

分形扫描路径的 规划·控制·应用

*P*lanning, Control, Applications of
Fractal Scanning Path

◎ 宾鸿赞 / 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

分形扫描路径的规划·控制·应用

Planning · Control · Applications of
Fractal Scanning Path

宾鸿赞 著

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

分形扫描路径的规划·控制·应用/宾鸿赞 著
武汉:华中科技大学出版社,2006年8月
ISBN 7-5609-3690-3

I. 分…

II. 宾…

III. 激光应用-机械制造工艺

IV. TH16

分形扫描路径的规划·控制·应用

宾鸿赞 著

责任编辑:万亚军

封面设计:刘 卉

责任校对:朱 霞

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:850×1168 1/32

印张:4.75

字数:110 450

版次:2006年8月第1版

印次:2006年8月第1次印刷

定价:12.00元

ISBN 7-5609-3690-3/TH·144

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书总结了作者及其指导的四位博士研究生在研究分形扫描规划、控制及其在选择性激光烧结(SLS)应用中所取得的成果,对分形扫描路径的生成、任意轮廓的二维平面填充、分形扫描过程中温度场和残余应力场的三维分析与显示、分形扫描路径下烧结材料的物理性状观察、分形扫描二维计算机数控(2D CNC)系统及钢丝牵引的二维扫描工作台的设计与制造、金属粉末烧结过程仿真等方面进行了详细的论述。

本书内容新颖,不仅对从事 CNC 加工、SLS 研究及应用激光进行扫描加工的工程技术人员具有启发与参考作用,也为从事分形几何研究的学者提供了应用领域与空间。

Abstract

This work presented the research fruits obtained by author together with his four PhD students in the sides of fractal scanning path planning, control and applications to selective laser sintering (SLS). The contents included: generation of fractal scanning path, fitting of 2D plan with arbitrary boundary, analysis of 3D temperature fields and 3D residual stress fields, investigation on physical performance of sintered materials under laser fractal scanning, design and manufacture of a 2D CNC system and device driven by stepping motors and steel rope transmission, and sintering process simulation for metallic powder.

As an advanced digital manufacturing technology, the work will be helpful to those who are engaging in the field of CNC machining, SLS research, laser scanning manufacturing etc. and will also promote the fractal researchers to explore their engineering applications.

前 言

20 世纪 90 年代以来,国内外在生长型制造(或称分层制造)技术领域的研究与日俱增,各种工艺方法层出不穷,大大促进了先进制造技术的发展。

分层制造技术中存在的变形大、实体强度较低等问题困扰着人们,影响了人们应用分层制造技术的积极性。研究者从工艺参数、材料、工艺方法等许多方面寻找解决问题的办法,取得了很好的效果。

作者在分析了分层制造技术的工艺过程后发现,大多数分层制造工艺都需要激光束的扫描成形,于是试图从扫描路径方面入手,改善分层制造的工艺效果。

1996 年,作者提出的“生长型制造中薄层扫描路径的分形规划与控制”课题获国家自然科学基金资助。其后,作者指导 4 名博士生相继完成有关部分的研究,取得逐步深入的成果。本书是在他们的博士学位论文的内容基础上综合而成的。

本书第 1 章主要取材于阳佳博士的学位论文《生长型制造分形扫描规划及适应性切片的研究》(2003 年);第 2 章主要取材于刘征宇博士的学位论文《生长型制造中分形扫描路径与烧结成型性能的研究》(1999 年);第 3 章和第 4 章主要取材于张小波博士的学位论文《选择性激光烧结分形扫描及激光功率控制与试验研究》(2001 年);第 5 章由在读博士生马良撰稿,总结了他已取得的相关成果。应该说,本书是作者师生的集体智慧的体现。

作者指导的访问学者、河南师范大学高宏卿同志曾参与自然科学基金项目的申请,对分形几何的数学问题的理解给了作者及其他研究人员很大的帮助;作者指导的梁伟文博士曾参与钢丝绳

