

# 人造微孔骨结构 RP 过程仿真研究

高新瑞<sup>1</sup>, 张树生<sup>2</sup>, 侯增选<sup>2</sup>

GAO Xin-rui<sup>1</sup>, ZHANG Shu-sheng<sup>2</sup>, HOU Zeng-xuan<sup>2</sup>

1.海南大学 信息科学技术学院,海口 570228

2.西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072

1.Information Science Technology Institute of Hainan University, Haikou 570228, China

2.Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

E-mail: xr\_gao2002@yahoo.com.cn

GAO Xin-rui, ZHANG Shu-sheng, HOU Zeng-xuan. Research on RP procedure simulation of artificial porous bone structure. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(28): 17-19.

**Abstract:** In the design of artificial bones, in order to make it live together with the human bone, it should have the same porous structure as the human bone. But the Brep or solid model can't achieve this. By transforming the three direction DEXEL model of polyhedrons into its VOXEL model and setting transparency attributes of VOXELs, the porous structure of artificial bone can be designed. By merging the same attribute VOXELs along y axis, a big VOXEL is formed. By this big VOXEL, the once sintering procedure of RP laser head is simulated. Layer by layer, the whole product is produced. Under Java2.0 and Java3D, these algorithms are tested and some design examples are given.

**Key words:** polyhedrons; three direction DEXEL model; VOXEL model; transparency attribute of VOXEL; porous structure of artificial bone; RP procedure simulation

**摘要:** 在人造骨设计中, 为了能使人造骨部分与人体骨组织在一起生长、融合, 就要求人造骨具有与人体骨组织一样的微孔结构。边界面与实体模型很难作到这一点。通过将多面体三向 DEXEL 模型转换为小体素模型, 并设置小体素的透明度属性为全透明, 实现人造微孔骨结构设计。将沿 y 轴方向相同属性的小体素合并为一个大体素, 模拟激光头的一次烧结轨迹, 通过层层堆叠方式实现 RP 过程仿真。在 Java2.0 与 Java3D 环境下编程实现并验证了所有算法。

**关键词:** 多面体; 三向 DEXEL 模型; 体素模型; 体素透明度属性; 人造微孔骨结构; RP 过程仿真

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.28.005 **文章编号:** 1002-8331(2009)28-0017-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

## 1 前言

人造骨组织通常都是用金属或其他材料制造成, 用边界面或实体的方式建模, 因此, 人造骨中没有和人体骨组织相似的微孔结构。这种骨结构一经植入人体, 很难与人体骨组织生长、融合在一起。这就要求在人造骨组织结构设计中采用新的设计技术, 设计与人体骨组织相似的、多孔的人造骨组织结构。

人造骨组织结构要求具有与人体骨相同或者相似的内部微细结构, 如内部网状、多孔、非匀质结构等, 这样有利于骨细胞在人造骨部分的生长, 并且要求人造骨的骨架部分具有与人体骨一样的功能梯度, 而且在人体内能够自然降解。

这种具有复杂内部微孔结构、非匀质的人造骨体, 用传统的边界面与实体造型的方法进行设计将显得十分困难。

在文献[1-3]中, 对人造骨, 通过 CT 等技术获取人造骨部分的外形, 然后应用组织工程材料等, 以及多材料、多喷头 RP 设备, 在常温下喷射成型, 这样在成型过程中能够生成类似于人骨的组织结构。在这些论文中, 依然没有解决微孔人造骨组织结构的设计问题, 成型过程也很复杂。

为了解决这些问题, 应用了一种多面体的三向 DEXEL 模型。通过将多面体的三向 DEXEL 模型转换为小体素模型, 实现复杂型体内部复杂属性的建模。通过体素的透明属性实现人造

**基金项目:** 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.50475145, No.50775185); 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA04Z111); 国家发改委项目(No.[2005]-1898); 海南省教育厅高校科研项目(No.Hjkj2008-07); 海南省自然科学基金(the National Science Foundation of Hainan Province of China under Grant No.60893)。

