

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006640

基于邻层数据匹配的工业CT图像生成G代码方法*

谭川东^{1,2}, 何泳江^{1,2}, 罗雪清^{1,2}, 方 诚^{1,2}, 段黎明^{1,2}

(1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心 重庆 400044;

2. 重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044)

摘要:针对目前工业CT图像转换为3D打印G代码方法效率低的问题,提出一种基于邻层数据匹配的工业CT图像直接转换成G代码的方法。首先采用Canny算子提取工业CT图像的轮廓,然后处理轮廓分叉问题,实现邻层间几何信息数据匹配,其次进行邻层间轮廓插值以满足3D打印层间厚度要求,从而避免“阶梯效应”,最后通过填充编码得到用于3D打印的G代码。使用本文提出的方法,轮毂CT图像转换为G代码的时间为10.5 s,耗时远小于其他间接转换方法;3D打印出的轮毂无“阶梯效应”,平均尺寸误差率为0.25%。实验结果表明,该方法不涉及中间格式,转换效率高,转换误差与传统方法相当,适用于具有复杂内腔结构的零件。

关键词:工业CT图像;3D打印;G代码;邻层数据匹配;轮廓插值

中图分类号: TP391.9 TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

A G code generation method of industrial CT image based on data matching between layers

Tan Chuandong^{1,2}, He Yongjiang^{1,2}, Luo Xueqing^{1,2}, Fang Cheng^{1,2}, Duan Liming^{1,2}

(1. ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Ministry of Education Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The efficiency of traditional industrial CT image conversion to 3D printing G-code is low. To address this issue, a fast conversion method of industrial CT image to G-code based on the adjacent layer data matching is proposed. Firstly, the Canny operator is used to extract the contour edge of industrial CT image. Secondly, the contour bifurcation problem is processed to realize the geometric information data matching between adjacent layers. Thirdly, the contour interpolation between adjacent layers is carried out to meet the requirements of 3D printing layer thickness, so as to avoid the “ladder effect”. Finally, the G code for 3D printing is achieved by the filling coding. By using the proposed method, it takes 10.5 s to convert the wheel CT image into G code, which is much less than other indirect conversion methods. There is no “ladder effect” in the 3D printed wheel hub, and the average dimension error rate is 0.25%. Experimental results show that the conversion method does not involve intermediate format, and has high conversion efficiency. The conversion error is equivalent to the traditional method, which is suitable for parts with complex cavity structure.

Keywords: industrial CT image; 3D printing; G code; adjacent layer data matching; contour interpolation

0 引 言

工业计算机断层扫描(computed tomography, CT)技术利用X射线,对产品进行非接触式成像,通过获得产品内部的结构和材料细节信息,实现产品内外结构的无损

检测与评价^[1-3]。3D打印技术(3D printing)加工方式灵活,可以通过逐层打印的方式加工任何形状的零件,使得设计不再受加工工艺的局限^[4-5]。工业CT技术与3D打印技术相互结合,为工业产品的逆向设计和3D打印技术的优化提供了新的研究思路。从工业CT技术和3D打印技术的输入输出条件分析,工业CT检测获得产品的二

收稿日期:2020-07-14 Received Date: 2020-07-14

* 基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030629)资助

维或者三维 CT 图像,3D 打印以 G 代码作为输入,用于描述 3D 打印机喷头的运动轨迹。因此,将工业 CT 图像转换成 G 代码是结合两种技术的关键。目前,有两种常用的转换方法。

第 1 种方法通过 STL(stereolithography)格式作为中间格式实现转换,该方法的可移植性强、应用广泛,但是工业 CT 切片转换成 STL 格式文件的过程会产生裂缝、空洞、狭长三角形等缺陷,且转换得到的 STL 格式文件数据冗余量大,缺陷修复和网格简化需要大量的时间^[6-8]。

第 2 种转换方法以 CLI(common layer interface)作为中间格式,通过 CLI 格式文件转换规避了通过 STL 格式文件转换的缺点,但是可移植性差^[9-10]。

上述两种方法均需要借助中间格式才能完成由 CT 图像向 G 代码的转换,转换过程冗余,耗时相对较长,不适用于具有复杂内腔结构的零件。针对上述方法存在的问题,提出了一种基于邻层数据匹配的工业 CT 图像直接转换成 G 代码的方法。该方法首先提取 CT 图像的轮廓,其次进行层间数据匹配,然后进行层间轮廓插值以避免“阶梯效应”,最终得到可以用于 3D 打印的 G 代码。该方法不使用 STL 和 CLI 等中间格式,转换效率高,转换质量好,能够实现复杂内腔结构的 3D 打印 G 代码转换,模型打印实验验证了该方法的有效性。

1 轮廓提取

工业 CT 图像是由像素点组成的位图文件,通过对 CT 图像的边缘检测而得到工件的内外轮廓数据等几何信息,是邻层间轮廓插值和格式转换的基础,同时轮廓提取的效果将直接影响 G 代码的转换精度。常见的边缘检测的方法有 Roberts、Sobel、Prewitt、Canny、Otsu 等算法^[11-13]。其中,Canny 算法具有很好的信噪比和检测精度^[14]。本文采用 Canny 算法提取 CT 图像的轮廓边缘。

