

混凝土 3D 打印连续螺旋线路径规划算法研究

刘嘉正

江苏省交通工程建设局，江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090003

摘 要： 3D 打印技术作为一种数字建造的新兴技术，将计算机技术、数控技术、材料成型技术结合在一起，以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体。由于混凝土物料特性、硬件平台功能与树脂打印工艺并不匹配，导致打印构件会出现填充不实、欠过填充现象，本文针对打印材料特点，研究适用于混凝土 3D 打印的路径规划算法。

关 键 词： 3D 打印技术；欠过填充；路径规划算法

Research on Continuous Spiral Path Planning Algorithm for Concrete 3D Printing

Liu Jiazheng

Jiangsu Provincial Transportation Engineering Bureau, Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： 3D printing technology, as an emerging digital construction technology, combines computer technology, numerical control technology and material forming technology. Based on digital model files, it uses powdery metals or plastics and other bondable materials to construct objects layer by layer through printing. Due to the mismatch between the characteristics of concrete materials, the functions of the hardware platform and the resin printing process, the printed components may have problems such as incomplete filling and underfilling. This paper studies the path planning algorithm suitable for 3D printing of concrete in light of the characteristics of the printing materials.

Keywords： 3D printing technology; underfilling; path planning algorithm

引言

3D 打印技术是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的技术^[1]。3D 打印过程包括三维设计、切片处理、完成打印等方面，是一种智能生产技术，能够实现个性化、快速化定制。目前 3D 打印通常是采用数字技术材料打印机来实现的。常在模具制造、工业设计等领域被用于制造模型，在土木工程、工业设计、航空航天、地理信息系统等领域都有所应用^[2]。利用固废制备满足性能要求的高固废掺量 3D 打印材料，不仅可以实现固废的资源化处理，而且可以获得可观的经济效益，同时 3D 打印生产技术作为一种智能、绿色、高效的建造方式，发展前景巨大，作为一种智能化加工建造方式，为所在公路工程建设提供了富有前景的发展方向^[3]。

现阶段混凝土打印路径规划算法主要沿用传统树脂打印的方法，但是由于混凝土物料特性、硬件平台功能与树脂打印工艺并不匹配，导致打印构件会出现填充不实、欠过填充现象^[4]，因此需要针对本项目采用的打印设备，以及打印材料特点，研究适用于混凝土 3D 打印的路径规划算法。

一、连续螺旋线路径规划算法研究

（一）算法概述

在混凝土 3D 打印工艺中，传统路径规划算法因存在频繁的跨孔运动或非连续跳转点，导致打印喷头被迫中断挤出过程。这一现象对树脂类材料的打印质量影响较小，但在混凝土打印中却会引发显著问题。原因在于混凝土泵送系统受机械响应滞后的影

响，启停动作存在固有延迟，难以实现瞬时精确控制。这种延迟会导致材料在启停位置过度堆积或中断，造成层间结合弱化、表面平整度下降及结构均匀性受损，最终严重影响构件的成形质量和力学性能。因此，优化填充路径的连续性设计可显著降低非连续跳转频次，从而提升打印构件的成形质量与工艺效率。

为解决上述问题，本项目采用运动轨迹具有匀速性的连续螺旋线路径规划算法，灵感来源于阿基米德螺旋线。应用于混凝土

3D 打印中,能够减少打印过程中的跳转点,没有相交重叠路径,前一路径打印完成后,选择距离其终点最近的路径起点,从而减少喷头位移时间,泵机持续工作相比传统路径规划算法可获得更连续平滑的打印效果,具有打印路径匀速、曲率变化很小、路径覆盖比高、连续无中断等优点。

在混凝土3D 打印过程中,先行打印的外围路径混凝土因水化反应加速而快速硬化,形成刚性边界框架;该框架通过空间约束效应限制内部新挤出的混凝土流变变形,显著抑制层间错位与表面起伏,最终提升构件几何精度及表层平整度。打印过程示意图,见图1。