**作者简介:** 高新瑞(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为计算机图形图像处理、计算机网络与系统安全; 张树生(1956-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算机图形图像、神经网络、模式识别、先进制造系统、逆向工程、产品建模; 侯增选(1964-), 男, 德国柏林工业大学博士, 教授, 主要研究方向为数字化产品建模技术与现代集成制造等。

**收稿日期:** 2009-03-16 **修回日期:** 2009-06-12

维孔骨结构设计,并且不同层的孔与孔之间是相互连通的。

现有的 RP 技术包括:光固化成型技术(SLA)、层叠成型(LOM)、选择性烧结成型(SLS)、3D 印刷成型(3DP)、熔融沉积法(FDM)等<sup>[1]</sup>。通过对这些技术进行分析,选择性烧结成型(SLS)最适合这种人造微孔骨结构,粉末采用羟基磷灰石胶原材料,未烧结的粉末可从互通孔中排出,能容易地实现向该孔状结构中注入骨细胞生长因子 BMP。因此,在该微孔模型基础上,通过模拟 SLS 过程,实现人造微孔骨结构的 RP 过程仿真。

## 2 多面体三向 DEXEL 模型与复杂属性体建模

### 2.1 多面体的三向 DEXEL 模型

边界面表示就是一种多面体表示形式,因此,在三维造型中,多面体模型具有普遍性。DEXEL 模型是一种深度元素模型(Depth Element),通过一组射线与三维型体求交,用属于三维型体内部的线段来表示一个三维型体。DEXEL 模型有单向、双向与三向 DEXEL 模型。DEXEL 模型的最大特点就是其布尔运算是线性的,运算速度快、精度高。对于一个复杂型体,三向 DEXEL 模型的表示精度高。

选用三向 DEXEL 模型,采用三组分别平行于  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的 DEXEL 射线组群,对一个三维型体的最小包围盒进行分割,将最小包围盒分成一系列的小立方体,或者小长方体。这样的空间称为一个多面体最小包围盒的体素空间。多面体三向 DEXEL 模型空间如图 1 所示。

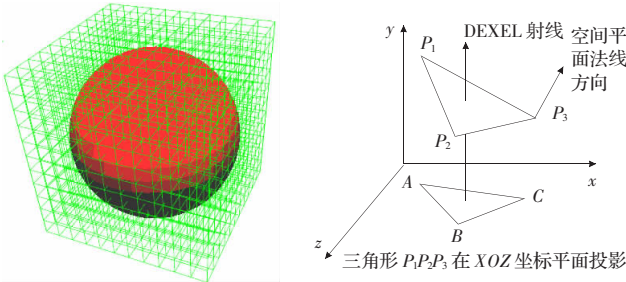


图 1 多面体三向 DEXEL 模型空间 图 2 DEXEL 射线与三角形求交

### 2.2 多面体三向 DEXEL 模型的 DEXEL 化算法

多面体的 DEXEL 化算法就是求 DEXEL 射线与一个多面体的一系列交点的算法。将位于物体内部交点对之间的线段称为 DEXEL。多面体是指由一系列的平面凸多边形所形成的体,其中最常用的平面凸多边形是三角形与平面凸四边形。对于空间的凹多边形,可将其分解为凸多边形。在逆向工程中生成的 STL 格式文件是一种用一系列三角形表示的多面体。因此,该文介绍的 DEXEL 化算法以 DEXEL 射线与空间三角形的求交为例,DEXEL 射线与其他类型的平面凸多边形的求交算法与此类似。