牵引 2D CNC 工作台的设计、装配与调试。对他们付出的劳动,在此深表谢意。

分层制造、分形扫描等领域尚待研究的问题还很多,难度也很大,书中不妥之处,敬请广大读者指正。

作者

2005 年 12 月于华中科技大学

目 录

绪论	(1)
第 1 章 分形扫描路径规划	(4)
1.1 概述	(4)
1.2 分形简介	(5)
1.3 分形曲线的计算机生成规则及算法	(9)
1.4 任意边界薄层 FASS 分形曲线的裁剪	(13)
1.5 薄层边界几何精度评估	(21)
第 2 章 分形扫描 SLS 温度场与应力场分析	(29)
2.1 SLS 中薄层温度场数值模拟简介	(29)
2.2 三维非稳态温度场热传导理论	(34)
2.3 三维温度场等参数单元有限元计算理论	(35)
2.4 SLS 薄层非稳态温度场计算	(41)
2.5 SLS 薄层残余应力有限元数值模拟	(46)
2.6 SLS 薄层残余应力计算	(53)
第 3 章 分形扫描路径的工程实现	(59)
3.1 基于分形扫描路径的 SLS 系统的要求	(59)
3.2 典型 SLS 扫描系统的比较	(60)
3.3 基于分形扫描路径三轴系统工作台的研制	(63)
3.4 SLS 控制系统硬件的研制	(68)
3.5 SLS 控制系统软件的设计与实现	(73)
3.6 CCD 放大观测装置的设计与实现	(80)
3.7 激光烧结中激光系统的分析	(84)
3.8 烧结线宽与相关参数关系的分析	(86)
3.9 激光烧结神经网络实时控制算法	(89)

第 4 章	分形扫描路径 SLS 试验	(94)
4.1	试验条件	(94)
4.2	烧结线宽与相关参数正交试验分析	(97)
4.3	激光功率控制 BP 神经网络学习训练	(101)
4.4	激光功率神经网络控制与恒定功率控制线烧结 对比试验	(110)
4.5	选择性激光烧结线间接接分析	(116)
4.6	激光功率神经网络控制与恒定功率控制薄层 烧结对比试验	(118)
4.7	线形和分形路径扫描烧结试验	(121)
第 5 章	基于分形扫描的选择性激光烧结金属 粉末过程仿真	(123)
5.1	SLS 机理研究与仿真过程概述	(123)
5.2	有限元法分析的基本过程	(124)
5.3	选择性激光烧结金属粉末温度场、应力场、变形 的仿真模型	(125)
5.4	温度场、变形仿真结果显示	(137)

绪 论

如果把加工工具看成一个点,且按一定的路径进行扫描,则可以形成各种形状的表面(平面或曲面),称这种加工方法为点扫描成形加工方法。在这种加工方法中,扫描路径的规划与实现是至关重要的。

喷漆(spray painting)、喷涂(spray coating)、喷射成形(spray forming)、喷射清洗(spray cleaning)等加工过程都需要根据加工性能要求、加工工艺特点对喷枪扫描路径进行认真研究与规划,才能高效、高质地加工出产品。

在 CNC 加工和 CNC 抛光工序中,刀具切削刃与被加工材料的切削点在 CNC 程序控制下,按一定的扫描路径加工出工件表面。根据被加工表面的几何特性(如曲率等)和工件的加工精度、表面粗糙度的要求而高效、高质地完成加工任务,需要规划与控制加工(扫描)路径,这是一项重要的研究内容。

20 世纪末期出现的生长型制造(MIM)技术是一种分层制造(layered manufacture, LM)技术。它是采用黏结、熔结、聚合作用或化学反应等手段选择性地固化(或黏结)液体(或固体)材料,从而制造出所要求形状的零件,其最初的制造思路源于三维实体被切成一系列的薄切片的逆过程——用二维的制造方法制作一系列的薄切片,再依次堆叠成三维的零部件实体。目前,分层制造工艺有数十种,除个别的工艺(如分层实体制造(LOM)等)外,绝大部分工艺中的二维薄层制造都采用点扫描成形加工方法。如选择性激光烧结(SLS)、立体光刻(SLA)中,激光束按一定的扫描路径进行扫描生成所要求形状的二维薄层。而在熔融堆积制造(FDM)中,工作台完成扫描运动,使熔化的材料点滴堆积成二维薄层,等等。可见在分层制造领域中,扫描路径的规划与控制有着非常重

