

# 智能 3D 打印路径规划算法



杨德成<sup>1</sup> 李凤岐<sup>1</sup> 王 祎<sup>2</sup> 王胜法<sup>2</sup> 殷慧殊<sup>1</sup>

1 大连理工大学软件学院 辽宁 大连 116600

2 大连理工大学国际信息与软件学院 辽宁 大连 116600

(yangdecheng@mail.dlut.edu.cn)

**摘要** 大型工业制件在增材制造中的路径规划的优劣直接影响着制造质量和效率。现阶段常用的传统 3D 打印路径规划方法存在打印头转弯堆积和打印头起落次数较多等问题,并不完全适用于大型工业制造。因此,文中提出了一种智能路径规划方法。首先,将切片后得到的二维平面进行凹多边形凸分解,形成打印子区;然后,对每个分区内部进行沿分区长轴打印以减少打印路径数量和总行程;最后,将子分区的连接视作 TSP 旅行商问题,使用遗传算法完成子分区间的打印路径规划。同时,利用 C# 语言设计开发了一套智能 3D 打印路径规划系统,该系统具有切片面输入和显示、打印宽度设置、智能路径规划和 G-code 代码输出的功能。分别与两种传统路径规划算法进行对比实验,证明了智能路径规划算法生成的路径条数、空行程距离、打印头抬起次数均有明显减少。基于子分区的智能路径规划方法为大型工业制件的增材制造过程提供了新的思路。

**关键词** 三维打印;路径规划;遗传算法;凹多边形凸分解;旅行商问题

**中图分类号** TP391

## Intelligent 3D Printing Path Planning Algorithm

YANG De-cheng<sup>1</sup>, LI Feng-qi<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, WANG Sheng-fa<sup>2</sup> and YIN Hui-shu<sup>1</sup>

1 School of Software Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116600, China

2 International School of Information Science & Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116600, China

**Abstract** The path planning of large industrial parts in additive manufacturing directly affects manufacturing quality and efficiency. At present, the commonly used traditional path planning methods have many problems, such as turning and stacking of print head and the number of rise and fall of print head, so they are not suitable for large industrial parts. Therefore, an intelligent path planning algorithm is proposed. Firstly, the two-dimensional plane obtained after slicing is concavely convexly decomposed into printing sub-areas, and then the internal long-axis scanning along the partition is performed on each sub-area to reduce the number and length of printing paths. Then, the sub-partition connection is treated as a traveling salesman problem (TSP) using genetic algorithms to complete the path planning between the sub-areas. Meanwhile, an intelligent 3D printing path planning system is designed and developed with C# language, which has the functions of slice input and display, print width setting, intelligent path planning and G-code code output. By comparing with the two traditional path planning algorithms, the proposed method significantly reduces the number of paths, the idle travel distance, and the number of print head lifts. The sub-partition-based intelligent path planning method provides a new idea for the additive manufacturing process of large industrial parts.

**Keywords** 3D Printing, Path planning, Genetic algorithm, Concave polygonal convex decomposition, Traveling Salesman Problem

## 1 引言

目前,3D 打印(增材制造)技术已在工业实际生产中得到广泛应用。3D 打印通过建模、分层、路径规划和打印堆积等步骤,在极短的时间内完成个性化零件的成型<sup>[1]</sup>。

路径规划作为 3D 打印中的一个关键环节,通过规划打印头的运动轨迹来控制整体的打印过程,对打印质量以及打印效率有着巨大的影响。现阶段常用的 Z 字型<sup>[2-5]</sup>和偏置轮廓<sup>[6]</sup>等路径规划算法,存在打印头转弯堆积、打印头起落次数较多或打印空洞较多等问题,并不适用于大型制件的增材制造过程。随着人工智能的普及,智能 3D 打印路径规划算法已经引起广泛关注。文献[7]提出的路径规划算法先进行方向平行的多边形分解以形成子区域,然后提出“往返路径规划策略”进行子区域的子路径生成,最后将子路径进行连接。文献[8]提出了一种基于蚁群算法的智能子区域路径规划方法。但以上路径规划算法在子区域划分以及区域路径连接上仍有

到稿日期:2019-07-25 返修日期:2020-01-10 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家重点研发计划子课题(2017YFB1107704);中央高校基本科研业务费(DUT19ZD209)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB1107704) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT19ZD209).

