

12-12-2019

A Generation Method of AMF General Files for Heterogeneous NURBS Volume Parametric Model

Chen Long

1. *College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Wenyu Han

1. *College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Xu Gang

2. *Department of Computer Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A Generation Method of AMF General Files for Heterogeneous NURBS Volume Parametric Model

Abstract

Abstract: Aiming at the three-dimensional printing technology of heterogeneous NURBS (Heterogeneous Non-Uniform Rational B-spline, HNURBS) volume parametrization model, a method of generating the AMF (Additive Manufacturing File Format) of the three dimensional printing general file is proposed. *For the continuous visual expression of material information, the HNURBS volume parametric model is constructed with the control points containing material information which is represented with gray value. According to the subdivision of the NURBS volume parametric model, the HNURBS volume parametric model is subdivided into Isoparametric mesh element. In order to get the triangular mesh for the generation of the AMF files, each plane of the element is divided into the triangular mesh and the material information is calculated with interpolation method.* The results show that the output of AMF format is available for the three dimensional printing software AMFtools.

Keywords

heterogeneous products, three dimensional printing, HNURBS volume parameterization, AMF file

Recommended Citation

Chen Long, Han Wenyu, Xu Gang. A Generation Method of AMF General Files for Heterogeneous NURBS Volume Parametric Model[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(10): 2010-2018.

非均质 NURBS 体参数化模型的 AMF 通用文件生成方法

陈龙¹, 韩文瑜¹, 徐岗²

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 杭州电子科技大学计算机学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对非均质 NURBS (Heterogeneous Non-Uniform Rational B-spline, 简称 HNURBS) 体参数化模型的三维打印技术, 给出了三维打印通用 AMF (Additive Manufacturing File Format) 文件生成方法。用灰度值代表材料信息, 通过含有灰度信息的控制点构建 HNURBS 体参数化模型, 实现材料信息连续可视化表达; 根据 NURBS 体参数模型细分方法得到等参线网格单元, 对等参线网格单元进行三角网格划分和材料插值计算, 得到用于 AMF 文件生成所需的三角形网格单元。结果表明, 输出的 AMF 格式文件可供三维打印软件 AMFtools 读取和显示。

关键词: 非均质产品; 三维打印; HNURBS 体参数化; AMF 文件

中图分类号: TH164; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 10-2010-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0401

A Generation Method of AMF General Files for Heterogeneous NURBS Volume Parametric Model

Chen Long¹, Han Wenyu¹, Xu Gang²

(1. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Department of Computer Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the three-dimensional printing technology of heterogeneous NURBS (Heterogeneous Non-Uniform Rational B-spline, HNURBS) volume parametrization model, a method of generating the AMF (Additive Manufacturing File Format) of the three dimensional printing general file is proposed. For the continuous visual expression of material information, the HNURBS volume parametric model is constructed with the control points containing material information which is represented with gray value. According to the subdivision of the NURBS volume parametric model, the HNURBS volume parametric model is subdivided into Isoparametric mesh element. In order to get the triangular mesh for the generation of the AMF files, each plane of the element is divided into the triangular mesh and the material information is calculated with interpolation method. The results show that the output of AMF format is available for the three dimensional printing software AMFtools.

Keywords: heterogeneous products; three dimensional printing; HNURBS volume parameterization; AMF file

引言

快速成型技术诞生于 20 世纪 80 年代后期, 该



收稿日期: 2017-08-17 修回日期: 2017-10-23;
基金项目: 国家自然科学基金(51475309, 61472111),
浙江省杰出青年自然科学基金(LR16F020003);
作者简介: 陈龙(1978-), 男, 湖北十堰, 博士, 副教授, 研究方向为产品计算设计, 机器视觉; 韩文瑜
(1994-), 男, 陕西渭南, 硕士, 研究方向为 CAGD。

技术采用材料堆积的方法来制造产品, 被称为 20 世纪制造业领域的一项重大成果^[1]。该技术已在生物、航空航天、制造、建筑、科技文化等领域得到了广泛的应用^[2-3]。目前三维打印产品设计方法大多针对由一种材料制造而成的均质产品。而针对两种材料或两种材料以上组成的非均质产品的打印方法主要分为 2 种, 一种是为几何模型贴纹理图, 另一

<http://www.china-simulation.com>

• 2010 •

种是采用多喷头打印, 2 种方法实质还是构建均质产品, 通过后加工而形成的“非均质产品”。

三维打印技术作为快速成型技术的一种, 一般步骤包括产品模型设计、切片处理、实施打印。非均质产品的建模和材料信息的连续表达是该类产品三维打印的关键技术之一。当前主流 CAD 软件构建的模型大多是 B-Rep 模型, 而 STL 格式作为快速成型领域事实上的数据交换标准, 因此非均质产品大多为面向 STL 格式的 B-Rep 模型^[4]。以人体骨骼为实例, 定义结构模板和材料模板, 对不同的材料、结构区域进行填充, 完成非均质骨骼模型的构建, 之后采用分区域处理, 每一个区域为均质的 STL 模型^[5]。文献[6]提出基于体素模型的非均质模型构建方法, 针对主流的 STL 三角形网格模型, 对 CAD 模型离散化为三角形网格单元作为体素, 单元节点处进行材料赋值, 构建出非均质体素模型。文献[7]对 CAD 模型离散化后, 采用点单元的数据建模方法, 构建出高精度结构、材料梯度的非均质模型。

