

3D 矢量模型切片方案评价方法*

曾 锋¹, 杨 通², 赵枢明², 姚 山²

(1. 嘉应学院 计算机学院, 广东 梅州 514015; 2. 大连理工大学 三束教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对目前对切片方案的评价只能通过实际成品来事后检验, 提出了一种 3D 矢量模型切片方案的预测评价方法。根据封闭轮廓环点集和工程图文件两种数据类型对 3D 模型进行重建, 并计算扫描路径总长。通过 2D 逐点连线及 3D 逐层拉伸技术完全模拟实际的叠层制作过程, 得到跟切片方案相对应的具有阶梯效应的可视化模型。实验表明, 该方法可对切片数据进行快速 3D 重建及路长计算, 其结果可用于切片方案的预测评价, 有效降低了开发成本。

关键词: 3D 矢量模型; 切片; 可视化

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)09-3568-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.098

Evaluation method for slicing 3D vector model

ZENG Feng¹, YANG Tong², ZHAO Shu-ming², YAO Shan²

(1. School of Computer, Jia Ying University, Meizhou Guangdong 514015, China; 2. Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion & Electron Beams, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: To against the demerits of verifying the slicing proposal by post-estimating to finished products afterwards, this paper presented an evaluation method for the slicing proposal. It developed reconstruction algorithm of 3D vector model and path length calculation method based on two kinds of data type which were the closed contour point sets and the 2D engineering drawings. It simulated the laminated object manufacturing processes completely through plotting lines or arcs point by point and the 3D extruding layer by layer, and output the visualization model with staircase effects corresponding the different slicing proposals. Case study shows that slicing data can be reconstructed to 3D model rapidly, and the path length calculation can be used to predict total processing time. The development cost can be efficiently reduced by the valuation method.

Key words: 3D vector model; slicing; visualization

0 引言

随着 3D 打印、立体雕刻、快速成型等技术的发展及广泛应用, 3D 矢量模型(以下简称 3D 模型)的切片分层得到了国内外学者越来越多的研究和重视^[1-3]。切片是指将 3D 模型离散为一系列 2D 层片, 并获得所有层片的截面轮廓矢量信息, 输出给立体加工设备进行逐层制造, 获得成品。3D 模型无论是在 CAD 软件中生成还是由逆向工程产生, 均须经过切片处理才能转换成路径代码数据。根据所处理对象的格式不同, 切片技术分为两大类^[1,4-8]: a) 处理 3D 模型的通用数据文件, 利用曲面及曲线方程进行求交运算后输出各个层片的 2D 封闭轮廓环点集, 将点集文件转换为设备的扫描路径代码驱动设备运行, 这种方法不依赖于具体的 CAD 系统, 但是曲线拟合及方程求解具有一定的误差; b) 基于 CAD 系统的直接分层, 将 3D 模型在 CAD 系统内调用相关 API 函数自动进行布尔运算, 然后投影生成工程图模型, 直接输出一系列 2D 工程图数据给设备进行扫描制造, 这种切片方式由于直接调用 CAD 内核的布尔运算及数据拾取函数, 因此具有较高的精度。3D 模型的切片处理方案直接影响着成品的精度, 近年来不少学者对切片

方案包括文件类型、数据纠错算法、方程求解精度等方面开展了深入地研究^[9-12]。但是对切片方案缺乏事先的预测评价, 只能依赖于将 3D 模型切片后的数据输入到加工设备进行实际制作而得的成品, 由制品的表面质量来反馈切片方案是否合适。事后检验设计方案导致试制失败次数较多, 设计制作成本过高, 制约着相关技术的进一步发展和应用。

根据上述情况, 本文提出一种 3D 模型切片方案的评价方法, 对切片方案进行提前可视化预测评价。

1 3D 重建及路径总长计算

“叠层”技术的核心工艺过程是将拟制作的 3D 实体降维成一系列的 2D 层面, 每个 2D 层面具有一定的厚度, 然后进行 2D 层面的制作, 一系列的 2D 层面粘结堆垛起来即得 3D 成品。每一个 2D 层面的厚度越低, 则最终 3D 成品的表面质量越好, 但是层数太多又会导致工艺耗时过长, 严重影响生产-开发成本, 并且设备精度也不允许层厚任意小。而层厚过大则会造成 3D 成品表面出现严重的阶梯效应, 导致制作失败。3D 模型的切片方案主要受切片厚度的影响, 切片厚度的合理选取是成品表面质量和工艺耗时的矛盾焦点所在^[13]。本文的评价方