通信作者:王祎(dlutwangyi@dlut.edu.cn)

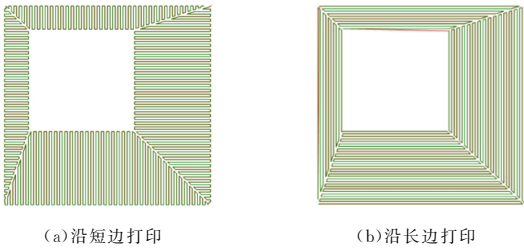


图 3 第一组对比(电子版为彩色)

Fig. 3 Comparison for group 1

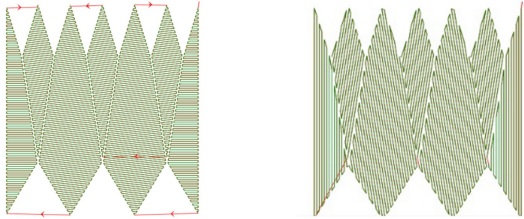


图 4 第二组对比(电子版为彩色)

Fig. 4 Comparison for group 2

表 1 最优打印角度实验数据

图形	打印方式	路径条数	空行程/mm
第一组	沿长边	80	59.2
	沿短边	312	0.3
第二组	沿长边	90	30.8
	沿短边	426	92.2

第一组为中间有孔洞的正方形,如图 3 所示,图 3(b)沿长边打印的路径条数比图 3(a)沿短边打印的路径数量减少了 74.3%,大幅度缩减路径条数使得拐点数减少。

第二组打印目标是复杂多边形,如图 4 所示。可以看出,沿长边打印的路径条数相比短边打印减少了 78%,间接减少了打印头的空行程距离。

由实验可以看出,沿分区长轴线打印的方式可以有效减少路径条数和拐点数,降低路径规划的复杂度,提高模型的表面成型质量。

### 4 子分区路径规划

子区域内部打印完成后,需要进一步对子区域间的打印路径进行优化使得总打印路径最优。由于每个子区域内部路径已经规划完成,填充打印路径有一对固定位置的进点和出点,因此也可以当作一个点代表子分区,我们称其为“子区域代表点”。

对子分区的路径规划问题可以归为经典的旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP),即在所有子区域代表点中选择一条最合适的路径,使得每个子区域代表点只被经过一次,且它们之间的连接路径最短,打印头抬起的次数最少,空行程最短。

本文采用遗传算法<sup>[10]</sup>来解决子分区的连接路径规划问题。相比于其他算法,遗传算法最大的特点是不需要事先描述问题的全部特征,利用群体搜索即可得出问题的解,下面对基于遗传算法的子区域路径规划步骤做简单介绍。

步骤 1 编码。一般的编码方式有基于二进制的编码和

基于矩阵的编码、基于邻近的编码和基于符号的编码等。对于本文提出的打印路径优化问题,直接使用路径来表示一条染色体,即使用一个整数数组,数组长度为二维切片面子分区的数量,数组中存储各个子区域编号,从下标为 0 开始逐个遍历数组元素形成的一个序列即为路径。

步骤 2 形成初始解。采用随机的方式产生若干个(种群规模)序列,即产生随机数存储在数组中。数组中的元素包含所有的子区域代表点,而且没有重复的编码。数组的个数为种群规模。

步骤 3 计算适应度。选择运算将选择算子作用于群体。在形成一定数量的可行解(染色体)后,需要对这些父代染色体进行筛选。根据生物遗传的基因的优胜劣汰原则,在筛选染色体的过程中也会秉承精英保留原则,使得优异的基因有更多的机会得到遗传。本文选择路径长度的倒数作为解的适应度,如式(1)和式(2)所示:

$$f(x) = \frac{1}{P(x)} \tag{1}$$

$$P(x) = \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}) + d(p_n, p_1) \tag{2}$$

其中,目标函数  $P(x)$  表示在遍历所有子区域代表点时产生的路径总距离,  $d(p_i, p_{i+1})$  表示路径中相邻的点  $i$  到另一个点  $i+1$  的距离。由于 TSP 的目标是路径总长度最短,属于最小值问题,因此通过取倒数来得到适应度函数。

接下来,利用“轮盘赌”算法来筛选染色体。首先计算每个染色体(路径)的长度的倒数,再计算所有路径倒数之和,用每条路径的倒数除以所有路径倒数之和即为这条路径被选中的概率(路径越短,概率就越高)。

步骤 4 交叉运算。将交叉算子作用于群体。本文选择交替位置交叉法(Alternating Position Crossover, APX)对一对染色体进行交叉操作,其基本原理如图 5 所示。