NURBS 体参数化模型以分段的 NURBS 作为基函数, NURBS 高阶连续性保证了存在许多有效且数值稳定的算法来产生和优化 NURBS 体参数化模型^[8]。NURBS 体参数化模型的控制点控制模型的几何形状, 为控制点添加材料特征, 通过 NURBS 基函数实现模型材料和几何的并行设计, 得到材料信息连续表达的 HNURBS 体参数化模型的构建。通过该方法构建了多分辨率可视化的三变量张量体模型^[9], 人体肱骨的 HNURBS 体参数化模型^[10], 以及对非均质产品的分析^[11]。构建多维材料域, 根据 NURBS 体参数化模型物理域与材料域的一一映射关系, 构建 HNURBS 体参数化模型, 实现模型材料信息的连续表达^[12]。但当前高级 CAD 软件并不能直接构建并生成 HNURBS 体参数化模型的三维打印通用文件。

支持三维打印的通用文件包括 STL、OBJ、AMF^[13]。STL 通用文件被广泛用于 CAD 系统和快速成型技术之间, 通过几何逼近的方法来表述几何实体的外表面信息, 但其数据结构简单, 几何精度

较低, 同时缺失产品颜色, 材质等属性^[14]。OBJ 通用文件支持多边形模型, 同样也支持曲线、曲面、点阵属性等, 例如在 Maya 软件里渲染或动画后的模型保存。该文件格式往往也存储三角形网格, 其实质和 STL 文件相差无几^[15]。AMF 通用文件不同于 STL 和 OBJ, 该格式允许三维软件描述任何三维打印机上要制造的任何对象的形状和组成, 文件中可以包含产品颜色、材质、纹理、点阵等属性。AMF 通用文件一方面在元数据、数据树、目标单元、产品几何精度等方面具有显著提高, 另一方面在表面纹理、颜色、物理性质、功能材料等方面得到创新^[16]。Ratnadeep Paul 等^[17]在 AMF 通用文件的基础上提出了一种新的通用文件, 较 STL 通用文件, 证明了通过 NURBS 曲面构造的表面模型的轮廓误差降低了 70%~85%, 圆柱度误差降低了 49%~60%。在 AMF 文件的附录手册中^[18], Hod Lipson 构建了一个由两种材料构成的五面体结构, 表明了 AMF 文件可以识别添加的材料信息。2015 年提出的 3MF 三维打印通用文件, 解决了现有通用文件的固有问题, 虽然其标准已经发布, 但还未大量使用。

本文针对非均质产品的三维打印技术, 提出了一种非均质 NURBS 体参数化模型的三维打印通用 AMF 格式文件生成方法。根据 NURBS 体参数化模型的基础理论, 给出 HNURBS 体参数化模型的定义, 完成体参数化模型构建以及材料的连续性可视化表达。结合几何、材料精度的考虑, 对 HNURBS 体参数化模型进行等参线网格单元细分。依据体参数化理论对等参线网格单元进行三角网格划分以及材料信息插值计算, 从而生成 AMF 格式文档的各项信息。最终生成可以用于三维打印输入的非均质体参数化模型的 AMF 通用文件。

1 HNURBS 体参数化模型的构建

1.1 NURBS 体参数化定义

NURBS 体参数化模型是通过创建一个三变量张量体参数化模型 T 和一个规则的封闭体(立方体) P 建立一一映射关系。如图 1 所示, T 指具有物理

域边界，建立在 (x,y,z) 坐标系统中的三维模型，规整的封闭体 P 指的是由正交参数化系统 (u,v,w) 构建的规整立方体，①为物理域到参数域的映射关系，②为参数域到物理域的映射关系，③为物理域一单元在参数域对应的单元。

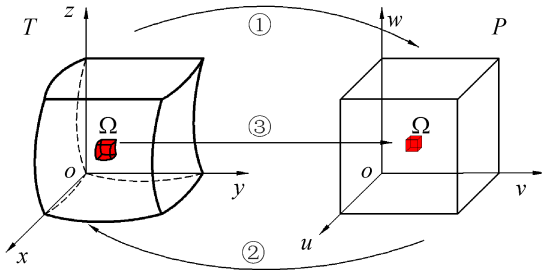


图 1 参数域与物理域的映射关系

Fig. 1 Mapping between parameter domain and physical domain

其映射函数即三维空间 NURBS 体参数化模型的表达式如下：

$$B(u, v, w) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \omega_{i,j,k} P_{i,j,k}(x, y, z)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \omega_{i,j,k}} \quad (1)$$