首先介绍单向 DEXEL 射线组群与多面体的求交算法。DEXEL 射线方向取与  $y$  坐标轴平行的射线,并沿  $y$  轴的正向,如图 2 所示。将空间三角形  $P_1P_2P_3$  向  $XOZ$  坐标面投影,得到一个在  $XOZ$  坐标面内的平面三角形  $ABC$ 。首先判断该 DEXEL 射线是否在三角形  $ABC$  内。如果该射线在三角形  $ABC$  之内,说明该射线与该空间三角形相交,则求该射线与空间三角形  $P_1P_2P_3$  的交点;如果该射线不在三角形  $ABC$  之内,则说明该射线不与空间三角形  $P_1P_2P_3$  相交,不求该射线与空间三角形  $P_1P_2P_3$  的交点。判断射线是否在平面三角形  $ABC$  内,可用两条

边分别平行于  $x$ 、 $z$  轴的最小包围矩形法加速判断。

由于三角形  $ABC$  是空间三角形  $P_1P_2P_3$  在  $XOZ$  坐标平面的投影,如果  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  三点的坐标分别为  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ ,则  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点的坐标分别为  $A(x_1, 0, z_1)$ 、 $B(x_2, 0, z_2)$ 、 $C(x_3, 0, z_3)$ 。假设  $P_0(x_0, 0, z_0)$  为  $XOZ$  坐标平面内任一点,也就是一个 DEXEL 射线在  $XOZ$  坐标平面内的坐标值,则该射线与空间三角形  $P_1P_2P_3$  是否相交的判断就转化为判断点  $P_0$  是否在投影三角形  $ABC$  内。要判断点  $P_0$  是否在三角形  $ABC$  内,其中一个最简捷的算法就是分别求  $P_0$  到  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点的向量  $P_0A$ 、 $P_0B$ 、 $P_0C$ ,然后分别求向量  $P_0A$  与  $P_0B$ 、 $P_0B$  与  $P_0C$  与  $P_0A$  的叉积。如果这 3 个叉积符号相同,则说明  $P_0$  点在三角形  $ABC$  内,则该 DEXEL 射线与空间三角形  $P_1P_2P_3$  相交,则需要求该 DEXEL 射线与空间三角形  $P_1P_2P_3$  的交点;如果 3 个叉积符号不同,则说明  $P_0$  点在三角形  $ABC$  之外,则该 DEXEL 射线不与空间三角形  $P_1P_2P_3$  相交,不用求 DEXEL 射线与空间三角形  $P_1P_2P_3$  的交点。对多边形顶点数大于 3 的空间平面凸多边形可用相同的方法。该算法详细的计算与判断过程可参考文献[4]。

将该单向 DEXEL 化算法推广到分别平行于  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴三向 DEXEL 射线组群,就得到了多面体三向 DEXEL 化算法。

### 2.3 多面体三向 DEXEL 模型与体素模型的转换

对一个多面体的最小包围盒,三向射线组群将最小包围盒空间分成了一个个小体素,这样的体素空间称为小体素空间。对于一个多面体的三向 DEXEL 模型,通过 Marching Cube 算法判断一个多面体三向 DEXEL 模型中的边界体素与体内体素,进而将一个多面体的三向 DEXEL 模型转换为多面体的体素模型。一个小体素可以是一个小立方体,或者小长方体。由三向 DEXEL 模型转换来的体素模型空间是一种三维数组结构,每个小体素可有自己的颜色、材质等属性。体素越小,表示的多面体模型的精度就越高。对于多面体的三向 DEXEL 模型,可用 Marching Cube 算法提取三向 DEXEL 模型的三角网格。

### 2.4 复杂属性体建模

一个三维型体的内部具有比较复杂的属性,如颜色、透明度、材质、密度、刚度、强度、温度等。在边界面与实体模型中,很难表示这些复杂属性。多面体三向 DEXEL 模型转换来的多面体的体素模型是一种三维数组结构,可设置每一个小体素的属性、材质、透明度等属性,进而实现具有复杂属性体的建模。