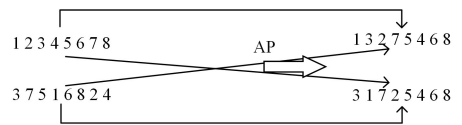


图 5 交叉原理图

Fig. 5 Cross schematic

左边为两条父代染色体,右边为子代染色体。将左上数组第一个元素放入右上数组的第一位置中,再转移到左下数组第一个元素,查看右上数组是否已经包含了该元素,如果未包含则将其插入右上数组中,否则插入右下数组中。接着从左上数组的第二个元素开始,到左下第二个元素,做与前次同样的判断操作。如此类推,直到右边两个数组都被填满。其中的交叉概率对于解的收敛速度有着重要的影响,一般选择 0.6~1,本文设置为 0.8。

步骤 5 变异运算。将变异算子作用于群体,并通过以上运算最终得到下一代群体。生物的进化,除了遗传父母的基因,自身基因也有一定的突变概率。基于这个原理,变异操作在一定的概率上是作用于染色体自身的。在该过程中采用位置倒换法对染色体上随机产生的两个位置数进行倒换。

在上述所有步骤迭代达到阈值之后停止(本文实验设置

进一步提升的空间。

本文提出了一种基于遗传算法<sup>[9]</sup>的智能子区域路径规划算法。首先采用凹多边形凸分解<sup>[10]</sup>对零件切片进行分区,然后在每个子区域内部采用沿长轴 Z 字型打印的方法进行填充,最后将各个子分区的连接问题看作 TSP 旅行商问题,使用遗传算法进行最优路径的求解。此外,本文还在所提算法的基础上,实现了一个具有切片轮廓输入、子区域划分、路径规划显示与 G-code 输出等功能的智能 3D 打印路径规划系统。

## 2 分区算法

3D 打印是一个将打印材料一层一层累加制造的过程。目前,最常用的 3D 模型的存储格式为 STL 格式,它是用三角网格来表示模型,只能描述三维物体的几何信息,不能保存颜色、材质等信息。当 STL 模型经过切片分层后,得到的每个二维截面都可能含有数量不等的孔、洞、岛屿等结构。在这种情况下,传统的打印方法,如 Z 字型打印,需要多次跨越内部的孔洞结构,这不可避免地会引起多次打印头的降速、抬起、落下等操作。这些间断打印操作次数越多,零件的打印效率就会越低。因此,有效地减少打印头的中断次数是面向包含多岛屿结构的二维截面的路径规划的重要问题<sup>[11]</sup>。

在路径规划中,对切片后的截面进行分区分割是一种减少打印头中断的方法。这种思想是将带有多岛的复杂截面轮廓分割成若干个简单的子区域,每一个小的子区域均可连续完成打印。此外,小的加工区域在某种程度上会避免由过长的直线打印路径带来的较大剪应力,进一步提升了零件的打印质量<sup>[12]</sup>。

### 2.1 基于凹多边形凸分解的分区方法

给定一个凹多边形,如何将其分解为最少个数的凸多边形是计算几何中的一个经典问题<sup>[13-14]</sup>。已经有许多研究人员对此问题进行了研究。Keil 利用基凸多边形(base convex polygon)合并的思想进行凸分解<sup>[15]</sup>,能有效地将凹多边形分解为最少个数的凸多边形,为后续的研究奠定了基础。

凹多边形凸分解的本质就是消除凹点,把复杂多边形分解成多个简单多边形。在几何学领域中,重点考查分解所得的简单多边形数量和质量是否最优,而在增材制造加工工艺中,分解后得到的凸多边形是否具有更利于打印的形态是更为关注的问题。

首先,为了避免尖角处的打印会出现堆积或空缺的情况,以及避免出现过于狭长或者畸变的凸多边形,每个多边形的内角尽量维持在  $30^\circ \sim 150^\circ$ 。其次,为了保证分区内部高效的路径填充,每个子分区应是最简多边形,即任意一条直线穿过该子分区,最多有两个交点。

本文使用基于 keli 算法进行进一步优化的 Bayazit 算法<sup>[16]</sup>来完成分区任务。Bayazit 算法是根据以下简单的观察规律逐步建立起来的:使用一个对角线可以消除两个反射顶点时比只消除一个反射顶点要好;当只有对角线连接到反射顶点的范围内时,该反射顶点才能被移除,否则角度只会变得越来越小。