式(1)中： $\{P_{i,j,k}\}$ 为体控制点； $\{\omega_{i,j,k}\}$ 是权因子， $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v), N_{k,r}(w)$ 分别是定义在非周期(且非均匀)节点矢量空间 U, V, W 上次数分别为 p, q, r 次的 NURBS 基函数。

U, V, W 的节点向量空间：

$$U = [u_0 = u_1 \cdots = u_p, u_{p+1}, \cdots, u_n, u_{n+1} \cdots = u_{n+p+1}]$$

$$V = [v_0 = v_1 \cdots = v_q, v_{q+1}, \cdots, v_m, v_{m+1} \cdots = v_{m+q+1}]$$

$$W = [w_0 = w_1 \cdots = w_r, w_{r+1}, \cdots, w_l, w_{l+1} \cdots = w_{l+r+1}]$$

式(2)为 U 方向上的 NURBS 基函数的表达式， V, W 方向上的基函数定义与此类似。

$$\begin{cases} N_{i,p}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 构建 HNURBS 体参数模型

HNURBS 体参数化模型相比较于 NURBS 体

参数模型，除了表达实体的几何信息，还需表达实体的材料信息。假定 HNURBS 体参数化模型由 R 个控制点形成的控制多边形予以控制，每个控制点包含一种材料信息 R_δ 。根据 NURBS 体参数化模型物理域和参数域的一一映射关系，从控制点的材料信息可以计算得到 HNURBS 体参数化模型上任意一点的材料信息，如公式(3)所示。

$$B(u, v, w)_\delta = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \omega_{i,j,k} R_\delta}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \omega_{i,j,k}} \quad (3)$$

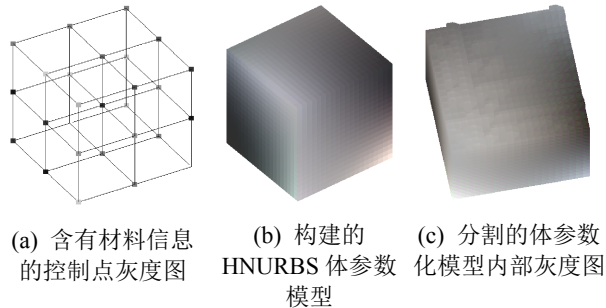
HNURBS 体参数模型上的每个控制点 P 除了包含其坐标 $P_{i,j,k}(x, y, z)$ ，还包含其添加的材料信息。为便于 HNURBS 体参数化模型的细分和三角形网格的划分，需实现其可视化。在计算机图形学中，将白色与黑色之间按对数关系分成 0~255 若干等级，白色为 255，黑色为 0 来定义灰度等级^[19]。在 HNURBS 体参数化模型中，考虑两组分的非均质材料，以白色代表软质材料，黑色代表硬质材料，同样对白色和黑色按对数关系分成 0~255 若干等级，来表示不同的材料组分，从而实现 HNURBS 体参数模型的材料信息连续可视化表达。HNURBS 体参数模型的表达式，结合公式(1)和(3)，表示如下

$$B(u, v, w, h) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \omega_{i,j,k} P_{i,j,k}(x, y, z, \lambda)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \omega_{i,j,k}} \quad (4)$$

式(4)中： h 和 λ 分别表示实体点 $B(u, v, w)$ 和控制点 $P_{i,j,k}(x, y, z)$ 上的灰度信息。通过控制点的灰度信息，表达出实体上每个点 $B(u, v, w, h)$ 的灰度信息，以体现出 HNURBS 体参数化模型各材料组分的比例信息。灰度信息通过一定的关系即可转换为模型的密度，以骨骼模型为例^[20]，其关系如下， ρ 为密度， E 为弹性模量：

$$\begin{aligned} \rho &= -13.4 + 1017 * h \\ E &= -388.8 + 5925 * \rho \end{aligned} \quad (5)$$

通过以上方法构建包含材料信息的可视化 HNURBS 体参数化模型, 如图 2 所示为一个非均质立方体的 HNURBS 体参数化模型构建过程。



(a) 含有材料信息
的控制点灰度图 (b) 构建的
HNURBS 体参数
化模型 (c) 分割的体参数
化模型内部灰度图

图 2 立方体 HNURBS 体参数化模型构建过程

Fig. 2 Construction of cube HNURBS volume parametric model

2 HNURBS 体参数模型的划分

2.1 HNURBS 体参数模型细分

HNURBS 体参数化模型控制点 $\{P_{i,j,k}\}$ 和权因子 $\{\omega_{i,j,k}\}$ 控制几何模型的形状, 其节点向量空间 U, V, W 对 HNURBS 体参数模型的几何精度和灰度信息起到了至关重要的作用, 因此通过适当的节点向量空间细分方法对 HNURBS 体参数化模型进行等参线网格单元化分。

