

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0196-05

# 一种新的用于选区激光熔化快速成型扫描路径的生成算法

许丽敏, 杨永强, 吴伟辉

(华南理工大学机械工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要** 在激光逐层熔化金属粉末的过程中,扫描器要做频繁的扫描运动,因此选择合理的激光扫描路径一直是此技术研究的重点问题。提出了一种称为“消隐”的扫描路径生成算法。首先依次生成每个轮廓的轮廓扫描线,由于轮廓形状可能为凸多边形也可能为凹多边形,所以在生成各轮廓的扫描线时要增加一些特殊处理操作。为了减少重复计算的次数,将截面的所有轮廓划分为一系列的单连通区域,将处理后的各轮廓的扫描线,以单连通区域为单位应用消隐法生成层扫描线。之后按照就近原则对各单连通区域内部扫描线的输出次序进行优化,即可得到分块的最终扫描线,可以直接用于加工。测试表明,此算法通用性强,生成扫描线的速度较快。

**关键词** 光学设计与制造; 选区激光熔化; 快速成型; 扫描路径; 消隐

**中图分类号** TG156.99 文献标识码 A

## A New Scanning Path Generating Algorithm Used for Selective Laser Melting Rapid Prototyping System

XU Li-min, YANG Yong-qiang, WU Wei-hui

(Institute of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract** In the process of selective laser melting of metal powder layer-by-layer, frequent scanning is carried out by the scanning system, so reasonable selection of the laser scanning path is the main problem of this technique. A scanning path generating algorithm, called “blinking” was proposed in this paper. The implementation process of the algorithm is as follows: First, the scanning lines of each contour are generated, while the contour's shape can be divided into convex polygon and concave polygon, and the generating process of the scanning lines of each contour needs special treatments. In order to decrease the number of repeat calculation, the contours can be divided into a series of simply connected region. Blinking method will be used for the contour's scanning lines to generate scanning lines of the layer by the unit of simply connected region. Afterwards, the output order of the scanning lines in the simply connected region will be optimized by the rule of adjacent, and then the blocked final scanning lines can be obtained. These final scanning lines can be used for rapid prototyping process. Test result indicates that the algorithm has a high versatility, rapid generation of the scanning lines.

**Key words** optical design and fabrication; selective laser melting; rapid prototyping; scanning path; blinking

### 1 引 言

选区激光熔化技术是采用快速成型技术的基本原理,即先在计算机上设计出零件的三维模型,通过专门的软件对三维实体模型进行分层切片,获取各截面的轮廓信息并且生成扫描路径,输入到设备中

指导扫描器运动来逐层熔化金属粉末。直接成型金属粉末是近年来国内外快速成型领域研究的热点问题,目前国外在这方面的研究已经取得了重大突破。如美国 3Dsystemes 公司以及德国 EOS 公司等已经有商品化的快速成型机出售<sup>[1,2]</sup>,在试件制作工艺

**基金项目:** 广东省自然科学基金(05006590)资助课题。

**作者简介:** 许丽敏(1982—),女,天津人,硕士研究生,主要从事激光材料成型及合成技术的研究。

E-mail: xulimin19820512@163.com

**导师简介:** 杨永强(1961—),男,河北定州人,教授,博士生导师,主要从事激光加工、快速成型及金属材料等方面的研究。

E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn

以及粉末选择方面国外一些机构也进行了深入的研究,并且有了比较大的进展。华南理工大学通过与国内一些企业合作,研制出了选区激光熔化快速成型设备。该设备采用额定功率为 100 W 的光纤激光器,光路采用后聚焦的方式,可以在加工平面上获得直径为  $30\ \mu\text{m}$  的光斑,铺粉系统采用高精度的丝杠来控制,精度能够达到  $\pm 0.01\ \text{mm}$ ,铺粉过程全自动化。由于熔化的金属粉末很容易发生氧化,因此成型过程是在通有保护气体的密闭成型室中进行的。目前已经在该设备上展开了一系列的实验,取得了比较满意的成果。