收稿日期: 2012-01-29; 修回日期: 2012-02-28 基金项目: 广东高校优秀青年创新人才培养计划资助项目(LYM10121)

作者简介: 曾锋(1980-), 男, 讲师, 主要研究方向为逆向工程数学建模、图形图像处理、CAD/CAM/CAE 一体化技术(zengfeng@jyu.edu.cn); 杨通(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人工智能; 赵枢明(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机集成制造系统、快速成型技术; 姚山(1966-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为逆向工程数学建模、计算机集成制造系统。

法在计算机中实现虚拟制造,通过逐层拉伸操作实现“叠层”制造过程的完全仿真,输出可视化 3D 成品模型,并结合扫描路长的量化计算,为切片层厚的合理选择提供一套解决方案。

1.1 基于封闭轮廓环点集的 3D 重建及路长计算

切片方式的一种输出类型是一系列的 2D 封闭轮廓的坐标点集,此类切片所得的路径数据完全脱离 CAD 系统,其坐标值由二进制或 ASCII 码等类型数据保存,可由程序直接读取。基于封闭轮廓环点集的 3D 重建算法流程如图 1 所示。其中 q 为层号, $q(\{1, 2, \dots, n\})$, 共有 n 层; p 为当前层上的点号, $p(\{1, 2, \dots, m\})$, 共有 m 个点, 层厚为 h , 3D 模型总高 $H = n \times h$, 初始化 $q = 1, p = 1$ 。

目前的路径插值拟合技术以及设备的运动控制系统均使用细小直线段或圆弧段来逼近任意曲线。上述算法通过识别路径代码中的坐标值和相邻两点的连线方式(圆弧段或直线段)进行逐点扫描,并结合逐层拉伸方式完全模拟实际的“2D 路径扫描然后 3D 逐层叠加”制作过程。扫描路长根据当前为直线段还是圆弧分两种情况进行计算:

a) 当前识别为直线段 Line 时,当前的 p 点(x_p, y_p)与 $p-1$ 点(x_{p-1}, y_{p-1})的路径长度为

$$L_p = \sqrt{(x_p - x_{p-1})^2 + (y_p - y_{p-1})^2} \quad (1)$$

b) 当前识别为圆弧 Arc 时,圆心 O 点由路径代码数据获得,坐标为(x_{p0}, y_{p0}),则路径长度即为弧长 $L_p = R\alpha$, 其中 α 为圆心角 $\alpha \in (0, 2\pi)$, R 为半径,有

$$R = \sqrt{(x_p - x_{p0})^2 + (y_p - y_{p0})^2} \quad (2)$$

若圆弧旋转方向使得 $\alpha < \pi$, 如图 2(a) 所示,则

$$\alpha = 2\arcsin\left(\frac{\sqrt{(x_p - x_{p-1})^2 + (y_p - y_{p-1})^2}}{2\sqrt{(x_p - x_{p0})^2 + (y_p - y_{p0})^2}}\right) \quad (3)$$

若圆弧旋转方向使得 $\alpha > \pi$, 如图 2(b) 所示,则

$$\alpha = 2\pi - 2\arcsin\left(\frac{\sqrt{(x_p - x_{p-1})^2 + (y_p - y_{p-1})^2}}{2\sqrt{(x_p - x_{p0})^2 + (y_p - y_{p0})^2}}\right) \quad (4)$$

当前第 q 层上的封闭轮廓环的 2D 路长为 $L_q = \sum_{p=1}^m L_p$, 整个 3D 轮廓路径总长为 $L = \sum_{q=1}^n L_q$ 。

1.2 基于工程图模型的 3D 重建及路长计算

工程图是 CAD 系统提供的一种可直接用于驱动设备的 2D 矢量模型。目前有一部分“叠层”制作技术直接利用一系列层片的工程图来实现设备的驱动运作。DXF 为标准图形交换文件格式,利用 DXF 模型作为中间桥梁可将 2D 工程图文件转换为可进行拉伸操作的截面轮廓草图模型。定义 q 为层号, $q \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。 $q = 1$ 为最底层的工程图模型,共有 n 层 2D 工程图模型;层厚为 h , 3D 模型总高 $H = n \times h$, 路径总长 L 初始化为 0。基于工程图模型的 3D 重建及路长计算方法如下