要的作用。

同样,在激光表面淬火过程中,规划与控制激光扫描路径也有重要意义。

传统上,在点扫描成形加工方法中,普遍认为面是线的集合,只要扫描点先形成一条线,再按“S”形生成第二条线、第三条线……就可以扫描出整个二维平面。这种扫描路径规划与控制比较容易实现,但扫描成形的材料薄层的物理性能并不尽如人意。

分形几何是 20 世纪有重大影响的科研成果之一,可与量子力学和相对论相提并论。分形几何认为,自然界的非规则形态,均可看成是具有无限嵌套层次的精细结构,是局部和整体按某种方式相似的结构。当分形曲线的维数大于或等于 2 时,便可由它充满平面,这些分形曲线是非自交、简单且自相似的。按照分形理论的观点,二维图形可以由两个或两个以上方向的扫描路径嵌套而成,二维图形的局部结构与二维整体结构是相似的。因此,对于按分形曲线生成的扫描路径而产生的平面,可认为该平面由若干小平面嵌套而成,是分形的集合,而不是线的集合。

日本学者研究的金属模具抛光机器人系统的分形扫描路径抛光结果与传统“S”形线扫描路径的抛光结果比较如表 0-1 所示。结果表明,采用分形扫描路径后,抛光表面粗糙度大大降低,表面均匀性大大提高。

表 0-1 抛光机器人系统的抛光结果比较

表面粗糙度 $R_z/\mu\text{m}$ 所占比例 扫描路径 %		15×10^{-2}	45×10^{-2}	75×10^{-2}	105×10^{-2}
“S”形线扫描		33	57	8.4	1.6
分形 扫描	“┐”形	90	3.4	5	1.6
	“ㄌ”形	90	10	0	0

作者及其指导的博士生采用分形扫描路径对树脂砂(铸造用砂)做 SLS 试验,并与“S”形线扫描 SLS 结果比较,其结果如表 0-2 所示。试件尺寸为 30 mm×30 mm×10 mm,烧结时用 CO₂ 激光器,最大功率为 15 W,烧结完成后,将试件置入 250℃ 烘箱中烘烤 30 min,取出后,在万能杠杆强度测试仪上进行抗压强度试验。

其中,主要试验条件为:激光光斑直径为 0.2 mm,扫描速度为 3 mm/s,扫描间距为 0.24 mm,扫描层厚为 0.2 mm,“S”形线扫描 SLS 时激光功率约为 3 W,分形扫描时为 2.5 W。

表 0-2 试件抗压强度试验结果 (单位:0.1 MPa)

试件组 扫描路径	第一组	第二组	第三组	平均值
“S”形线扫描	22.7	21.4	20.2	21.4
分形扫描	25.9	25.1	26.3	25.8

试验结果表明,分形扫描路径下烧结的试件,其平均抗压强度比“S”形线扫描的烧结件高 20% 左右,而功率也节省了约 20%。

以上列举的两个应用实例表明,分形扫描路径确实对点扫描加工方法的影响是乐观的。因此,有必要对它进行深入的研究。

鉴于分形几何作为一个数学分支有其深奥的理论,数学家们正在努力深入探索与创新。作为分形几何的工程应用,重点在如何规划、控制分形扫描路径,即选择某种既能满足工程性能要求又能应用现代工程手段(CNC 系统、机械运动装置、激光等能源装置)实现的分形曲线。本书较集中地总结了作者及其指导的博士生们在选择性激光烧结中应用分形扫描路径的研究成果,以期引起同行们、相关企业经营者们对分形扫描路径的兴趣与应用。

第 1 章 分形扫描路径规划

1.1 概 述

在选择性激光烧结(SLS)工艺中,扫描路径的规划和控制是非常重要的。传统扫描采用长线扫描方式,如图 1.1 所示,在薄层成形过程中存在收缩大、易翘曲变形、成形薄层强度低、不同方向的组织均匀性差等问题,影响了烧结件最后的物理性能,因此寻求优化的扫描路径是非常重要的。