经过边缘提取后的切片,包含了模型的几何信息,首先对模型的几何信息进行分类,图 1 展示了图像几何信息类型和它们之间的关系。

1) 实体:实体即为待检测物体在 CT 图像中所成像的部分,即为灰度值较大的像素点集合。当 CT 图像中不止一个实体时,彼此之间是独立的。

2) 背景:背景与实体互为补集,对应 CT 图像中灰度值较小的部分。

3) 外轮廓:工件 CT 图像的外轮廓即为实体的轮廓线,与实体逐一对应,由一系列轮廓片段组成。

4) 内轮廓:内轮廓是实体和背景的交线,由一系列轮廓片段组成。

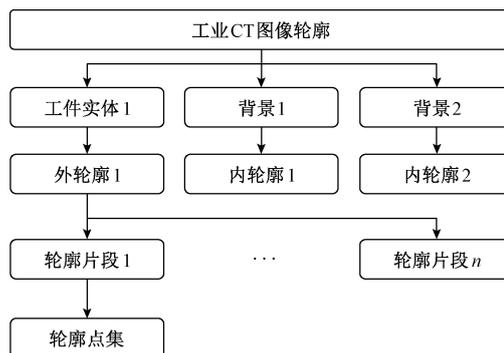


图 1 切片中的几何信息

Fig. 1 Geometric information in slices

5) 轮廓片段:轮廓片段是轮廓的子集,同一外轮廓或者内轮廓可以拆解为多个轮廓片段。

6) 轮廓点:轮廓点是组成轮廓和轮廓片段的最小单元。

7) 特征点:特征点属于轮廓点,本文中的特征点特指曲率值较大的角点。

2 邻层间数据匹配

邻层间数据匹配是保证相邻层之间的几何信息相互匹配,目标是保证每个轮廓点都能在相邻层中找到对应的轮廓点。

2.1 实体匹配

实体匹配可以通过计算相邻切片层中的实体相似性完成。实体匹配之前需要确定实体匹配的规则。

1) 重合率

相邻切片层的相似性较大,可以通过计算相邻层切片中实体的重合率实现实体匹配,从而建立相邻层切片之间的对应关系。

如图 2 所示,相邻两个切片层中分别存在实体 A 和 B,为了计算两个实体的相似性,将实体 A 投影到实体 B 所在的平面,C 表示 A 与 B 的重叠部分,A 对 B 的重合率可以表示为 $\rho_{AB} = S_C/S_A$, B 对 A 的重合率可以表示为 $\rho_{BA} = S_C/S_B$ (S 表示实体的面积)。

2) 实体匹配关系

设定重合率阈值为 ρ_θ ,实体 A 和实体 B 的重合率分别为 ρ_{AB} 和 ρ_{BA} 。

如表 1 所示,通过计算投影后实体之间的重合率,可以发现实体匹配的结果存在实体不匹配、实体半匹配和实体一对一匹配 3 种情况。当重合率和阈值为 $\{(\rho_{AB} > \rho_\theta) \& (\rho_{BA} > \rho_\theta)\}$,表示实体一对一匹配;当满足 $\{((\rho_{AB} > \rho_\theta) \& (\rho_{BA} < \rho_\theta)) \cup ((\rho_{AB} < \rho_\theta) \& (\rho_{BA} > \rho_\theta))\}$ 时,表示实体之间半匹配,实体半匹配属于一对多

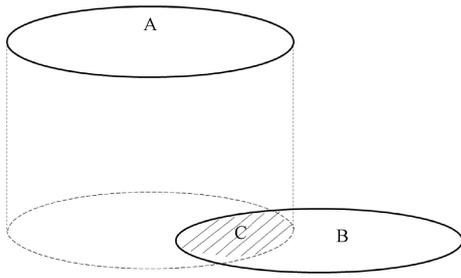


图 2 重合率示意图

Fig. 2 Diagram of coincidence rate

匹配;当满足 $\{(\rho_{AB} < \rho_\theta) \& (\rho_{BA} < \rho_\theta)\}$ 时,表示实体不匹配。阈值 ρ_θ 的大小和工业 CT 扫描的层间距相关。

表 1 重合率与实体匹配关系

Table 1 Coincidence rate and entity matching

ρ_{AB} 和 ρ_θ 的关系	ρ_{BA} 和 ρ_θ 的关系	A 和 B 匹配关系
$\rho_{AB} > \rho_\theta$	$\rho_{BA} > \rho_\theta$	一对一匹配
$\rho_{AB} > \rho_\theta$	$\rho_{BA} < \rho_\theta$	A 半匹配于 B
$\rho_{AB} < \rho_\theta$	$\rho_{BA} > \rho_\theta$	B 半匹配于 A
$\rho_{AB} < \rho_\theta$	$\rho_{BA} < \rho_\theta$	A 和 B 不匹配

如图 3 所示,相邻切片层经过边缘提取之后得到了图 3(a)、(b)两张图片,其中大写英文字母表示实体,阿拉伯数字表示轮廓。图 3(a) 中的第 K 层切片中包含实体 A 和 1~8 号 8 条轮廓,图 3(b) 所示的第 $K+1$ 层切片中包含 B~H 7 个实体和 9~16 号 8 条轮廓。分别计算实体 B~H 对 A 的重合率,发现重合率均大于设定的阈值 ρ_θ ,即 $\min\{\rho_{BA}, \rho_{CA}, \rho_{DA}, \rho_{EA}, \rho_{FA}, \rho_{GA}, \rho_{HA}\} > \rho_\theta$; 分别计算实体 A 对 B~H 的重合率,发现重合率均小于 ρ_θ ,即 $\max\{\rho_{AB}, \rho_{AC}, \rho_{AD}, \rho_{AE}, \rho_{AF}, \rho_{AG}, \rho_{AH}\} < \rho_\theta$ 。上述计算结果说明实体 B~H 均与实体 A 匹配,即一对多匹配。