a) 初始化 $q = 1$, 输入第 q 层工程图文件。

b) 将第 q 层工程图模型转换成第 q 层 DXF 模型。

c) 在 3D 模型空间中的当前基准面上插入第 q 层 DXF 对象。DXF 对象完整保留了原始模型中的几何信息及拓扑信息,直接对 DXF 模型进行封闭轮廓环对象拾取及路长对象统计,获得第 q 层的 2D 截面轮廓草图及轮廓线长度 L_q 。

d) 对步骤 c) 所得的第 q 层截面轮廓进行拉伸操作,拉伸高度即为层厚 h ; $L = L + L_q$ 。

e) 判断是否到达最后一层,如未到达,则层号递增 1,即

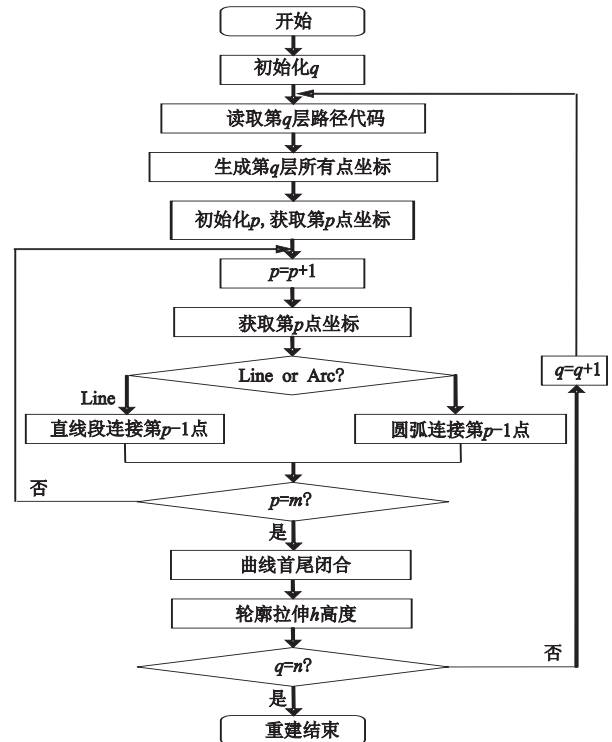


图1 基于封闭轮廓环点集的3D重建算法流程图

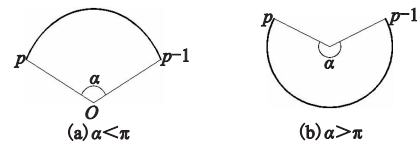


图2 扫描路径为圆弧

$q = q + 1$ if $q < n$, 然后当前基准面上移 h , 返回步骤 b) 继续重建; 如到达最后一层, 即 $q = n$, 则说明所有 2D 轮廓截面输入拉伸完毕, 进入步骤 f)。

f) 重建 3D 模型结束, 输出路长 L 。

上述过程可利用二次开发技术实现, 本文经过实验, 在多个 CAD 系统中均利用相应的 API 函数实现了基于工程图模型的 3D 重建和路长计算。

切片参数对成品表面质量的影响可通过 3D 重建算法进行可视化评价, 而路径总长则可对工艺耗时进行量化对比。工艺总耗时 T 由 $T = (L/S) + n \times T_a$ 计算。其中: S 为激光扫描速率, 由设备控制系统的参数获得, T_a 为层与层之间的工序准备耗时, 如送料、工作台升降等。通过上述两个方面的综合对比评价, 可根据具体需求选择合理的切片方案。

2 应用实例

基于轮廓封闭环点集的 3D 重建和路长计算通过 VC++ 和 OpenGL 引擎单独实现, 而基于工程图模型的 3D 重建及路长计算则通过对相关 CAD 系统的二次开发技术实现, 另外也可通过调用 CAD 软件系统的相关 API 函数进行统一编程实现上述两种算法。图 3(d)~(f) 是吊耳底座零件三种切片方案的 3D 重建结果, 切片厚度分别为 0.2、0.3 和 0.4 mm; (a)~(c) 是相应的局部放大视图; 相关参数及量化结果如表 1 所示。作为原始输入数据的封闭轮廓环点集, 其本身是按照每一个独立环进行区分的, 所以直接对每层点集中所有不连通的封闭环进行识别并调用路长算法可得到当前层的总路长。