沿 u, v, w 三个参数方向, 节点向量空间平均细分为 n, m, l 等分, 选取的节点向量 U', V', W' 为:

$$U' = [0, (1/n), \dots, ((n-1)/n), 1]$$

$$V' = [0, (1/m), \dots, ((m-1)/m), 1]$$

$$W' = [0, (1/l), \dots, ((l-1)/l), 1]$$

HNURBS 体参数化模型以分段的 NURBS 作为基函数, 依据其局部支撑性, 在 U' 空间上, 其节点向量同 U 空间上进行比较, 若 $u' \in [u_i, u_{i+1})$, 则 $N_{i,p}(u) \neq 0$, V', W' 空间类似。

对应于物理域则沿 x, y, z 方向, HNURBS 体参数化模型沿等参线划分出等参线网格单元, 如图 3 所示。细分次数足够多时, HNURBS 体参数化模型可视为由多段折线构成, 则等参线网格单元为规整的六面体结构, 如图 4 所示, 在物理域

中等参线网格单元的 8 个顶点分别为:
 $B(u_i, v_j, w_k)$, $B(u_{i+1}, v_j, w_k)$, $B(u_i, v_{j+1}, w_k)$,
 $B(u_{i+1}, v_{j+1}, w_k)$, $B(u_i, v_j, w_{k+1})$,
 $B(u_{i+1}, v_j, w_{k+1})$, $B(u_i, v_{j+1}, w_{k+1})$,
 $B(u_{i+1}, v_{j+1}, w_{k+1})$ 。

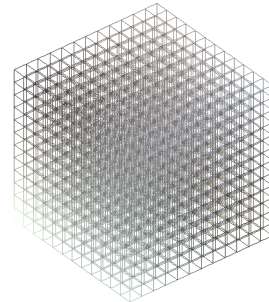


图 3 等参线划分

Fig. 3 Subdivision through isoparametric line

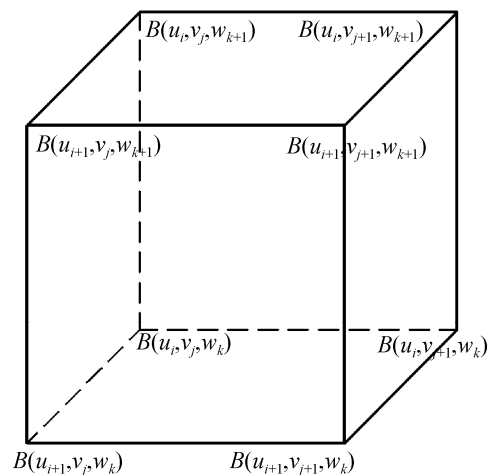


图 4 等参线网格单元

Fig. 4 Isoparametric mesh element

划分的等参线网格单元的数量 K 和细分次数的关系如下式(6)所示:

$$K = K(u) \cdot K(v) \cdot K(w) \quad (6)$$

式(6)中: $K(u)$, $K(v)$, $K(w)$ 分别为 u, v, w 三个参数方向的细分次数。

2.2 三角形网格划分

AMF 通用文件最终还是通过三角形网格来拟合三维实体的外表面。因此需要对等参线网格单元划分出三角网格, 并且插值得到顶点的材料信息。

依据等参线网格单元很容易得到六面体单

元。对六面体单元的每个表面划分出 2 个三角形，如图 5 所示为二维 NURBS 曲面的三角形网格划分，左侧为物理域划分，右侧为对应的参数域划分。连接参数域的正方形角点，划分出两个直角三角形，对应的物理域为 NURBS 曲面三角形。

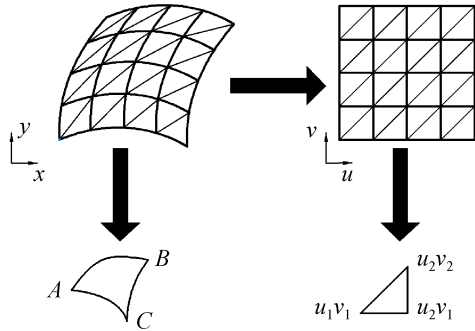


图 5 二维 NURBS 曲面三角形网格划分
Fig. 5 Triangular mesh on NURBS surface

划分三角形网格的数量 Q 和细分次数的关系如式(7)所示:

$$Q = K(u) \cdot K(v) \cdot (K(w) + 1) \cdot I \cdot J \quad (7)$$

式(7)中: $I=3, J=2$ 指沿 u, v, w 3 个参数方向划分 HNURBS 体参数模型后, 将六面体单元的每个表面划分出 2 个三角形网格。

2.3 三角形灰度信息计算

细分次数足够多的情况下, 划分的三角线网格可视为图 6 所示的直线三角形, 每个三角形为一均质三角形。三角形的三个顶点为 HNURBS 体参数化模型上含有材料信息的点, 利用三角形的三个顶点插值计算出三角形重心点的材料信息, 作为均质三角形的材料信息。同样用灰度值 h 代表每一点的材料信息, 如式(8)所示, S 表示三角形面积, D 为 BC 的中点。