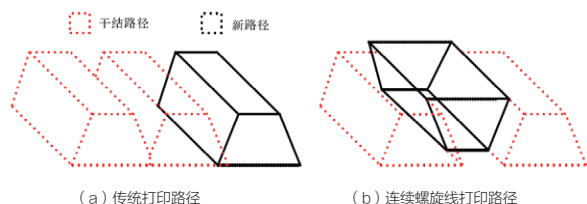


图1 连续螺旋线算法对于传统路径的改进示意图

连续螺旋线路径规划算法采用分层拓扑重构策略:首先通过凹多边形凸分解将复杂轮廓转化为简单的凸单元集;随后每个凸单元构造连续无中断的打印路径;最终通过全局连接优化实现子路径间的无缝衔接,形成高覆盖率的完整加工轨迹。

(二) 凹多边形凸分解

1. 判断该轮廓是否为凹多边形,如果轮廓是凹多边形则需要对凹多边形的凸分解,如果轮廓是凸多边形则无需经过此步骤处理。本项目基于可视点进行判断,考虑到打印路径方向,以逆时针方向遍历目标多边形轮廓顶点集内各顶点,判断各顶点凹凸性。

2. 消去多边形轮廓的凹点,将其分解为多个便于处理的凸多边形。由于常见凸分解思路(局部剖分算法、全局剖分算法)中,全局剖分算法同步分析所有可能的连接关系,使它能做出全局更优的分割决策,最终获得更好的分解效果。本项目选用全局剖分算法。

(三) 凸多边形轮廓偏置

多边形轮廓偏置的过程可归纳为:确定所有点偏移后的位置、直接按偏移点构建新线段、将这些新点有序连接成完整的新轮廓、检查偏移是否已达极限。对于带内孔的凸多边形,内孔偏移方向与外轮廓刚好相反,但偏移量计算和轮廓构建的方法是通用的。

1. 偏置点求解计算

等距缩放的目标是让图形轮廓线整体向外推出或向内缩进一个设定的距离。实际操作时不管是外推还是内收,关键步骤都是算出每个角点移动后的新位置。需要让图形的每一个角点,分别顺着原有两边垂直的方向移动规定的长度,然后找到这两条移动路径的交点,即新轮廓线需要的角点。

2. 偏置点线段的自交优化处理

在轮廓偏置过程中,由于顶点沿法向收缩位移,原本不相邻的轮廓线段可能发生交叉重叠,形成自相交区域。本项目在检测线段相交问题时,融合了快速筛选与精确判断的双重策略。首先

利用快速排斥原理对所有非相邻线段进行初步筛查:通过比较线段端点坐标范围快速排除明显不相交的情况。若某组线段在初步筛查中存在重叠可能,则进一步执行跨立验证,通过分析线段端点的位置分布关系确认是否实际相交。最终仅对通过双重验证的线段组计算精确的交点坐标。

3. 偏置层轮廓筛选

在确定偏移轮廓的关键点和交点位置后,依据这些交点将偏移后的轮廓划分为若干区域,进而通过计算分析方法检验各区域轮廓是否符合几何规则要求,若区域轮廓对应向量为逆时针方向则为有效区域,反之则为错误区域,应删除。

以图2为例,线段AB、DE对应的偏置线A'B'、C'E'相交于F'且跨立, $\overrightarrow{F'B'} \times \overrightarrow{B'C'} > 0$ 说明点集{F',B',C',D'}的区域有效, $\overrightarrow{F'E'} \times \overrightarrow{E'A'} < 0$ 说明点集{A',F',E'}的区域有效,予以删除。

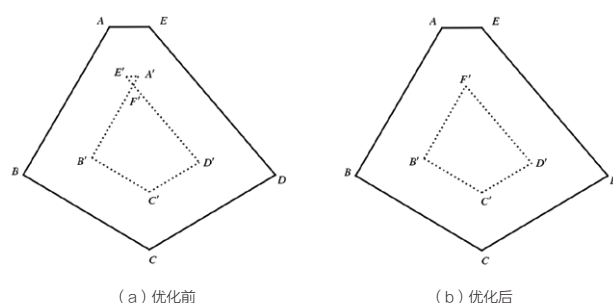


图2 偏置层线段的自交优化处理示意图

4. 偏置轮廓极限判断

本项目为避免偏移轮廓在生成过程中出现形状失真,通过计算几何中心到边界的最短距离设定临界值,将其作为轮廓有效性的校准标准。该算法首先定位轮廓的几何中心点坐标,并计算该中心点到轮廓边界的最小间距值。将此最小间距设定为关键判定基准,通过与混凝土打印喷头尺寸进行对比:当该间距值大于或等于喷头直径时,允许继续执行轮廓偏移操作;若小于喷头直径,则终止后续偏移计算流程以防止轮廓形态异常。