## 2 选区激光熔化设备的基本原理

选区激光熔化设备的基本原理如图 1 所示。在封闭的成型室中装有两个活塞缸,一个用于供粉,另一个用于成型。成型过程开始,供粉活塞上移一定量,铺粉辊将粉末均匀地铺在加工平面上。激光束在计算机的控制下透过激光窗口以一定的速度和能量密度扫描。激光束扫过之处,粉末熔化成一定厚度的片层,未熔化的地方仍然是松散的粉末。这样零件第一层就制造出来。这时,成型缸活塞下移一定距离,这个距离与设计零件的切片厚度一致,而供粉缸活塞上移一定距离(供粉缸的上移量稍大于成型缸的下降量,以保证有足够的粉末铺设成型缸)。铺粉辊再次将粉末铺平后,激光束开始依照设计零件第二层的信息加工。激光扫描过后,所形成的第二个层面同时也熔化在第一层上。如此反复,一个三维实体就制造出来了。

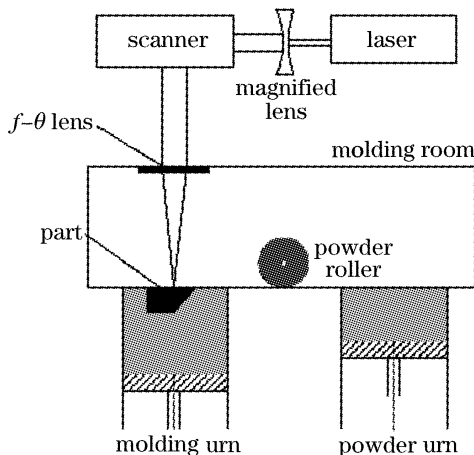


图 1 选区激光熔化设备工作原理图

Fig. 1 Operating principle of selective laser melting equipment

扫描方式的优劣以及扫描速度的大小是影响零件成型效率的关键因素,激光扫描路径的生成算法

一直是国内外快速成型领域研究的热点问题。目前的扫描路径生成算法主要有两种,一种是基于平行线扫描的路径生成算法,另一种是基于折线扫描的路径生成算法,两种算法各有优势<sup>[3~7]</sup>。本文在综合国内外快速成型扫描路径生成算法的基础上提出了一种称为“消隐”的扫描路径生成算法,它是一种基于平行线扫描方式的路径生成算法。

## 3 扫描路径生成算法的实现过程

### 3.1 基本概念

1) 凸多边形。把多边形的任意一条边向两方延长,如果多边形的其他各边都在延长所得直线的同一旁,这样的多边形叫作凸多边形。一条直线与凸多边形相交时一般有两个交点,特殊情况(与尖点相交)有一个交点。

2) 凹多边形。多边形所有顶点间两两连线时,个别顶点间的连线有不在多边形内的部分。

3) 单连通区域<sup>[8]</sup>。一个外轮廓及其所包含的内轮廓所围成的区域,内轮廓的被包含次数比外轮廓的被包含次数大 1。

4) 轮廓包围盒。能将轮廓形状包围起来的最小的矩形,一般取轮廓节点坐标中  $X, Y$  的最小值组合成一点作为包围盒的最小值点,轮廓节点坐标中  $X, Y$  的最大值组合成一点作为其最大值点。

5) “消隐”法。就是当两个多边形有重合部分时(其中一个多边形必须在另一个多边形的边界范围内),将两个图形重合部分内部的扫描线删除。如图 2 所示,轮廓 2 包含在轮廓 1 的内部,先生成轮廓 1 和轮廓 2 各自的扫描线。为保证轮廓 1 与轮廓 2 的扫描线能够重合,在生成各自轮廓的扫描线时,都从轮廓 1 的包围盒的最底部开始,生成一系列间距一定的平行线与轮廓线求交点,进而生成各轮廓的扫描线。然后将重合部分内部的扫描线删除,也就是图中阴影部分的扫描线是要被删除的部分。