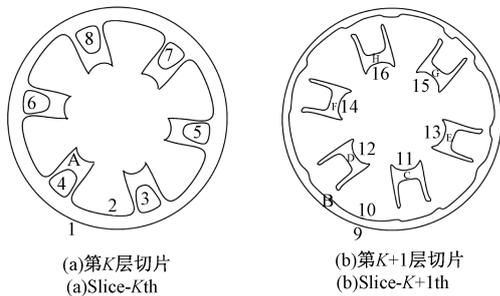


图 3 两张相邻切片的实体和轮廓

Fig. 3 Entity and contour of two adjacent slices

2.2 轮廓匹配

轮廓匹配是保证相邻层中所有的内外轮廓都能够具备对应的关系^[15-16]。轮廓匹配也可以使用重合率判断

法,判断的结果可能是一对一匹配、一对多匹配、多对多匹配。轮廓匹配需要对已匹配实体中的每条轮廓逐一判断,计算量较大,为了解决该问题,本文使用文献[16]的方法。

2.3 特征点选取

轮廓特征点可以反映轮廓的形状信息,同时决定了轮廓的变化趋势。轮廓特征点包括角点、切点和拐点 3 大类,其中角点是曲率值最大的点,容易提取,因此将角点设置为轮廓特征点^[17]。本文通过比较曲率值和阈值的大小关系确定轮廓特征点。

1) 离散点曲率

CT 切片中的轮廓是由轮廓点组成的集合,因此需要将离散点进行拟合。曲率计算方法主要包括三角形外接圆曲率法和公式曲率法 2 种,三角形外接圆曲率法简单,但是计算误差可能较大,因此本文采用公式曲率法计算离散点曲率。曲率的计算公式如下:

$$k = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{3/2}} \tag{1}$$

式中: y' 表示一阶导数; y'' 为二阶导数。

假设 $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3)$ 分别是曲线上的 3 个连续点。则 P_1 点处的一阶导数为:

$$y'_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{2}$$

二阶导数为:

$$y''_1 = \frac{y'_2 - y'_1}{x_2 - x_1} \tag{3}$$

将式(2)、(3)带入式(1),则可以计算出离散点曲率。

2) 离散曲率符号判定

曲线轮廓采用多边形进行拟合,曲率值只能反映轮廓的形状信息,但是无法表达曲线的变化方向。如图 4 所示,凸多边形 $ABCDF$ 中的 CDF 轮廓和凹多边形 $ABCDE$ 中的轮廓 CDE 的在 D 点的曲率值一致,但是二者的延伸方向刚好相反。因此,仅仅使用曲率值表达轮廓会产生二义性。

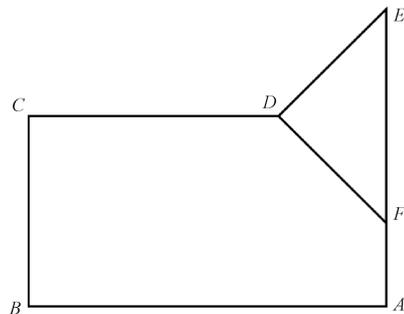


图 4 凸多边形和凹多边形

Fig. 4 Convex and concave polygons

基于上述分析,为了全面表达轮廓信息,采用带符号的离散曲率值表达轮廓曲线。例如,图4所示的凸多边形 $ABCDF$ 中轮廓线 CDF 在 D 点的曲率值为正,而凹多边形 $ABCDE$ 中轮廓线 CDE 在 D 点的曲率值为负。

采用向量积的正负判断曲率值的正负,假设轮廓曲线上3个连续点的坐标为 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3)$,得到两个连续的向量 P_2P_1 、 P_3P_2 ,将这两个向量放在三维空间中, Z 方向上的坐标全部记为0。两个向量的坐标为:

$$P_2P_1 = \{(x_2 - x_1), (y_2 - y_1), 0\} \quad (4)$$

$$P_3P_2 = \{(x_3 - x_2), (y_3 - y_2), 0\} \quad (5)$$

那么两个向量的向量积 P 为:

$$P = P_2P_1 \times P_3P_2 = \{0, 0, (x_2 - x_1) \times (y_3 - y_2) - (x_3 - x_2) \times (y_2 - y_1)\} \quad (6)$$

根据上述计算结果可以发现,向量 P 中 Z 坐标值的正负与轮廓曲率的正负刚好相反。

3) 选取特征点

轮廓特征点是曲率值较大的角点,因此首先需要求解出轮廓片段上所有轮廓点的带符号曲率值,然后根据工业 CT 图像轮廓特征和轮廓片的平均曲率值设置合适的阈值,当曲率值超过阈值,则可以判定该点为轮廓特征点。

上述过程选择出来的轮廓特征点并不一定完全正确,需要进一步优化。如图5中左图所示,当轮廓曲线上出现“尖锐凸起”状的点1时,该点的曲率值会超过设定的阈值,会被认为是特征点。但是从轮廓的整体形状,该点并没有反映轮廓的特征,不能将其作为特征点。针对这类问题,需要对轮廓边长设定一定的阈值。图5右侧图片中所标注出的点,即为最终确定的轮廓特征点。