以图3为例,对于三角形,其中线的交点就是质心;对于多边形,可划分为n-2个三角形分别计算其质心,进而求出多边形质心。

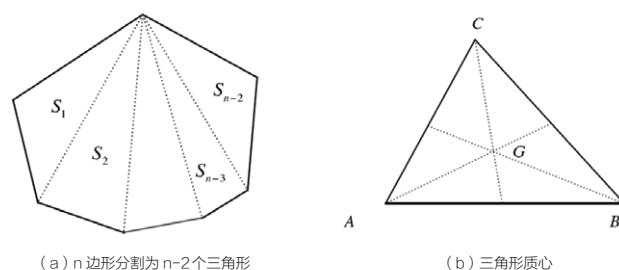


图3 图形质心计算示意图

(四) 螺旋化处理

该路径规划方法通过螺旋化改造技术处理偏移轮廓,具体包含两个阶段的单螺旋路径生成和一次连续螺旋整合。算法充分考量了混凝土材料随时间硬化的特性,遵循"先打印先固化"的成形原则。优先完成的外轮廓快速形成刚性支撑框架,后续内部填充

时已硬化部分可有效抑制结构变形与表面破损。在连续螺旋填充过程中，当第一个螺旋路径完成扫描后，其硬化形成的类夹壁结构可为相邻螺旋提供侧向支撑，同步提升填充区域的整体结构强度和几何精度。

1. 单螺旋化

螺旋化重构的关键在于重新组织相邻轮廓的衔接逻辑：首先获取偏置生成的轮廓点集，从中选定一个起始点；延伸该点所在的轮廓线段，直至与上层轮廓线相交形成连接点，此交点同时成为上层轮廓的结束位置和当前层轮廓的起始位置。同理，向下延伸当前层轮廓线即可确定与下层的衔接端点，从而实现多层轮廓线的首尾贯通，最终构建出连续无间断的螺旋路径。

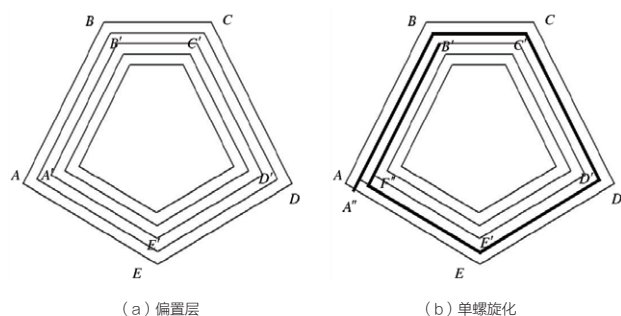


图4 单螺旋化处理示意图

2. 连续螺旋线化处理

连续螺旋路径的构建是在基础轮廓调整和单螺旋路径生成之后进行的处理阶段，其核心思路是根据实际打印需求，将完整的螺旋轨迹拆分成两个互补部分：向内收缩的填充路径和向外扩展的填充路径。

对于目标多边形轮廓（图5a），以两倍打印直径（2D）为间距生成由外至内的连续螺旋轨迹，形成向内收缩的填充路径（图5b）；随后将初始轮廓整体向内平移一个打印直径（D）的距离作为新边界，同样采用2D间距生成由内至外的扩展螺旋轨迹（图5c红色部分）；最终将两套互补的螺旋路径无缝整合，构成覆盖整个截面的连续打印方案（图5d）。