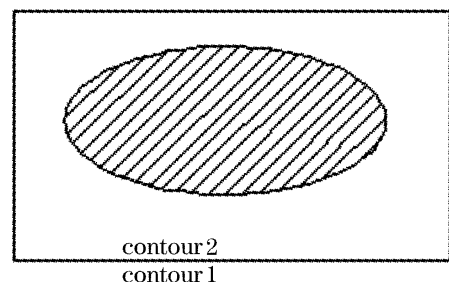


图 2 消隐法生成扫描线图示

Fig. 2 Graphic of using blanking method to generate the scanning lines

### 3.2 轮廓扫描线的生成算法

一条扫描线与凸多边形相交时,一般存在两个交点,可以连接成一条线段,当该凸多边形是外轮廓时,其内部的扫描线是要保留的部分,当其为内轮廓时,其内部的扫描线是要删除的部分,如图 3 所示。内外轮廓都为凸多边形,依据消隐法的规则,内部的扫描线是要删除的部分。

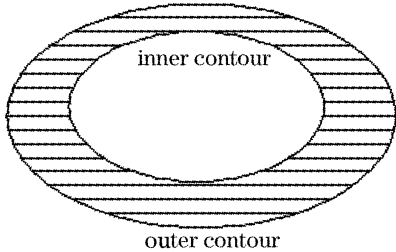


图 3 凸多边形为内外轮廓时扫描线的处理规则  
Fig. 3 Disposal rule of scanning lines when convex polygon is an outer and inner contour

扫描线在与凹多边形相交时可能存在两个或更多交点,由于多边形的轮廓数据来源于三维图形经过切片后生成的 CLI 文件中,其中的轮廓数据是有一定方向性的,外轮廓数据依逆时针方向存储,内轮廓数据依顺时针存储。扫描线在与轮廓线求交时是逐一计算扫描线与组成轮廓的所有线段的交点,然后按照求出的交点的先后顺序两两连接成线段,放入扫描线链表。如图 4 所示,假设其为外轮廓,图中的扫描线在与多边形相交时存在 4 个交点,这 4 个交点可以组成两种线段组合方式 AB,CD 以及 BC,DA,对于最终输出的扫描线我们期待得到的是 AB,CD 这种线段组合方式,因此要生成最终的扫描线还要增加一些特殊处理操作。

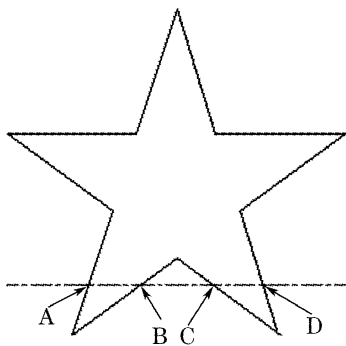


图 4 扫描线与凹多边形相交时的图示  
Fig. 4 Graphic of the scanning line is crossing with an concave polygon

当凹多边形为外轮廓,且扫描线中出现 BC,DA 线段组合时,DA 将被打断成两段,即 AB,CD 两条线段,这个规则叫作外轮廓的自减运算法则。也就是外轮廓扫描线出现重合部分时较长的线段将会被

打断,重新生成两条新的线段,原来的扫描线链表中有重合关系的两线段将会被删除,将新生成的两条线段存入扫描线链表的结尾。当然,如果凹多边形为外轮廓,扫描线中出现 AB,CD 这样的线段组合时将不执行自减操作。

如图 4 所示图形,当其为内轮廓时,图中的扫描线在与轮廓线相交时也会出现两种线段组合方式 AD,CB 和 DC,BA。其中 DC,BA 是所期望的线段组合方式,当出现 AD,CB 这样的线段组合方式时,将重合部分的线段放入一个临时的扫描线链表,原来的 AD 扫描线继续保留在原来的扫描线链表中。这个规则叫作内轮廓的反自减运算法则。同样,如果出现 DC,BA 这样的线段组合方式,反自减运算法则将不会被执行。