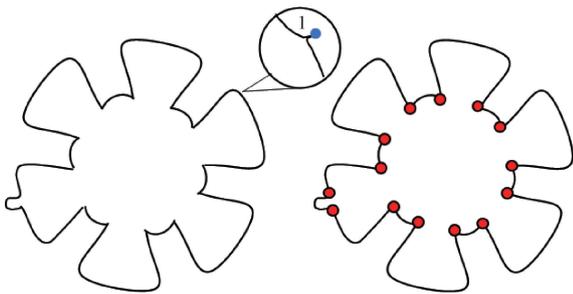


图5 轮廓特征点
Fig. 5 Contour feature points

2.4 分叉轮廓拆分

1) 分叉轮廓定义及分类

当切片上的轮廓线数与相邻层切片上的轮廓线数不相等时,就会存在轮廓分叉,将导致邻层切片之间不能实现实体匹配或者轮廓匹配,也无法建立插值点对和实现层间轮廓插值。

独立分叉和联通分叉是两种最常见的轮廓分叉情况。如图6(a)所示,第 N 层只有一个外轮廓,第 $N+1$ 层具有两个互不干扰的外轮廓,这种情况称为轮廓的独立分叉。图6(b)所示的情况为轮廓的联通分叉,其中第 N 层之间的内外轮廓不存在干扰或者交叉,而第 $N+1$ 层的内外轮廓之间发生干扰。本文将采用轮廓分裂法处理轮廓分叉的问题。

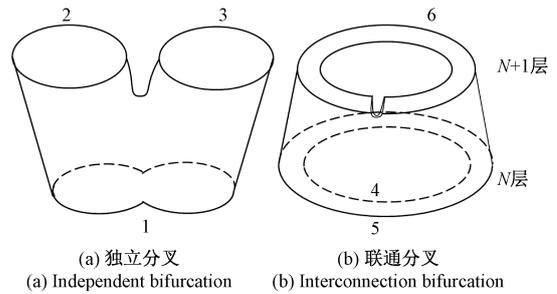


图6 独立分叉和联通分叉

Fig. 6 Independent bifurcation and interconnection bifurcation

2) 一对二分叉轮廓拆分

轮廓分裂法是通过对上层切片中的现有轮廓进行合理地拆分,使相邻两层切片的轮廓一一匹配,从而避免轮廓关系的多义性。轮廓的拆分就是在即将发生分叉的轮廓中插入一条边,其关键是插入位置的确定。

轮廓分叉本质上是由于实体发生分叉而导致的,因此解决轮廓分叉问题的本质是解决实体分叉的问题。实体逐渐分离成两个实体即为一对二分叉,分叉的地方是实体之间距离最小之处。图7展示了实体发生一对二分叉的位置,图7中 A 、 B 分别表示两个实体, a 和 b 分别是实体 A 和实体 B 最近的两个点,连接两点并做延长线到两个实体的轮廓边界,获得线段 cd 。在 ab 中取点 e ,使得:

$$\frac{ae}{eb} = \frac{ac}{bd} \quad (7)$$

然后以 e 点为圆心,适当半径做圆,圆形区域即为分叉出现的区域。

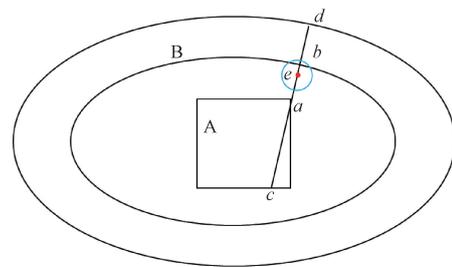


图7 分叉位置区域确定

Fig. 7 Bifurcation location determination

分叉多发生在曲率比较大的区域,因此在该区域寻找满足条件的特征点能够快速且准确的获得轮廓分叉位置信息。图 8 展示了轮廓一对二分叉的区域以及处理策略,其中 8(a) 中的放大区域就是分叉的位置区域,将左侧轮廓投影到右侧轮廓获得如图 8(b) 所示的拆分结果,其中 a 、 b 两点分别是特征点,特征点的连线就是需要插入的边。

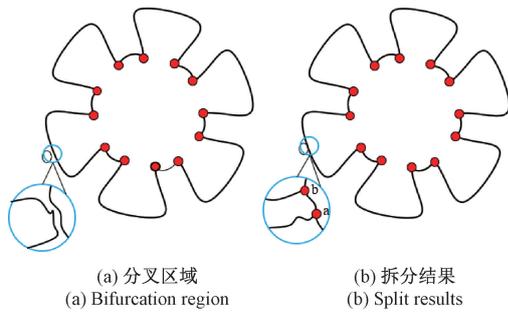


图 8 一对二分叉

Fig. 8 One to two bifurcation

3) 一对多分叉轮廓拆分

一对多分叉实质是一个实体分解为多个实体的过程,一对多分叉轮廓可以拆解为多个一对二分叉轮廓问题。出现一对多分叉问题时,首先要确定具体哪些轮廓之间存在分叉。如图 9 所示,需要判断第 L 层切片中的 $B \sim H$ 7 个实体,在第 $L+1$ 层中是否相连。由于第 L 层切片中的实体较多,因此逐一判断实体 $C \sim H$ 是否与实体 B 相连。以实体 C 和实体 B 的判别为例,首先找到两个实体之间的最近点 a 、 b ,然后投影到如图 9(b) 所示的第 $L+1$ 层上,连接两点并判断该线段是否落在了实体 A 之上,若该线段落在了实体 A 之上,则可以认为实体 B 和 C 之间是相互连接的。