从图 3(a)~(c) 的对比可知, 当切片厚度 $h = 0.2$ mm 时, 斜面阶梯效应较小, 成品的表面质量较高, 但是由于层数多造

成扫描路长较长,加上层与层之间的准备工序时间 T_a ,则实际制作总耗时 T 也大为增加;而当切片厚度为 0.3 mm 时,大斜面处的阶梯效应有所增加,工艺总耗时则相应减少;切片厚度为 0.4 mm 时,阶梯效应已经对表面质量产生实质性影响。成品表面质量随着切片厚度的减小而提高,而工艺耗时则相应增加,这是一对矛盾综合体。实际确定切片方案时,可根据具体的工艺成本及表面质量要求进行合理选择。对于本例,切片厚度 $h \geq 0.4$ mm 时,阶梯效应对表面质量产生不可忽视的影响,所制作的成品已无实际意义(除非另有其他特殊目的)。综合考虑制作耗时及表面质量的情况下,可选取 $h = 0.3$ mm 的切片方案。如对表面质量要求特别高而对制作耗时无太大要求的情况下,可选择切片厚度为 0.2 mm 或更小的切片方案。

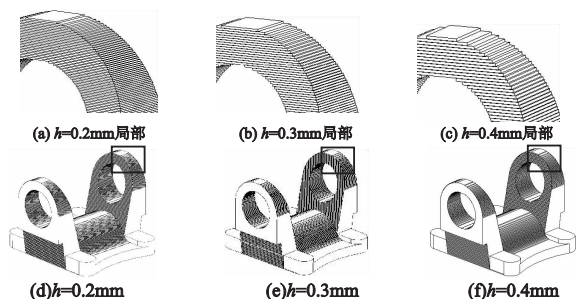


图3 吊耳底座的3D重建

表1 重建参数及计算结果(Intel Core 双核 2.50 GHz/RAM 3 GB)

H/mm	h/mm	n	L/mm	重建耗时/s
45	0.2	225	36 662	180
	0.3	150	24 459	123
	0.4	113	18 390	94

3 结束语

在目前广泛应用的“3D 打印”等立体制造技术领域中,3D 模型的离散切片是必不可少的前处理步骤,其切片方案直接影响着后续的制造过程以及成品效果。而目前只能通过事后的实际制造来对切片及工艺耗时进行评价。本文提出的评价方法可对切片方案进行制造前的预测及评价。通过引入可视化

算法及路长计算技术,实现对立体制造的完全模拟,把成品事先显示在计算机中,并对工艺耗时进行估算。上述两个方面的指标为合理选取切片方案提供了依据。大量的实例应用验证了本文所提算法的有效性及其稳定性,能减少失败次数,控制开发成本。

参考文献:

- [1] 赵吉宾,刘伟军.快速成型技术中分层算法的研究与进展[J].计算机集成制造系统,2009,15(2):209-220.
- [2] 王静亚,方亮,郝敬宾.STL模型特征面片自适应分层算法[J].计算机应用研究,2011,28(6):2361-2364.
- [3] LEE K S, KIM S H. Non-uniform deformation of an STL model satisfying error criteria[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(3): 238-247.
- [4] QIU Yan-jie, ZHOU Xiong-hui, QIAN Xiao-ping. Direct slicing of cloud data with guaranteed topology for rapid prototyping[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(1-4): 255-265.
- [5] 陈鹏飞,牟小云.基于模型几何连续性的快速成形分层算法的改进与实现[J].工程图学学报,2009,30(4):198-203.
- [6] 龚奇伟,张李超,莫健华.STL模型自动镂空的算法与应用[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(1):54-58.
- [7] 李阳,李辉.基于形状相似性的快速成型扫描算法检索实例[J].计算机工程与设计,2009,30(21):4998-5002.
- [8] 闫锋欣,侯增选,张定华,等.基于压缩体素模型的快速成型直接切片算法[J].计算机应用研究,2007,24(10):246-248.
- [9] 王正友,黄林林,张国贤.基于分层切片原理的三维雕刻算法[J].计算机应用,2011,31(2):379-382.
- [10] 马巧梅,朱林泉.快速成型系统中自适应的直接切片算法的研究[J].计算机工程与设计,2009,29(8):2075-2077.
- [11] 龚奇伟,张李超,莫健华.STL模型自动镂空的算法与应用[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(1):54-58.
- [12] ANCAU M, CAIZAR C. The computation of pareto-optimal set in multicriterial optimization of rapid prototyping processes[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(4): 696-708.
- [13] 钟山,杨永强.快速成形数据处理的分层算法[J].计算机集成制造系统,2011,17(6):1195-1120.