### 3.3 单连通区域的划分

划分单连通区域的目的是减少重复计算的次数,提高程序运行的速度。此外本算法在处理一些层次结构比较复杂的图形时,如果不进行单连通区域的划分,在生成扫描线时会出现一些问题。划分单连通区域,首先要计算各轮廓的轮廓包围盒,然后根据包围盒之间的包含关系判断各轮廓间的包含关系,即轮廓 A 的包围盒包含轮廓 B 的包围盒,则轮廓 A 必定包含轮廓 B。依次遍历每个轮廓,计算出各轮廓被包含的次数。然后根据文献[8]中所述的方法,有多少个外轮廓环就有多少个单连通区域以及如果内轮廓 A 被外轮廓 B 所包围,且 A 的被包含次数比 B 的被包含次数仅仅大 1,那么它们为一个单连通区域。此时将内轮廓环 B 的指针添加到此连通区域中的外轮廓环链表中去。经过这样的划分,截面轮廓就被分成了若干个单连通区域。如图 5 所示,轮廓 1—8 中有 1,7 两个外轮廓,将此轮廓组分成了两个单连通区域。其中轮廓 1 的被包含次数为 0,轮廓 2—6 的被包含次数为 1,轮廓 7 的被包含次数为 2,轮廓 8 为 3,由单连通区域的划分规则

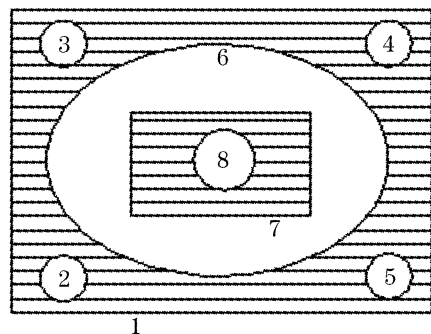


图 5 截面轮廓分组  
Fig. 5 Grouping of the cross-section contours

可知,轮廓 1—6 为一个单连通区域,7,8 为第二个单连通区域。

### 3.4 “消隐”法生成层扫描线

经过单连通区域的划分,轮廓环已被分成了一系列的组,每个单连通区域中的外轮廓及其所对应的内轮廓数据已经放入到一个链表中。此时应用消隐法对每个单连通区域内重合部分的线段进行处理,即将有重合关系的两条线段从原来的扫描线链表中删除,重新生成两条新的线段,加入到链表的结尾。如果单连通区域的内轮廓为凹多边形,除了将内外轮廓重合部分的扫描线进行消隐外,生成最终扫描线时还要将内轮廓反自减所生成的临时扫描线链表中的元素加入到最终的扫描线链表中去。

### 3.5 层扫描线的排序及输出

经过以上步骤所生成的扫描线是以单连通区域为单位的,也就是链表的节点中存储的是一个单连通区域内的扫描线,一个单连通区域内的扫描线方向是部分有序的,不能直接用于加工。所以在进行最终的扫描线输出时应用了一个规则,即扫描点就近原则。也就是在进行输出的时候先找出每个单连通区域中组成扫描线的点中  $x, y$  坐标最小的点所在的扫描线作为第一条扫描线输出,然后找到与第一条扫描线的结束点距离最近的点作为第二条扫描线的起始点,如此循环,直至将整个单连通区域的扫描线全部输出。

## 4 算法实例及验证

### 4.1 算法实例

如图 6 所示的截面,包含四个轮廓(如图 7),生成扫描线的过程如下:

1)生成轮廓 1,2,3,4 各自的扫描线。其中轮廓 1 与轮廓 2 为凸多边形[图 7(a),(b)],生成扫描线的方法较简单,只需要用等间距的平行线与轮廓线相交得到交点,连接成扫描线,存入各自的扫描线链

表即可。

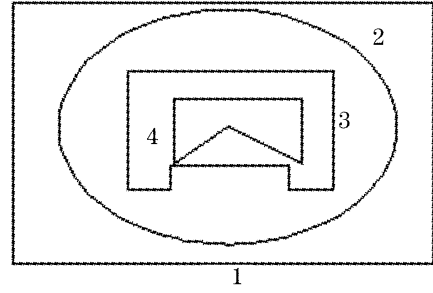


图 6 截面轮廓

Fig. 6 Cross-section's contours

2)轮廓 3 为凹多边形[图 7(c)],且为外轮廓,按照自减运算法则来生成扫描线。也就是当平行线与轮廓线相交时可能会出现一系列的类似 AB,CD 这样的线段组合方式。当出现这种情况时,线段 CD 将被打断成 BC,DA 两段,将 AB,CD 两条扫描线从扫描线链表中删除,同时将新生成的两条线段存入扫描线链表的结尾。如果在生成扫描线时出现的线段组合方式是 DA,BC,由于没有出现重合线段的情况,自减运算法则将不会执行。