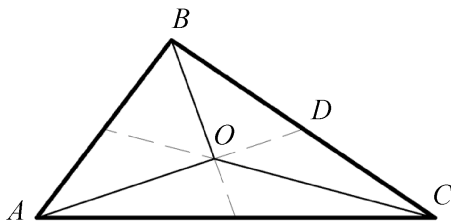


图 6 三角形灰度计算
Fig. 6 Calculation of triangular gray

$$O_h = \frac{|OD|}{|AD|} A_h + \frac{|AO|}{|AD|} D_h \quad (8)$$

$$D_h = \frac{|BD|}{|BC|} C_h + \frac{|CD|}{|BC|} B_h \quad (9)$$

推导出三角形重心点的灰度值, 作为三角形的灰度信息:

$$O_h = \frac{|OD|}{|AD|} A_h + \frac{|AO|}{|AD|} \left(\frac{|BD|}{|BC|} C_h + \frac{|CD|}{|BC|} B_h \right) \quad (10)$$

式中: $\frac{|OD|}{|AD|} = \frac{S_{BOD}}{S_{BAD}}$, $\frac{|AO|}{|AD|} = \frac{S_{AOB}}{S_{ADB}}$,

$$\frac{|BD|}{|BC|} = \frac{S_{ABD}}{S_{ABC}}, \frac{|CD|}{|BC|} = \frac{S_{ADC}}{S_{ABC}}。$$

通过式(10)计算出的三角形灰度信息为一均质三角形网格的材料信息, 随着细分次数的增加, 划分的三角形网格数量也相应增长。如图 7 所示, 为三角形网格细分的原理图, 以一个三角形网格为例, 每细分一次都将一个灰度值表示的三角网格细分为 4 个灰度值表示子三角网格。

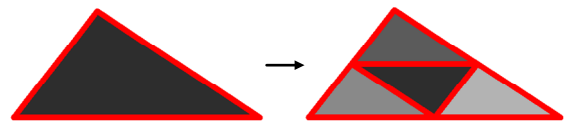


图 7 三角形网格细分原理图
Fig. 7 Triangle Mesh Segmentation Schematic

AMF 模型的三角形网格的总个数和细分次数之间的关系为:

$$n = K(u) + K(v) + K(w) \quad (11)$$

$$Q = 4^n \cdot N \quad (12)$$

式(12)中: Q 为三角形网格总个数, n 为 u, v, w 三个参数方向的细分次数之和, N 为三角形网格基数。

3 三维打印文件生成

3.1 AMF 数据结构

AMF 格式基于可扩展标记语言(XML)设计, 含有 1 个根元素(amf), 5 个顶层元素, 包括目标元素(object)定义实体点数据信息、三角形的网格信息以及实体不同体积区域使用的材料信息; 材料元素(material)定义材料类别; 纹理元素(texture)定义

表面贴图纹理或者颜色; 系元素(constellation)定义结构之间的位置关系; 元数据元素(metadata)定义模型其他数据, 例如作者信息, 单位, 对材料信息描述, 实体名称等^[12]。本文中主要涉及到目标元素(object)和材料元素(material), 设计的数据结构如图 8 所示。

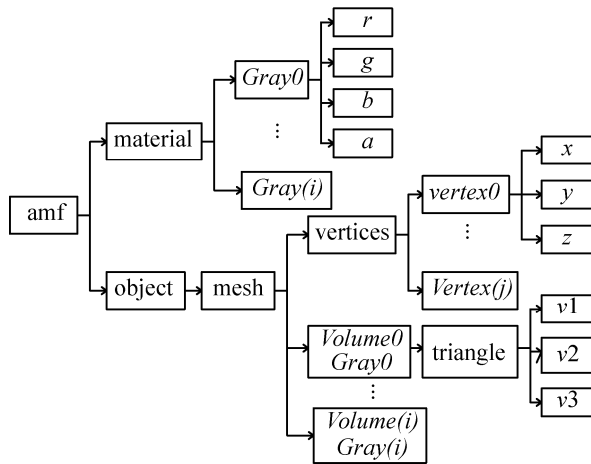


图 8 数据结构
Fig. 8 Data structure

材料元素用于存储每个均质三角形的材料信息, 每种材料定义一个不同标签, $Gray0 \dots Gray(i)$, i 代表三角形网格数量; 用 $rgba$ 来表示不同的材料, 其中 r (红)、 g (绿)、 b (蓝)为计算机图形学中的三基色, a 指该颜色的透明度, 取值范围为 $a \in [0,1]$, 0 代表全透明, 1 代表非透明。本文按照 $(0.5h, 0.5h, 0.5h, 1)$ 的方法转换灰度信息为 $rgba$ 信息, 以此来显示不同的材料组分。

目标元素主要包括点集信息和实体信息。对划分出的三角形网格的顶点按照右手法则逆时针方向存储, 如图 9 所示, $vertex0 \dots vertex(j)$, j 代表所有顶点的数目。