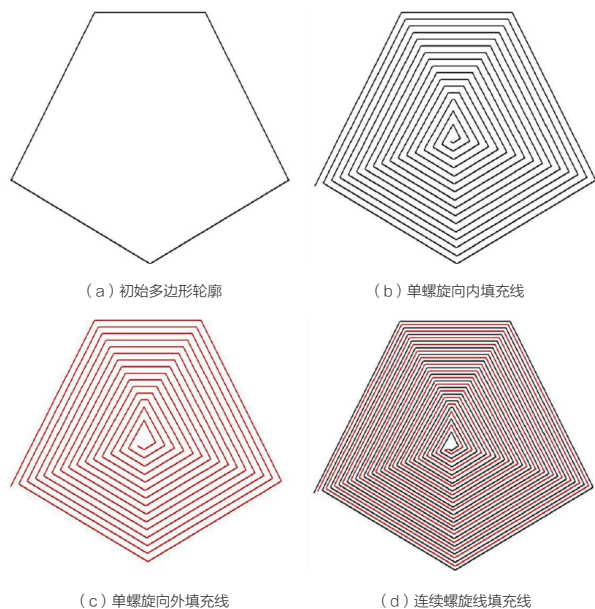


图5 连续螺旋线化处理示意图

（五）内轮廓螺旋线优化

在处理带孔洞的凸多边形轮廓偏移时，其操作过程可归纳为两个对称步骤：内部空洞边界向外扩张，同时外部主体边界向内收缩。由上文偏置轮廓极限判断可知，内外轮廓的螺旋线组数之和只与图形几何尺寸有关，为了保证内轮廓的几何尺寸和形状，本项目将内部螺旋路径的数量固定为两组。完成内外轮廓螺旋路径生成后，可能出现第二层内部螺旋线与邻近的外部螺旋线之间存在较大空白区域的情况。这种路径间隙可能导致局部填充不足，影响打印结构的连续性，见图6（a），如此打印会对构件成形质量造成影响，对其进行内切圆处理，见图6（b）。

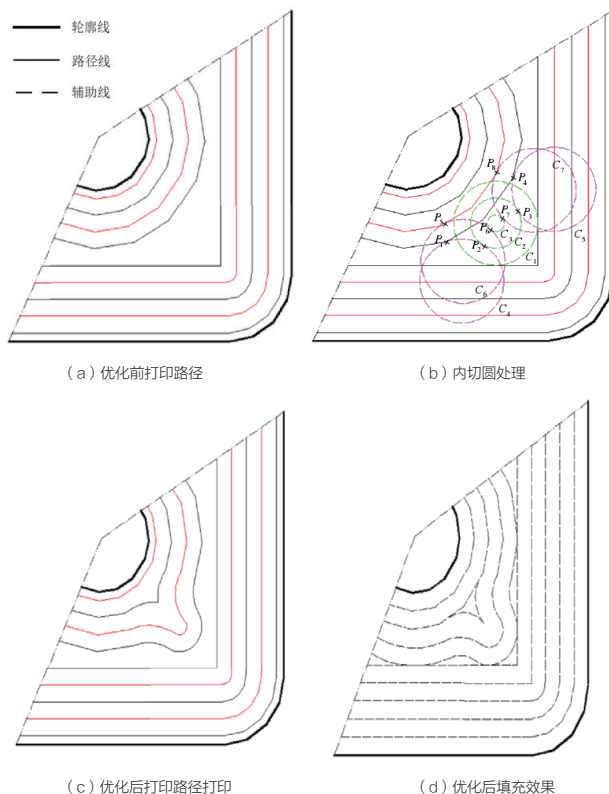


图6 内轮廓螺旋化处理示意图

二、结束语

本文提出了连续螺旋线路径规划算法，明确了该算法流程，从凹多边形凸分解、凸多边形轮廓偏置、轮廓螺旋曲线化三部分阐述实现方法。连续螺旋线路径规划算法相比传统算法，可获得更连续平滑的打印效果，打印质量和效率明显提高。

参考文献

- [1] 陈勃生. 增材制造（3D打印）应用领域发展现状及趋势[J]. 建设机械技术与管理, 2015, 28（12）：38-41.
- [2] 朱艳青, 史继富, 王雷雷, 等. 3D打印技术发展现状[J]. 制造技术与机床, 2015（12）：50-57.
- [3] 王延庆, 沈竞兴, 吴海全. 3D打印材料应用和研究现状[J]. 航空材料学报, 2016, 36（4）：89-98.
- [4] Daniel G, Bastian H, Franz G, et al. Continuous 3D printing for additive manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20（4）：320-327.