3)轮廓 4 为凹多边形[图 7(d)]且为内轮廓,按照反自减运算法则来生成扫描线。当扫描线中出现 GH,EF 这样的线段组合时,GH 在原链表中的位置不变,将线段 EF 取出,放入一个临时链表中,最后将此临时链表加入到最终扫描线链表的结尾。

4)按照轮廓环分组算法对所有轮廓进行分组,图 6 所示的截面轮廓,可以分为两个单连通区域。其中 1,2 为一个单连通区域,3,4 为一个单连通区域,将轮廓 2 的扫描线链表指针加入到轮廓 1 的扫描线链表的结尾;轮廓 4 的扫描线链表的指针加入到轮廓 3 的扫描线链表的结尾。

5)应用消隐法生成每个单连通区域内的扫描线。对于轮廓 3,4 组成的单连通区域,在生成最终扫描线时还要将反自减运算所生成的类似线段 EF 的临时链表中的元素加入到最终的扫描线链表的结尾。

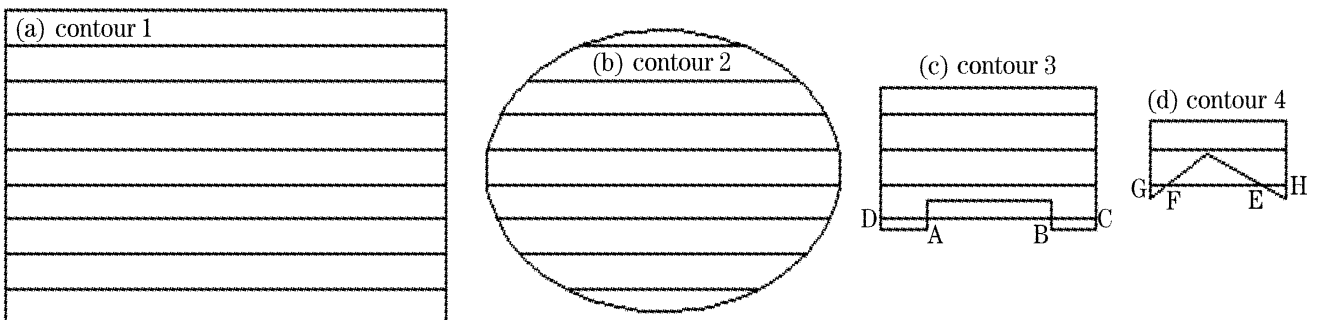


图 7 依次生成各轮廓扫描线

Fig. 7 Generate each contour's scanning line in turn

6)扫描线的排序以及输出。层扫描线的输出是以单连通区域为单位的,图6所示截面输出扫描线情况如图8所示,输出顺序为A→B→C→D→E→F,各条扫描线的方向如图8所示。

#### 4.2 算法验证

如图9(a),(c)所示截面形状,生成的扫描线如图9(b),(d)所示,其中(a)的截面形状比较复杂,图(c)的截面层次结构比较复杂,但是程序生成扫描线的速度很快,处理时间很短,说明程序的兼容性较强,对大多数图形都能处理。