### 2.2 分区算法实验

本文从 Unity Asset Store 中的 FarseerUnity 物理引擎开

源扩展插件中提取了 Bayazit 算法的开源库,并采用 OpenGL 编写实验界面。本文选取了 4 种凹多边形,采用不同的颜色来表示不同分区,结果如图 1 所示。可以看出,Bayazit 算法得到的所有的子分区都满足简单多边形的特性。

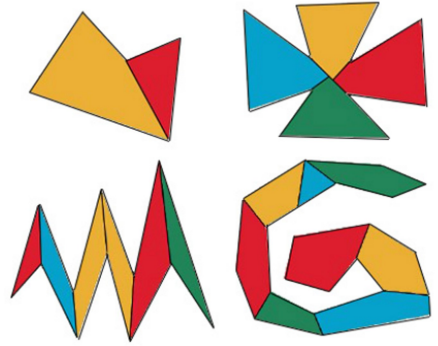


图 1 Bayazit 算法的分区实例

Fig. 1 Bayazit algorithm partition instance

## 3 分区填充算法

### 3.1 Z 字型路径角度分析

本文选择 Z 字型路径算法进行子分区内部填充。Z 字型路径主要由多条直线组成,各直线相互平行,每条直线路径结束后,打印头将降低打印速度,并改变运动轨迹,移动到下一条扫描线进行打印,如图 2 所示。

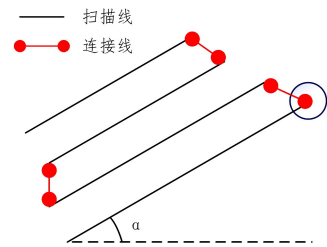


图 2 Z 字型路径拐点示意图

Fig. 2 Diagram of Zigzag-path inflection point

在打印过程中,拐角的数量越多,拐角处过填充的部分和未填充的部分越多,制件的成型质量就越差,表面就越粗糙,并且在拐角处由于打印头反复的启停和加速,也会导致打印的整体耗时增加<sup>[17]</sup>。为解决这些问题,必须减少 Z 字型路径中拐角的存在。

在 Z 字型路径中,由于两条相邻路径是互相平行的,在两条相邻路径的拐角处,两个相邻角是互补的。因此,路径的拐角角度应尽量满足接近  $\pi/2$ ,不能过大或者过小<sup>[17]</sup>。

此外,拐角的数量与打印线的角度  $\alpha$  存在直接的联系。当打印线的角度选取不同的数值时,拐点的数量也会有所不同。因此,在满足较少拐点数量的同时,还要使路径角度满足一定条件,才能设计出最优的填充路径,从而制造出表面质量较好的制件。

### 3.2 最优打印角度选择

为了尽可能满足上述两个条件,本文做了沿较长轴线打印与沿短轴线打印的对比实验,如图 3 和图 4 所示。打印采用相同路径宽度,红色路径表示空行程部分,绿色路径表示打印填充部分。具体的实验对比结果如表 1 所列。