## 3 人造维孔骨结构设计

在由三向 DEXEL 模型转换来的多面体的体素模型中,可应用每个小体素的透明度属性设计微孔骨结构。在体素模型中,如果一个小体素的透明度属性为全透明,则该体素在模型可视化时为不可见,也可以认为该体素不存在。通过对体素模型中的小体素的透明度属性的设置,实现微孔骨结构设计,并可设置体内微孔结构的排列方式。

体素的大小可根据设计需要调整。通过算法,实现不同层之间孔的连通性,这样可保证人骨细胞的生长空间。

## 4 人造微孔骨结构 RP 过程仿真

RP 系统过程是一个层状运动轨迹过程,三向 DEXEL 模型也是一个层状结构。这两者之间有一定联系。RP 系统的过程与 DEXEL 模型之间的关系如图 3。

用 DEXEL 模型对 RP 系统的过程仿真如下。(1)将通过 CT 技术或 MR 核磁共振技术等方式获得的人骨数据,转换为多面体模型;(2)在同一三向 DEXEL 模型空间对该多面体进行三向 DEXEL 化,将多面体转换为三向 DEXEL 模型;(3)将该三向 DEXEL 模型转换为小体素模型,通过设置每个小体素的透明度属性,生成相互连通的微孔结构;(4)沿  $y$  轴方向,对由相邻的 4 根 DEXEL 射线所包围的具有相同属性的小体素进行合并,形成一个沿  $y$  轴方向的大体素,这样就将小体素模型转换为用大体素表示的模型;(5)用大体素模拟激光头的一次烧结轨迹,通过层层堆叠方式,实现对整个模型的 RP 过程仿真。

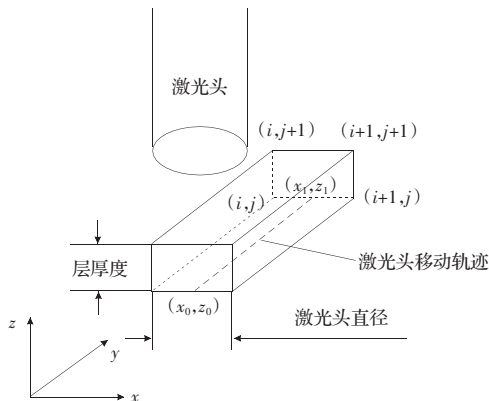


图3 RP 系统过程与 DEXEL 模型之间关系

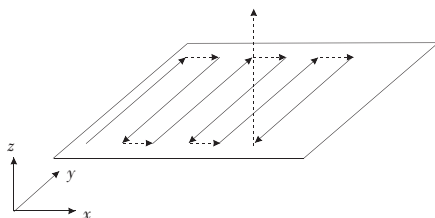


图4 激光头移动轨迹示意图

其中,DEXEL 射线的方向与激光头移动的方向一致。 $(i, j)$ 、 $(i+1, j)$ 、 $(i, j+1)$ 、 $(i+1, j+1)$  分别表示平行于  $y$  轴的相邻的 4 条 DEXEL 线。在 DEXEL 模型中,这 4 条 DEXEL 射线就形成了一个大体素。在  $x$  轴方向 DEXEL 线之间的间隔按激光束直径选取。在  $z$  轴方向 DEXEL 线之间间隔按层厚度选取。 $(x_0, y_0)$  到  $(x_1, y_1)$  之间为激光头的移动轨迹。可见,激光头沿  $y$  轴方向的一次移动,将会生成一个长方体的条。这个长方体的条也就对应 DEXEL 模型中的一个沿  $y$  轴方向的大体素。当同一层的 DEXEL 射线走完,一层的形状就形成了。当所有层走完,RP 的零件就形成了。一层内激光头移动轨迹示意如图 4。因此,可用 DEXEL 模型中的大体素模拟激光头的一次移动过程。由于用的是大体素,每个大体素都可表示其颜色、材质等属性。