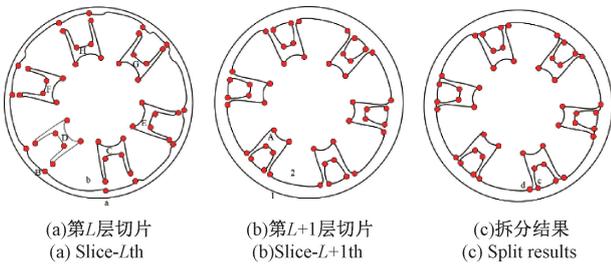


图 9 一对多分叉

Fig. 9 One to many bifurcation

根据上述分析结果可以发现,第 L 层上的实体 $C \sim H$ 都是和实体 B 相连的。确定了轮廓分叉可能发生的区域之后,然后按照一对二分叉处理的策略,逐一处理,拆分后的结果如图 9(c) 所示。

2.5 特征点匹配

完成 CT 切片中轮廓匹配后,即可进行特征点匹配。如图 10 所示,第 M 层切片中有 $a \sim l$ 特征点,第 N 层的特征点包括 $a1 \sim l1$ 、 m 、 n 。根据两组特征点的位置坐标、带符号曲率的值可以匹配相邻两层切片上面的特征点。特征点匹配后的点对分别为 $aa1 \sim ll1$ 。

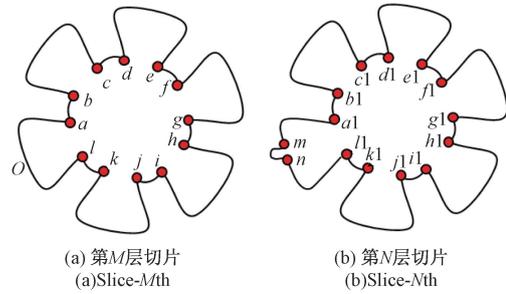


图 10 特征点匹配及片段

Fig. 10 Feature point matching and fragment

轮廓的特征点不仅可以表示轮廓信息和变化趋势,而且还可以将轮廓划分为不同的轮廓片段。两个相邻的轮廓特征点将轮廓分割为多个轮廓片段。例如,第 M 层上的特征点 a 、 b 就分割出了一个轮廓片段。

2.6 轮廓点匹配

轮廓点作为构成轮廓的最小单元,轮廓点匹配的结果是建立插值点对,使得轮廓上的点建立对应关系,以实现后续轮廓线性插值操作。轮廓点位于轮廓片段上,假设待匹配的两条轮廓片段上的轮廓点集合分别是 $P = \{p_{11}, p_{21}, \dots, p_{n1}\}$ 和 $Q = \{q_{12}, q_{22}, \dots, q_{m2}\}$, P 、 Q 两个轮廓片段上的轮廓点数分别是 n 和 m ($m < n$),由于轮廓点数不相等,不能实现一对一匹配,因此只能采用轮廓点间隙匹配的方法。假设 $k = n/m$,那么第 i 个轮廓点将与第 $[ik]$ 个轮廓点匹配。

3 层间轮廓线条插值

3D 打印技术的层间厚度往往比工业 CT 切片的层间厚度小,如果采用 CT 扫描图像的间距对工件进行 3D 打印,就会因为层间厚度过大而使得打印工件表面质量下降,粗糙度增加^[18],出现明显的“阶梯效应”。因此,为了满足 3D 打印的层间厚度要求,需要进行层间轮廓线条插值。

工业 CT 图像的轮廓层间插值可以提高相邻层间轮廓的相似性和重叠度,确保 3D 打印结果的准确性^[19]。如图 11 所示,在 b 、 u 两个相邻层之中插入了 N 层轮廓面,以第 k 层示意插值过程。根据 CT 成像原理可知,所有的 CT 切片层都是互相平行的。因此,以工业 CT 切片

所在的平面建立 O_{xy} 面,以该平面的正法线方向建立 Z 方向,从而建立坐标轴。显然,对于某一层 CT 切片的 Z 轴坐标值是相等的,而水平面坐标点 (x, y) 由轮廓点匹配之后所建立的插值点对坐标和中间层数共同决定^[20-21]。

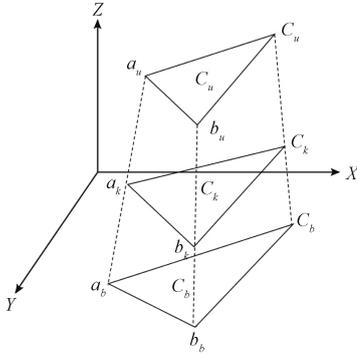


图 11 轮廓插值示意图

Fig. 11 Contour interpolation diagram

假设第 b 层和第 u 层切片中分别存在一个轮廓 C_b 和 C_u , 认定轮廓 C_b 为轮廓插值操作的起始轮廓, C_u 为终止轮廓, 在该两个相邻层之间插入 N 层轮廓面, 那么插值轮廓层间距为:

$$d = (Z_u - Z_b) / (N + 1) \quad (8)$$

式中: Z_b 和 Z_u 分别表示起始和终止轮廓的 Z 坐标值。

从起始轮廓 C_b 开始, 根据轮廓线性插值的定义, 第 k 个插值轮廓的 Z 方向坐标为:

$$Z_k = Z_b + kd \quad (9)$$

插值轮廓的准确性将决定转换后 3D 打印的质量, 因此需要保证插值轮廓与初始轮廓和终止轮廓之间具有相似性。为了量化分析轮廓之间的相似程度, 设置了相似度系数。以第 k 层的插值轮廓为例, 其与起始轮廓 C_b 的相似度系数可以表示为 S_{kb} ($0 < S_{kb} < 1$); 同理, 与终止轮廓 C_u 的相似度系数可以表示为 S_{ku} ($0 < S_{ku} < 1$)。且满足以下关系:

$$s_{ku} = (Z_k - Z_b) / (Z_u - Z_b) \quad (10)$$

$$s_{ku} + s_{kb} = 1 \quad (11)$$

求解上述两个等式, 则有:

$$s_{ku} = k / (N + 1) \quad (12)$$

$$s_{kb} = 1 - k / (N + 1) \quad (13)$$

若起始轮廓中的某一点为 $P_b(x_b, y_b)$, 其在终止轮廓的匹配点为 $P_u(x_u, y_u)$, 则插值轮廓对应的轮廓点 $P_k(x_k, y_k)$ 为:

$$\begin{cases} x_k = x_b s_{kb} + x_u s_{ku} \\ y_k = y_b s_{kb} + y_u s_{ku} \end{cases} \quad (14)$$

图 12 中使用轮毂模型进行层间轮廓线条插值实验, 实线表示原始轮廓, 虚线表示插值之后的切片轮廓。

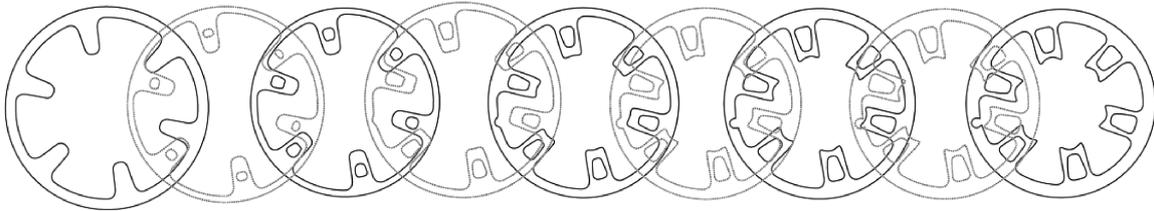


图 12 轮毂插值

Fig. 12 Hub interpolation

4 填充编码

4.1 扫描填充

3D 打印不仅需要内外轮廓数据还需要工件实体数据, 所以需要扫描线填充工件实体。扫描线模拟了 3D 打印机喷头的运动轨迹^[22-23], 从而实现实体的填充。常见的扫描路径规划方法包括往返直线扫描法、分区扫描法等。往返直线扫描方法简单可靠, 且扫描速度快, 本文采用该方法对实体进行填充。经过往返直线扫描填充后

的轮毂模型实体如图 13 所示。

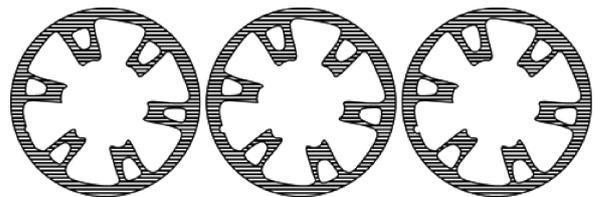


图 13 往返直线扫描法填充轮毂

Fig. 13 Filling wheel hub with round-trip linear scanning method

4.2 G 代码编码

G 代码是数控程序中的指令,规定了电动机转动速度,喷头温度,移动路径,出料速度等重要信息^[24]。3D 打印多数打印喷头移动代码遵循 NISTR274NGC G 代码标准。

表 2 是展示了常见的 G 代码指令及其含义。图 14 是轮毂模型转换成的 G 代码在专业 3D 打印仿真软件 Cura 上的显示效果。

表 2 常见 G 代码指令

Table 2 Common G code instructions

指令	含义
G00	快速移动
G01	直线插补
G02	顺圆插补
F	移动速度
X	X 坐标值
Y	Y 坐标值
Z	Z 坐标值
E	所出原料的量
M190	尾架连接使 G00 可用
M136	使能开关
M73	加工类型

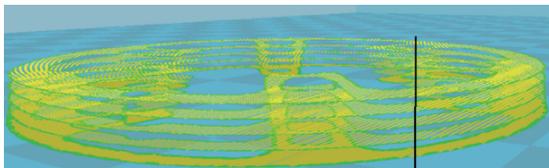


图 14 G 代码在 Cura 中仿真显示
Fig. 14 Simulation of G code in Cura

5 实例打印分析

针对本文所提出的方法,分别选取结构较简单的轮毂模型和具有复杂内腔的化油器模型进行打印实验验证。首先,在 Visual Studio 环境下实现了工业 CT 图像直接转换成 3D 打印 G 代码数据,并将转换后的 G 代码导入 Cura 软件进行仿真,然后采用联泰 800 型 3D 打印机, C-UV9400 加工材料打印模型。

5.1 轮毂模型分析

通过计算机断层扫描获得了如图 15 中所示的轮毂模型 CT 切片。采用本文所提出的方法,对轮毂切片的几何信息进行提取,然后进行实体、轮廓、特征点匹配等操

作,通过线性插值使得层间厚度满足 3D 打印的要求。图 15 展示了轮毂模型的转换仿真过程,图 16 是利用转换后的 G 代码,经过 3D 打印获得的打印模型。通过分析 3D 打印获得的轮毂模型,可以发现模型表面光滑,层间过渡均匀。实验结果表明,本文所提出的转换方法可行有效。