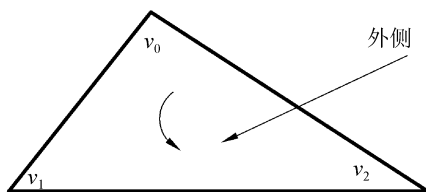


图 9 三角形顶点存储
Fig. 9 Storage of triangle vertices

AMF 文件中对于输入点坐标的顺序, 一般情况下默认从 0 开始计数, 实体信息包括 $volume0 \dots volume(i)$, i 代表三角形网格的数量, 每个实体即为一个三角形网格, 包括其顶点在 $vertices$ 中的排列顺序和材料名称。

3.2 HNURBS 体参数的 AMF 通用文件

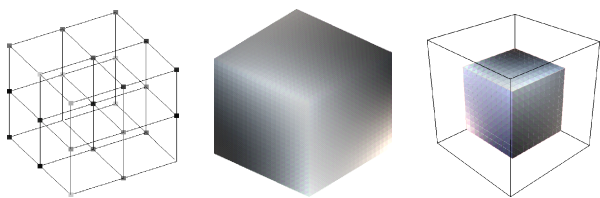
根据 AMF 通用文件的标准, 以及图 8 中的数据结构。设计出 HNURBS 体参数模型的 AMF 通用文件部分文件