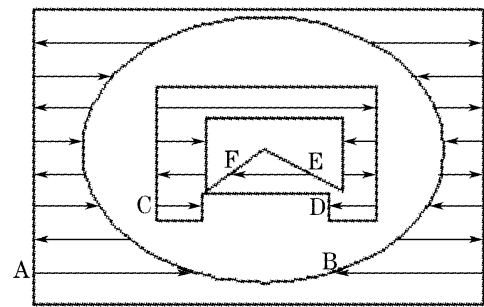


图8 截面扫描线

Fig. 8 Cross-section's scanning line

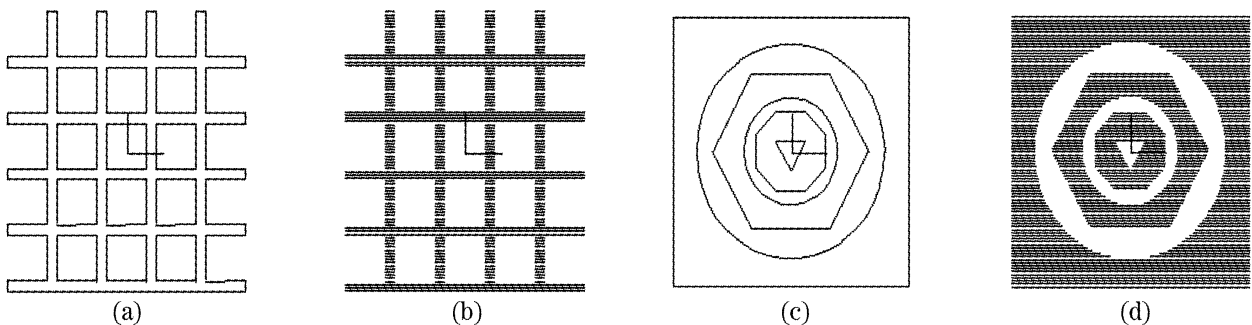


图9 截面轮廓及扫描线

Fig. 9 Cross-section's contour and it's scanning line

## 5 结 论

“消隐”法生成最终扫描线的算法简单、直观、容易理解。对截面形状以及层次结构比较复杂的图形都能处理,通用性较强,生成扫描线速度较快。在进行最终的扫描线输出时,应用了就近原则,既避免了扫描器行走空行程,提高了加工效率及扫描器的工作寿命,同时又将待扫描区域进行了划分,是快速成型领域扫描路径生成算法中的一种新思想。

### 参 考 文 献

- 1 Abbott D H, Arcella F G. Laser forming titanium components [J]. *Advance Materials & Processes*, 1998, **153**(5): 29~34
- 2 Wohlers T. Rapid Prototyping: Current technology and future potential[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 1995, **1**(1): 11~19
- 3 Wang Junjie, Li Zhanli, Lu Bingheng. Research on the laser scanning path of rapid prototyping process[J]. *Mechanical Science and Technology*, 1997, **16**(2): 303~305  
王军杰,李占利,卢秉恒. 激光快速成型加工中扫描路径的研究[J]. *机械科学与技术*, 1997, **16**(2): 303~305
- 4 Zhao Yi, Li Zhanli. Lu Bingheng. A fast laser scanning path

- generating algorithm in rapid prototyping machines[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graph*, 1998, **10**(3): 260~265
- 赵毅,李占利,卢秉恒. 激光快速成型中激光扫描路径的快速生成算法[J]. *计算机辅助设计与图形学报*, 1998, **10**(3): 260~265
- 5 Zhang Renji, Shan Zhongde, Sui Guanghua *et al.*. Study on laser scanning process of selected laser sintering for powder materials[J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(5): 299~302
- 张人佶,单忠德,隋光华等. 粉末材料的 SLS 工艺激光扫描过程研究[J]. *应用激光*, 1999, **19**(5): 299~302
- 6 Y. Yang, H. T. Loh, F. Y. H. Fuh *et al.*. Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2002, **8**(1): 30~37
- 7 Chen Jianhong, Ma Pengju, Tian Jiemo *et al.*. Scanning path algorithm for rapid prototyping (RP) based on Voronoi diagrams[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, **22**(5): 728~731
- 陈剑虹,马鹏举,田杰谟等. 基于 Voronoi 图的快速成型扫描路径生成算法研究[J]. *机械科学与技术*, 2003, **22**(5): 728~731
- 8 Cai Daosheng, Shi Yusheng, Huang Shuhuai. Grouping algorithm for contour loops in rapid prototyping technology[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2004, **32**(1): 7~9
- 蔡道生,史玉升,黄树槐. 快速成型技术中轮廓环的分组算法及应用[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2004, **32**(1): 7~9