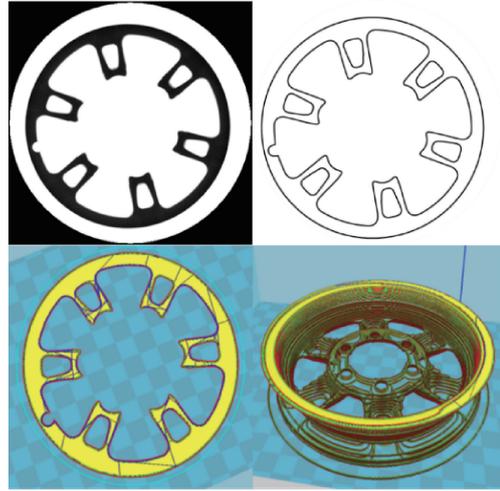


图 15 轮毂切片转换仿真显示
Fig. 15 Simulation display of hub slice conversion



图 16 3D 打印轮毂模型
Fig. 16 3D printing wheel hub model

为进一步分析本文所提出的由工业 CT 切片直接转换为 3D 打印 G 代码的方法与传统转换方法在转换效率和转换质量方面的差异。分别采用直接转换、通过 STL 转换和通过 CLI 转换 3 种方法进行 G 代码转换,并对其进行仿真分析和打印验证,获得 3 个轮毂模型的打印样件。3 种方法所对应的 G 代码转换时间和打印质量结果如表 3 所示。

表3 3种转换方式的结果比较

Table 3 Comparison of three conversion methods

转换方式	直接转换	通过 STL 转换	通过 CLI 转换
平均转换时间/s	10.5	19.3	16.6
平均尺寸误差率/%	0.25	0.24	0.25
有无阶梯效应	无	有	无

通过比较3种转换方法所对应的转换时间,以及3D打印获得的模型与理论尺寸的平均尺寸误差。可以发现本文提出的转换方法具有最高的转换效率;3种转换方法的平均误差率相当,均在0.25%左右。分析尺寸误差率造成的原因可以发现,该误差主要由于打印设备以及材料所导致的。除此之外,本文提出的直接转换法进行了层间轮廓线条插值,所以3D打印的模型中不存在“阶梯效应”。

5.2 化油器模型分析

工业零件多数具有复杂的内腔结构,CLI文件中的轮廓线均由直线段逼近表示,轮廓线互不相交,对复杂分叉问题未做具体的研究,所以较难实现具有复杂内腔结构的工件转换。STL转换方法虽然可以转换复杂的内腔模型,但是经过转换后的数据往往不符合STL规范,需要进一步优化,耗时较长。本文所提出的直接转换法对复杂分叉问题和层间插值均进行了研究,为进一步分析该方法对复杂模型的转换能力,对化油器模型进行了打印验证。

采用计算机断层扫描方法对具有复杂内腔结构的化油器模型进行成像,获得167张CT切片图,经过轮廓提取、数据匹配等操作,最终获得可以用于3D打印的G代码。图17展示了化油器切片转换成G代码的仿真过程,图18是化油器3D打印样件。3D打印的化油器模型轮廓清晰,表面光滑,不存在“阶梯效应”。实验结果表明,该方法可以实现复杂模型的转换,具有较好的通用性。

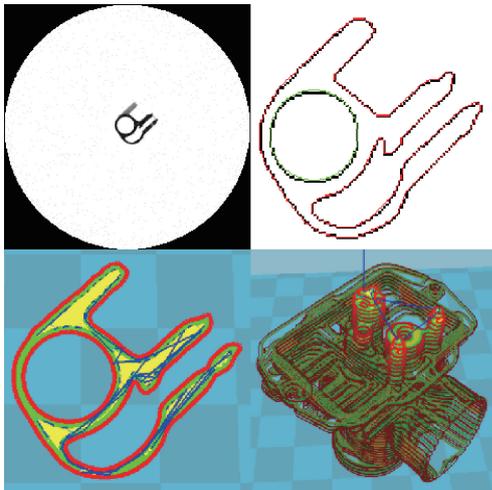


图17 化油器切片转换仿真显示

Fig. 17 Simulation display of carburetor slice conversion



图18 3D打印化油器模型

Fig. 18 3D printing carburetor model

6 结论

针对目前工业CT图像转换为G代码方法效率低、不适用于具有复杂内腔结构工件的问题,提出一种基于邻层数据匹配的CT图像直接转换成G代码的方法。该转换方法通过模型3D打印实验验证,实验表明:该直接转换方法不涉及STL、CLI等中间格式,转换效率高,且能够处理复杂的模型,具备良好的通用性,同时层间轮廓线性插值保证了模型的准确性,使得3D打印样件表面过渡平滑,无明显“阶梯效应”。

参考文献

- [1] XU J, HU S. Application of industrial CT to nondestructive testing of composite materials [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 493(1): 1-4.
- [2] 蔡玉芳,贾琳琳,王珏,等. 基于投影图像特征匹配的微纳CT焦点漂移校正[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 38-46.
CAI Y F, JIA L L, WANG J, et al. Focus drift correction of micro-nano CT based on projection image feature matching [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 38-46.
- [3] 李长春,李元金. 基于多阈值分割和B样条插值的CT图像金属伪影去除方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 128-132.
LI CH CH, LI Y J. Research on metal artifacts reduction for CT image based on multi-threshold segmentation and B-spline interpolation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 128-132.