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>      A
<amf>
  <material id="0">
    <metadata type="name">Gray0</metadata>
    <color>
      <r>0.8</r>
      <g>0.7</g>
      <b>0.51875</b>
      <a>1</a>
    </color>
  </material >
  ...
  <object id="0">
    <mesh>
      <vertices>
        <vertex>
          <coordinates>
            <x>0</x>
            <y>0</y>
            <z>0</z>
          </coordinates>
        </vertex>
        ...
      </vertices>
      ...
      <volume materialid="0">
        <metadata type="name">Gray0</metadata>
        <triangle>
          <v1>0</v1>
          <v2>1</v2>
          <v3>2</v3>
        </triangle>
      </volume>
      ...
    </mesh>
  </object>
</amf>
```

其中 A 部分为声明部分, 包含版本信息, 编码方式; B 部分为定义材料部分; C 部分为点集元素, 存储三角形 3 个顶点的坐标; D 部分为三角形网格信息, 包含 B 部分的材料信息, 每个三角形为一个均质的实体。

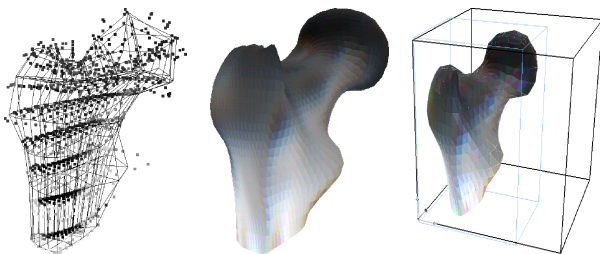
4 设计实例

本文在 VS2010 环境下编程，以 OpenGL 为渲染工具，开发了一套通过含有材料信息的控制点，构建 HNURBS 体参数化模型，实现三维打印通用文件 AMF 输出的程序。给出了立方体模型和肱骨模型两个实例，如图 10~11 所示，图 10(a)，11(a)为含有材料信息的控制点灰度图，图 10(b)，11(b)为划分三角形网格后的 HNURBS 体参数化模型，图 10(c)，11(c)为输出的 AMF 通用文件在三维打印软件 AMFtools 中的显示。



(a) 含有材料信息的控制点灰度图 (b) 三角网格划分的 HNURBS 体参数化模型 (c) AMF 通用文件在 AMFtools 中的显示

图 10 立方体模型
Fig. 10 Cube model



(a) 含有材料信息的控制点灰度图 (b) 三角网格划分的 HNURBS 体参数化模型 (c) AMF 通用文件在 AMFtools 中的显示

图 11 肱骨模型
Fig. 11 Humerus model

随着细分次数的增加，HNURBS 体参数化模型的几何精度显著提高，灰度信息更加不容易丢失，如图 12 所示。在立方体模型和肱骨模型采用相同参数域划分的情况下，表 1 是不同细分次数的立方体模型和肱骨模型输出 AMF 文件的三角形网格数量(个)和文件大小(MB)的比较。结果显示在相同细分次数下的三角形网格数量与理论值相

等，文件大小接近。

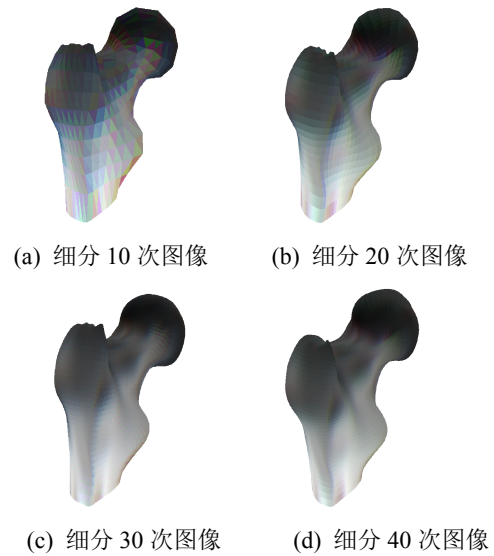


图 12 不同细分次数的肱骨模型
Fig. 12 Humerus model of different segments

表 1 三角形网格数量和 AMF 文件大小的比较
Tab. 1 Comparison of the number of triangular meshes and the size of AMF files

细分次数	AMF 文件大小/KB		三角网格数量/个
	立方体模型	肱骨模型	立方体/肱骨模型
10	5.93	6.21	6 600
20	45.6	47.7	50 400
30	156	159	167 400
40	359	375	393 600

和文献[21]中提出的直接将非均质模型直接切片的方法相比，本文方法具有以下特点：

1) 材料信息精度高。HNURBS 体参数化模型参数域与物理域的一一映射关系，通过控制点的材料信息，计算得到体上任意一点的材料信息。划分出的三角形网格的材料信息由三角形重心点的材料信息表示，随着细分次数足够多，材料信息和几何精度显著提高。

直接切片过程中，一方面如果等参线网格单元的顶点不在截面上，如图 13 所示。截面上任意一点的坐标和材料信息需通过隐式截面 $f(u,v,w)=0$ 与 HNURBS 体参数化模型求交得到，如式(13)所示(以 P 点 u 方向为例)：

$$\begin{cases} u_i = \frac{u_i f(u_{i+1}, v_j, w_k) - u_{i+1} f(u_i, v_j, w_k)}{f(u_{i+1}, v_j, w_k) - f(u_i, v_j, w_k)} \\ v_i = v_j \\ w_i = w_k \end{cases} \quad (13)$$

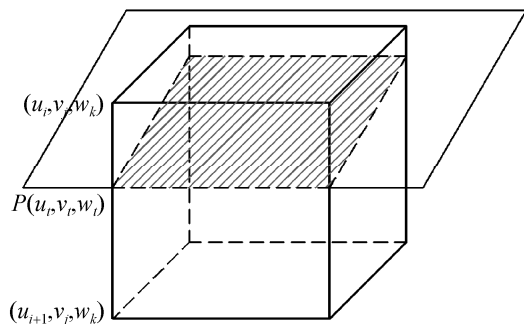


图 13 等参线网格单元与截面相交

Fig. 13 Intersection of Isoparametric mesh element with the cross section

另一方面计算得到的交点 $P(u_i, v_i, w_i)$ 需拟合界面轮廓线并以蒙皮操作作为基础, 运用最小二乘法进行曲面的迭代拟合。直接切片的算法从隐式曲面的构造以及拟合算法、插值算法相比较于本文的算法都较为复杂, 精度难以控制。

2) AMF 文档生成方便, 效率高。对划分出的均质三角形网格, 根据 AMF 通用文件的标准进行顶点坐标和材料信息的存储, 可在保证材料, 几何精度和时间效率中输出有效的三维打印通用文件。

采用直接切片的方法, 其效率体现在截面厚度上, 如图 13 所示, 厚度小, 插值计算的几何, 材料精度相对较高; 厚度大, 损失的截面交点越多, 致使几何, 材料精度都相对降低。

从时间效率上, 本文中肱骨模型和立方体模型与文献^[21]中的模型具有相同的控制点坐标和节点向量空间, 在 VS2010 环境下进行时间效率(ms)的测试, 如表 2 所示, 结果显示在相同细分次数的情况下, 本文方法优于直接切片的方法。

3) 输出的文件格式为三维打印通用文件。本文提出的方法最后可以保存为 AMF 格式, 三维打印软件 AMFtools 直接识别。

采用直接切片的方法, 可以作为三维彩色喷墨的原始数据, 但目前市场上的三维打印设备并不能

直接识别。

表 2 两种方法的时间效率比较

Tab. 2 Comparison of time efficiency of two methods

细分 次数	测试时间/ms			
	直接切片		本文方法	
	立方体模型	肱骨模型	立方体模型	肱骨模型
10	1 798	2 028	1 019	1 080
20	8 027	9 387	7 385	8 179
30	26 763	27 519	24 866	26 605
40	58 972	61 625	56 245	60 606

5 结论

通过含有材料信息的控制点, 构建 HNURBS 体参数化模型, 对模型进行三角形网格划分以及材料插值计算, 最后成功输出 AMF 文档。本文提出的方法在时间效率, 以及几何, 材料精度方面较直接切片的方法显著提高, 但在数据文件存储中还需进一步优化文件的大小。本方法为基于 HNURBS 体参数化模型的三维打印快速成型技术提供了支持。

参考文献:

- [1] 刘红光, 杨倩, 刘桂锋, 等. 国内外 3D 打印快速成型技术的专利情报分析[J]. 情报杂志, 2013, 32(6): 40-46.
Liu Hongguang, Yang Qian, Liu Guifeng, et al. Patent Information Analysis of 3D-Printing Rapid Prototyping Technology at Home and Abroad[J]. Journal of Intelligence, 2013, 32(6): 40-46.
- [2] Mellor S, Hao L, Zhang D. Additive manufacturing: A framework for implementation[J]. International Journal of Production Economics (S0925-5273), 2014, 149(149): 194-201.
- [3] 肖阳, 李青云, 曾祥辉. 基于快速成型技术的非均质件制备工艺新方法[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 125-128.