为 400 次), 最终返回适应度高的结果。整个算法的流程如图 6 所示。

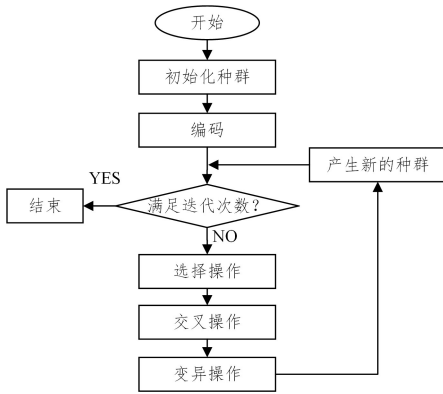


图 6 遗传算法流程图

Fig. 6 Genetic algorithm flow chart

## 5 系统设计实现与实验

### 5.1 系统概述

本文的智能 3D 打印路径规划系统使用 C# 语言开发, 主要有以下几个功能。

- 1) 导入外轮廓: 将整理好的切片面的外轮廓坐标点导入系统, 并进行预览。
- 2) 导入内轮廓: 任意一个切片面独立图形有且只有一个外轮廓, 但可以有多个内轮廓, 形成多孔洞的打印图形。
- 3) 输入打印宽度: 在 3D 打印路径规划中, 打印头出丝的宽度直接决定着打印路径的宽度, 不同的打印宽度会生成完全不同的路径规划。因此, 本系统提供打印宽度输入选项。
- 4) 调用凹多边形凸分解算法将二维切片面进行分区操作, 使得每个子分区均满足简单多边形的条件。
- 5) 调用传统的 Z 字型路径规划算法对每一个子区域进行填充, 根据每个子分区的具体形状, 选择合适的打印方向。
- 6) 通过智能的遗传算法实现各个子分区之间的路径规划。
- 7) 将通过调用以上算法最终生成的整个打印区域的路径规划图预览在主窗口上, 并进行上下左右移动以及放大缩小, 以便更好地观察路径规划的结果。
- 8) 将模拟好的路径输出为 3D 打印机可识别的 G-code 格式的代码。在 G-code 代码中默认设置了打印机的打印速度及一些相关参数, 最终输出为 file.gcode 文件并保存。

系统的导入轮廓的界面与路径规划显示界面分别如图 7、图 8 所示。

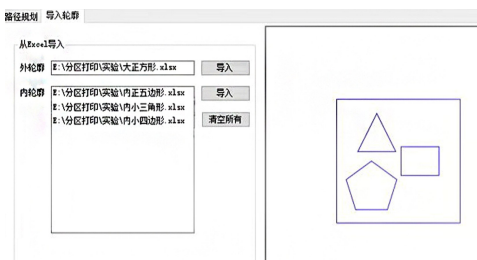


图 7 导入轮廓界面

Fig. 7 Outline input interface

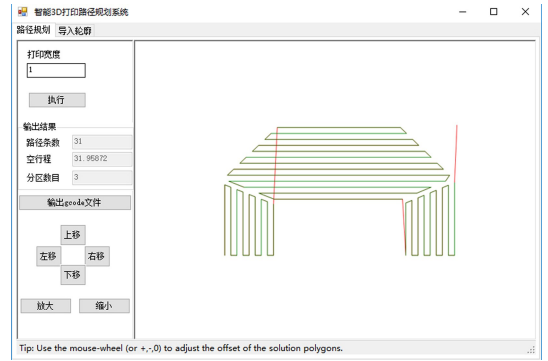


图 8 系统主界面

Fig. 8 System main interface

### 5.2 算法实验对比

为了证明上述路径规划算法的可行性, 以及系统的可操作性, 本文选取了螺母和复杂多角多边形作为打印的目标物体, 并把所提的路径规划方法同商用 3D 打印路径规划软件中最常用的 Z 字型算法 (记为 Zigzag) 和偏置轮廓算法 (记为 Offset) 进行对比。

图 9 所示为螺母的截面, 打印宽度设置为 0.4; 图 10 所示为复杂多角多边形, 打印宽度设置为 2; 打印数据如表 2 所列。对于螺母截面, 本文方法的路径条数比 Zigzag 法减少了 26%, 比 Offset 法减少了 46%, 打印头抬起次数相比两种方法分别减少了 16 次与 8 次; 对于杂多角多边形截面, 本文方法的路径条数比 Zigzag 法减少了 32%, 比 Offset 法减少了 34%, 打印头抬起次数也均有明显的减少。

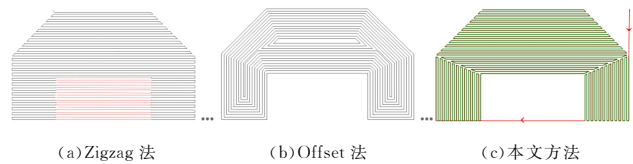


图 9 螺母截面路径对比

Fig. 9 Nut cross section path comparison

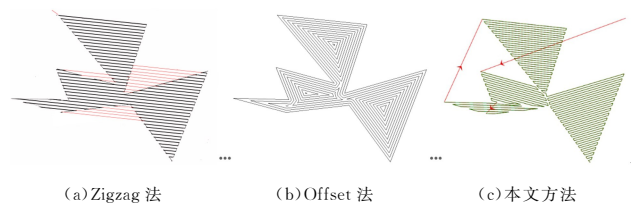


图 10 多边形截面路径对比

Fig. 10 Polygonal section path comparison

表 2 路径规划对比实验

Table 2 Path planning comparison experiment

图形	路径规划方法	路径条数	空行程/mm	打印头抬起次数
螺母	Zigzag 法	86	524	18
	Offset 法	118	87	10
	本文方法	63	33	2
多边形	Zigzag 法	132	921	21
	Offset 法	136	105	12
	本文方法	89	275	3