- [4] SHELMERDINE S C, SIMCOCK I C, HUTCHINSON J C, et al. 3D printing from microfocus computed tomography (micro-CT) in human specimens: Education and future implications [J]. *British Journal of Radiology*, 2018, DOI: 10.1259/bjr.20180306.
- [5] HALEEM A, JAVAID M. Additive manufacturing applications in industry 4.0: A review [J]. *Journal of Industrial Integration and Management*, 2019, 4(4): 1-23.
- [6] 陈松茂, 白石根. 基于CAD模型外轮廓线的3D打印自适应分层算法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(2): 38-43.
CHEN S M, BAI SH G. Adaptive slicing algorithm based on contour line of cad model in 3d printing [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(2): 38-43.
- [7] KWON K, MUN D. Part recognition-based simplification of triangular mesh models for ships and plants [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(2): 1329-1342.
- [8] 段黎明, 杨尚朋, 张霞, 等. 基于遗传算法的三角网格折叠简化 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1489-1496.
DUAN L M, YANG SH P, ZHANG X, et al. Collapsing simplification of triangular mesh based on genetic algorithm [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2018, 26(6): 1489-1496
- [9] 郑卫国, 颜永年, 卢清萍, 等. 基于CT图像的快速成形数据建模方法 [J]. *中国机械工程*, 2002, 13(20): 1734-1737.
ZHENG W G, YAN Y N, LU Q P, et al. A modeling method for rapid prototyping based on CT images [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(20): 1734-1737.
- [10] 段黎明, 许万源. 工业CT切片图像直接生成快速原型层片数据 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2733-2736.
DUAN L M, XU W Y. Direct generation of rapid prototyping slice data from industrial CT images [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11): 2733-2736.
- [11] HAGARA M, KUBINEC P. About edge detection in digital images [J]. *Radioengineering*, 2018, 27(4): 919-929.
- [12] SHASHI P, SUCHITHRA R. Review study on digital image processing and segmentation [J]. *American Journal of Computer Science and Technology*, 2019, 2(4): 68-72.
- [13] 朱维斌, 刘明佩, 叶树亮. 基于邻域特性分析的小模数齿轮亚像素图像边缘检测 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(3): 148-156.
ZHU W B, LIU M P, YE SH L. Sub-pixel image edge detection based on neighborhood characteristic analysis for small modulus gear [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(3): 148-156.
- [14] ZHANG C, ZHANG J. Detection of belt longitudinal rip based on canny operator [C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, DOI: 10.1088/1755-1315/252/2/022002.
- [15] 刘晶, 张定华, 王凯, 等. 基于工业CT图像的轮廓控制点优化提取 [J]. *机械工程学报*, 2006, 42(10): 182-185.
LIU J, ZHANG D H, WANG K, et al. Optimization extraction of contour dominant points based on Industrial CT image [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(10): 82-185.
- [16] 郑津津, 王瑜, 周洪军, 等. B样条曲面重构中的轮廓匹配和分支问题 [J]. *计算机应用与软件*, 2010, 27(8): 4-6.
ZHENG J J, WANG Y, ZHOU H J, et al. Contour matching and branching in B-spline surface reconstruction [J]. *Computer Applications and Software*, 2010, 27(8): 4-6.
- [17] GIANGRECO-MAIDANA A J, LEGAL-AYALA H, SCHAEERER C E, et al. Contour-point signature shape descriptor for point correspondence [J]. *International Journal of Image and Graphics*, 2018, 18(2): 18500007.
- [18] YUAN J, CHEN C, YAO D, et al. 3D printing of oil paintings based on material jetting and its reduction of staircase effect [J]. *Polymers*, 2020, 12(11): 2536.
- [19] 王崴, 洪军, 王永银, 等. 基于断层图像的RP三维重构中层间轮廓线性插值算法 [J]. *机械工程学报*, 2006, 42(7): 170-175.
WANG W, HONG J, WANG Y Y, et al. Linear interpolation algorithm for RP 3D reconstruction on sectional images [J]. *Acta Mechanical Engineering*, 2006, 42(7): 170-175.
- [20] GUO Y, YU G. Multi-axis cross-coupled control approach based on curve interpolation [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(9): 1968-1972.
- [21] HUANG C H, LU D M, DIAO C Y. A multiscale contour based interpolation framework for generating a

- time-varying quasi-dense point cloud sequence [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2016, 17(5): 422-434.
- [22] KODA S, TANAKA H. Novel way to design the 3d printing path and its applications [J]. Springer, Cham, 2018: 290-295.
- [23] FOK K Y, GANGANATH N, CHENG C T, et al. A 3D printing path optimizer based on Christofides algorithm [C]. *Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, 2016 International Conference on IEEE, 2016, DOI: 10.1109/ICCE-TW.2016.7520990.
- [24] 余道洋. 3D 打印机 G 代码预处理优化算法 [J]. *中国机械工程*, 2019, 30(1): 85-89+112.
- YU D Y. G code preprocessing optimization algorithm for 3d printers [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 30(1): 85-89+112.

作者简介



谭川东, 2019 年于西南石油大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为工业 CT 技术与系统、金属磁记忆检测技术等。

E-mail: tcd0829@163.com

Tan Chuandong received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. He is currently a master student at Chongqing University. His main research interests include industrial CT technology and system, and metal magnetic memory testing technology.



段黎明 (通信作者), 1985 年于成都科技大学获得学士学位, 1988 年于重庆大学获得硕士学位, 1998 年于重庆大学获得博士学位。现任重庆大学教授, 博士生导师。主要研究方向为工业计算机层析成像技术及系统、精密机械及仪器等。

E-mail: duanliming163@163.com

Duan Liming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chengdu University of Science and Technology in 1985, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing University in 1988 and 1998, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Chongqing University. His main research direction are industrial computer tomography technology and system, precision machinery and instruments.