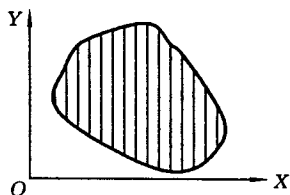


图 1.1 线性路径

经过分析发现用于 SLS 工艺中激光扫描路径的曲线应该满足以下条件:

(1) 扫描曲线必须是自回避的(或称非自交的),薄层中的任意点不允许烧结两次,否则会出现局部过烧;

(2) 扫描曲线必须均匀布满整个平面,不允许有不规则的空洞存在,否则仍会出现烧结不均匀;

(3) 在 X 轴、Y 轴两方向上分别扫描的次数要尽可能接近,以防止产生翘曲变形;

(4) 为了达到实时控制的目的,满足工程实际的需要,要尽可

能选择简单、易控制的曲线。

分形曲线中的 Peano 曲线(或称 Hilbert 曲线)能够满足上述要求。假设分形维数用 D 表示,满足条件 $1 < D < 2$ 的分形曲线是不能规则地铺满平面的,即便满足自相似的特征,里面也存在很不规则的空洞或间隙,如海岸线,其分形维数满足条件 $1 < D < 1.3$,分布的范围虽然长度方向很长,但径向范围很小。总之,分形曲线的分形维数越是趋近 2,它在二维平面上的分布范围越均匀。Peano 曲线的 $D=2$,能够通过某个正方形的所有点(也就是能够充满整个平面),且具有 FASS(space-filling, self-avoiding, simple and self-similar)的特征。笔者在不规则的分形曲线中找到了具有某种“规则”的分形曲线,为此提出一种新颖的分形扫描路径用于 SLS 工艺中。

1.2 分形简介

“分形”一词是由美国 IBM 公司研究中心物理部研究员暨哈佛大学数学系教授 Benoit B. Mandelbrot 在 1975 年首次提出的,其原意是“不规则的、分数的、支离破碎的”物体。1977 年,他出版了第一部著作《分形:形态,偶然性和维数》(*Fractal: Form, Chance and Dimension*),标志着分形理论正式诞生。5 年后,他出版了著名的专著《自然界的分形几何学》(*The Fractal Geometry of Nature*),至此,分形理论初步形成。目前,分形是非线性科学中的一个前沿课题,在不同的文献中,分形被赋予不同的名称,如“分数维集合”、“Hausdorff 测度集合”、“S 集合”、“非规整集合”、“具有精细结构集合”等等。一般地,可把分形看作大小碎片聚集的状态,是没有特征长度的图形和构造以及现象的总称。当人们用分形的观点重新审视自然物时,发现自然界中的各种各样自然形态本质上都具有分形的结构。例如:在地学方面,海岸、岛屿、山谷、河流等弯弯曲曲、凹凸不平的形状都具有分形的结构;在生物

学方面,人的肺、血管、大脑表面形状,及大多数树木、花草的分岔结构都具有分形性质;在天文学方面,天体在宇宙空间中的分布、月坑的直径分布以及作为月坑成因的陨石和小行星的大小分布也都具有分形性质;在气象学方面,空中的云块边界、雪花的表面等具有分形的结构;在物理化学方面,物体的表面、由细微粒子集聚成的凝聚体、闪电、多孔吸附材料的表面、蛋白质高分子的结构等等都具有分形性质。因此,自然界处处有分形,这从物体形态结构方面说明了自然界本质上的非线性。分形已成为一门描述自然界中许多不规则事物规律性的学科。

1.2.1 分形特征

分形虽然暂时还没有严格的定义,但按照 K. Falconer 的见解,分形如同“生命”的定义一样,是通过其典型性质来认识的:

(1) 分形具有无限嵌套层次下的精细的结构,即在任意小的尺度下,都具有复杂的结构;

(2) 分形是不规整的,它的局部和整体都不能用传统的几何语言来描述;

(3) 分形通常具有自相似形式,这种自相似可以是近似的或是统计意义下的;

(4) 分形根据其维数的定义通常具有分数维数,一般大于其拓扑维数;

(5) 大多数情况下分形可用简单的方法确定,能够由递归过程产生。

1.2.2 关于分形维数

分形集的“不规则”性使它有别于经典的光滑点集。如何来度量两个分形集的“不规则”程度呢?分形维数提供了一种用来比较分形的客观工具。分形维数是刻划分形的不变的量,是分形的极其重要的特征数。分形维数的重要性在于它们能够用数据定义,