激光头轨迹端点坐标的  $x_0, x_1$  的计算由同层相邻 DEXEL 线的  $x$  坐标的平均值确定。根据相邻 4 条 DEXEL 射线的最小  $y$  与最大  $y$  坐标的平均值计算激光头轨迹的长度。

在 SLS 成型过程中,粉末采用纳米晶羟基磷灰石-胶原复合材料,该材料具有天然骨的部分微结构成分与特征。由于在该模型中的孔是相互全连通的,可很容易排出未烧结的粉末,复合骨生长因子 BMP 可在模型生成后通过注入的方式加入。

## 5 RP 过程仿真实例

在 Java2.0 与 Java3D 环境下,编程实现所有算法与图形显示。图 5 是一种复杂型体的线框模型。图 6 表示该模型的半剖微孔结构。图 7 表示单层微孔体素模型,激光头的移动方向沿着  $y$  轴方向。图 8 是该半剖模型的层层堆叠过程,在每一层内,大体素沿着  $y$  轴方向一条条生成,形成一层,层层堆叠形成整个三维型体。

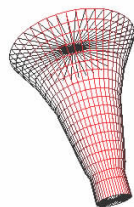


图5 复杂型体  
线框模型

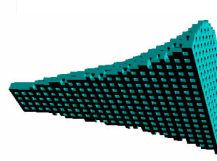


图6 图5型体的半  
剖微孔结构

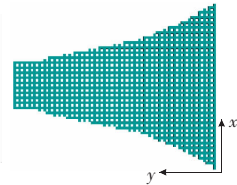


图7 单层微孔结构

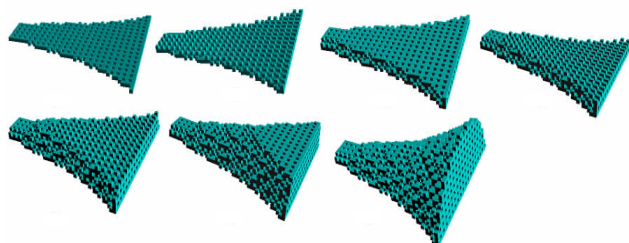


图8 RP 过程仿真

## 6 结论

通过微孔结构 RP 过程仿真可看出,相关算法可靠。首先将人骨 CT 数据或 MR 数据转换为多面体模型;将该多面体模型用 DEXEL 化算法,转化为三向 DEXEL 模型;再将该三向 DEXEL 转换为小体素模型;通过设置小体素的透明度属性,设计人造互通维孔骨结构;通过模拟激光头的烧结过程,实现 RP 过程仿真。

## 参考文献:

- [1] 金杰,张安阳.人工骨快速成型制造的研究进展[J].浙江工业大学学报,2005,33(6):691-695.
- [2] 颜永年,崔福斋,张人佶,等.人工骨的快速成型制造[J].材料导报,2002,14(2):11-13.
- [3] 颜永年,张人佶,崔福斋,等.用于人工骨制造的喷射成型技术[J].中国机械工程,2000,11(10):1116-1119.
- [4] 高新瑞,张树生,侯增选.多面体三向 DEXEL 模型与虚拟 RP 过程仿真[J].计算机集成制造系统(CIMS),2007(12):2415-2419.
- [5] Gao Xin-rui,Zhang Shu-sheng,Hou Zeng-xuan.Three direction DEXEL model of polyhedrons and its application[C]/ICNC07.[S.l.]: IEEE Computer Society,2007,5:145-149.
- [6] Gao Xin-rui,Zhang Shu-sheng,Hou Zeng-xuan.Virtual rapid prototyping simulation[J].Journal of Computational Information Systems,2007,3(2):203-213.
- [7] Zhu Wei-ming.Modelling of multi-material assemblies for layered manufacturing[D/OL].Internet PQDD(ProQuest Digital Dissertations).(2003).http://wwwlib.umi.com/dissertations.
- [8] Choi S H,Chan A M M.A virtual prototyping system for rapid product development[J].Computer Aided Design,2004,36(7):401-412.