Xiao Yan, Li Qingyun, Zeng Xianghui. The Preparation of Heterogeneous Parts Based on Rapid Prototyping Technology[J]. Machine Design and Research, 2015, 31(4): 125-128.
- [4] Jackson T R, Liu H, Patrikalakis N M, et al. Modeling and designing functionally graded material components for fabrication with local composition control[J]. Materials & Design (S0264-1275), 1999, 20(2/3): 63-75.

- [5] 郑卫国, 颜永年, 熊卓. 复合材料梯度结构组织工程支架建模方法[J]. 材料导报, 2002, 16(11): 58-61.
Zheng Weiguo, Yan Yongnian, Xiong Zhuo. Method for Modeling Multiple Material Tissue Engineering Scaffolds with Graded Structures[J]. Materials Review, 2002, 16(11): 58-61.
- [6] 吴晓军, 刘伟军, 王天然. 基于三维体素模型的功能梯度材料信息建模[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(3): 270-275.
Wu Xiaojun, Liu Weijun, Wang Tianran. Functionally Graded Material Modeling Based on 3D Voxel Models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(3): 270-275.
- [7] 刘丰, 张人佺, 陈立峰, 等. 组织工程支架三维结构点单元数据建模[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 37-42.
Zhang Feng, Zhang Renji, Chen Lifeng, et al. Material Cell Modeling of Tissue Engineering Scaffolds with 3D Structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10): 37-42.
- [8] Akhras H A, Elguedj T, Gravouil A, et al. Isogeometric analysis-suitable trivariate NURBS models from standard B-Rep models[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering (S0045-7825), 2016, 307(1): 256-274.
- [9] Hua J, He Y, Qin H. Multiresolution heterogeneous solid modeling and visualization using trivariate simplex splines[C]. ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. New York: Eurographics Association, 2004: 47-58.
- [10] Yang P, Qian X. A B-spline-based approach to heterogeneous objects design and analysis [J]. Computer-Aided Design (S0010-4485), 2007, 39(2): 95-111.
- [11] Warkhedkar R M, Bhatt A D. Material-solid modeling of human body: A heterogeneous B-spline based approach[J]. Computer-Aided Design (S0010-4485), 2009, 41(8): 586-597.
- [12] 臧婷. 基于 NURBS 的非均质实体建模方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
Zang Ting. Research on Heterogeneous Object Modeling Based on NURBS method[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [13] Ishaan V, Arivarasi A, Anand K R. 3D Printing File Format and Design for Creating Material compositions for Porous Structure[C]. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. San Francisco: WCECS, 2016: 1-8.
- [14] 刘金义, 侯宝明. STL 格式实体的快速拓扑重建[J]. 图学学报, 2003, 24(4): 34-39.
Liu Jinyi, Hou Baoming. Efficient Topological Reconstruction of Solids in STL Format[J]. Journal of Engineering Graphics, 2003, 24(4): 34-39.
- [15] 李诗平, 于永光. OBJ 文件结构分析[J]. 网络新媒体技术, 1992, 13(5): 44-48.
Li Shiping, Yu Yongguang. OBJ File Structure Analysis[J]. Journal of Network New Media, 1992, 13(5): 44-48.
- [16] ISO/ASTM 52915: Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF)[Z]. ASTM Standard F2915-12, 2013.
- [17] Paul R, Anand S. A new Steiner patch based file format for Additive Manufacturing processes[J]. Computer-Aided Design (S0010-4485), 2015, 63(1): 86-100.
- [18] Hod Lipson. AMF Tutorial: The Basics (Part 1) (AMF)[Z]. ASTM Standard F2915-12, 2013.
- [19] 林开颜, 吴军辉, 徐立鸿. 彩色图像分割方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(1): 1-10.
Lin Kaiyan, Wu Junhui, Xu Lihong. A Survey on Color Image Segmentation Techniques[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(1): 1-10.
- [20] 陈龙, 张军洋, 李郝林, 等. 面向材料反求的非均质体参数化模型构建[J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 156-164.
Chen Long, Zhang Junyang, Li Haolin, et al. Reverse-material-oriented Heterogeneous Volume Parameterization Model Construction[J]. Journal Of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 156-164.
- [21] 陈龙, 阮辰, 韩文瑜. 非均质 NURBS 体参数化模型切片算法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(10): 2431-2437.
Chen Long, Ruan Chen, Han Wenyu. Slicing Algorithm for Heterogeneous NURBS Volume Parameterization Model[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2431-2437.