可把算法思想全部或者部分移植到其它 3 维格式的文件,让 3 维深雕系统软件支持更多的格式。这些 3 维格式文件需满足两个条件:(1)在待加工的方向上拥有完备的面或体的信息,如具有封闭的包络面或空间实体;(2)3 维文件的构成元素(点、线、面)整体可以由某种空间方程统一表达,或者分局部有规律的由多个方程联合表达。

## 参 考 文 献

- [1] YU G H, ZENG X Y. Study on a new three-dimensional laser engraving technology [J]. *China High Technology Enterprises*, 2010(27): 13-14 (in Chinese).