综合上述两个例子, 本文的智能路径规划方法对于子区

域间的优化使得打印空行程总长度和打印头抬起次数与 Z 字型方法相比大大减少。而偏置轮廓法虽然可得到较圆滑的边界轮廓以及较小的空行程距离,但是在中心部分会造成较大的空缺,影响制件的成型效果。而本文提出的智能路径规划算法生成的路径可以达到最优的填充质量。

### 5.3 实际物体打印过程

为了完整地给出本文系统的具体打印设置和流程,我们最后以一个实际物体来说明。选取一个飞镖的 3D 模型,如图 11(a)所示,将其切片分层后导入本系统进行路径规划的生成,并最终导出 G-code 文件。

在图 11(a)中,飞镖模型厚度为 15 mm,使用 slic3r 软件切片并设置高度为 1 mm 进行均匀切片,得到的二维平面飞镖模型如图 11(b)所示,将其所有的轮廓点提取出来存储为顺序点坐标,导入智能 3D 打印路径规划系统中,形成 10 个小的子区域。在该飞镖模型中,打印路径的宽度为 0.5,每层截面的路径总条数为 194 条,打印头空行程距离为 104.9 mm。从图中可以看出,本文方法生成的打印路径能够较好地还原 3D 模型切片的形状。



图 11 飞镖模型打印实例图

Fig. 11 Darts model printing example

**结束语** 目前,国内外 3D 打印技术的发展突飞猛进,但是对于打印头路径规划的智能算法并不多见。随着人工智能技术的发展,越来越多的技术开始逐渐智能化,路径规划算法也将变得更加智能。本文设计并实现了一种对分区进行智能 3D 打印路径规划的算法,并开发了相关系统。但本文工作还有很多不足之处,如还不能处理具有曲线内外轮廓物体的路径优化问题,这也将是我们下一步的研究目标。总之,本文算法为大型工业制件的增材制造过程提供了新的思路。

### 参考文献

- [1] WONG K V, HERNANDEZ A. A Review of Additive Manufacturing[J]. ISRN Mechanical Engineering, 2012, 2012: 1-10.
- [2] ASIABANPOUR B, KHOSHNVIS B. Machine path generation for the SIS process [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, 20(3): 167-175.
- [3] LANARO M, FORRESTAL D P, SCHEURER S, et al. 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 215: 13-22.
- [4] TARABANIS K A. Path planning in the proteus rapid prototyping system[J]. Rapid Prototyping Journal, 2001, 7(5): 241-252.
- [5] YANG Y, LOH H T, FUH J Y H, et al. Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufactur-

ing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2002, 8(1): 30-37.

- [6] ZHAO H S, GU F L, JORGE G, et al. Connected fermat spirals for layered fabrication [J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 1-10.
- [7] JIN Y, HE Y, FU G, et al. A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2017, 48(1): 132-144.
- [8] HAN G X, SONG X H, YIN M, et al. Path Optimization Algorithm of 3D Printing Based on Fused Deposition Modeling[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 393-401.
- [9] GREGORY G. Traveling Salesman Problem[J]. Encyclopedia of Operations Research & Management Science, 2008, 60(4): 1-12.
- [10] CHEN T. An Improved Algorithm of Cyrus-Beck Segment Clipping to Process Concave Polygon [J]. Computer Science, 2006, 33(12): 217-220.
- [11] XIONG W J. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree for the Master of Engineering [D]. Hangzhou: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [12] ZHANG Y L. Software design and algorithm optimization of multi-axis Laser Direct Metal Deposition system [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [13] KOK-WHY N, WONG Y P, HO S N. Improvement in Decimation of Triangle Meshes for Level of Detail[C]// International Conference on Geometric Modeling & Graphics. IEEE, 2003.
- [14] BAI R B. Research and Implementation of Critical Polygon Method in Two-Dimensional Irregular Parts Layout[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [15] KEIL M, SNOEYINK J. On The Time Bound for Convex Decomposition of Simple Polygons[J]. International Journal of Computational Geometry & Applications, 2002, 12(3): 181-192.
- [16] MARK BAYAZIT. Mark Bayazit's Algorithm [EB/OL]. [2019-03-25]. <https://mpen.ca/406/bayazit>.
- [17] LIN Z, FU J, HE Y, et al. A robust 2D point-sequence curve offset algorithm with multiple islands for contour-parallel tool path [J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(3): 657-670.



**YANG De-cheng**, born in 1995, M. D. His main research interests include virtual simulation manufacturing and so on.



**WANG Yi**, born in 1980, Ph.D, associate professor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include machine learning and virtual reality.