并且能通过试验手段近似地计算。分形维数已突破一般拓扑集的整数集的限制,引进了分数维数。

1. 自相似维数

设 A 是平面上的有界子集,如果 A 可以分成 $N(>1)$ 个相等的且与 A 相似的部分,则称 A 为自相似集;如果每部分与 A 的相似比为 $r=(1/N)^{1/D_s}$, 其中

$$D_s = \frac{\log(1/N)}{\log r} = -\frac{\log N}{\log r} \quad (1.1)$$

则称 D_s 为自相似集 A 的自相似维数。

这个定义只对自相似集定义,也只有自相似集才有自相似维数。一般地,光滑的自相似集的自相似维数就等于它的拓扑维数。

2. Hausdorff 维数

Hausdorff 维数对任何点集都有意义,是最重要的维数定义。它建立在测度概念的基础上,是研究分形维数的最基本的理论工具。

设 U 是 n 维欧氏空间 $\mathbf{R}^n$ 中的任意非空子集,它的直径是指 U 内任意两点 x, y 的距离 $|x-y|$ 的上确界,用 $|U|$ 表示,即

$$|U| = \sup\{|x-y| \mid x, y \in U\}$$

如果 $\{U_i\}$ 是有限多个或可数无穷多个点集构成的点集序列,且 $\{U_i\}$ 是点集 F 的一个 δ 覆盖,那么 $F \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i$, 且对每一个 i , 都有 $0 < |U_i| \leq \delta$ 。

设 F 为 $\mathbf{R}^n$ 中的任意子集, S 为一非负实数,对任意给定的 $\delta > 0$, 设

$$h_\delta^S(F) = \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} |U_i|^S \mid \{U_i\} \text{ 为 } F \text{ 的 } \delta \text{ 覆盖} \right\} \quad (1.2)$$

考虑 F 的所有直径不超过 δ 的覆盖,并使式(1.2)右端出现的和式达到最小。当 δ 减少时, $h_\delta^S(F)$ 随着增加,当 $\delta \rightarrow 0$ 时,记极限值为

$$h^S(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} h_\delta^S(F) \quad (1.3)$$

这个极限值可以是 0 或 ∞ 。这时,称 $h^s(F)$ 为 F 的 s 维 Hausdorff 测度。从式(1.2)、式(1.3)可知,空集的 Hausdorff 测度为零;如果 $E \subseteq F$,则 $h^s(E) \leq h^s(F)$ 。

Hausdorff 测度是对长度、面积、体积概念的推广。当比例放大 λ 倍时,对于 s 维 Hausdorff 测度而言,放大倍数为 λ^s 。

对任何给定的点集 F 和 $\delta < 1$, $h_\delta^s(F)$ 对 s 是不增加的,而且,如果 $t > s$,且 $\{U_i\}$ 为 F 的 δ 覆盖,则有 $\sum_i |U_i|^t \leq \delta^{t-s} \sum_i |U_i|^s$,确定下确界后得

$$h_\delta^s(F) \leq \delta^{t-s} \sum_i |U_i|^s$$

令 $\delta \rightarrow 0$,由于 $t > s$,若 $h^s(F) < \infty$,则有 $h^s(F) = 0$ 。

这说明,存在 s 的一个临界值,使得 $h^s(F)$ 在这个值处从无穷大跃变到 0,这个临界值就称为 F 的 Hausdorff 维数,记为 $D_H(F)$,那么

$$D_H(F) = \inf\{s | h^s(F) = 0\} = \sup\{s | h^s(F) = \infty\} \quad (1.4)$$

在很多情况下,Hausdorff 维数不容易计算,其定义在于对分形数学内涵的阐明。

其他的维数定义有容量维数、信息维数和关联维数等。

1.2.3 分形与非线性科学

混沌和分形已成为非线性科学的两大理论前沿,分形和混沌有着密切关系。

有的混沌学家把混沌定义为“确定性系统的内在随机性”,这类随机性具有一个重要特性——对初始值的敏感依赖性,也就是当初始值产生微小偏差时,就会出现轨道按指数速度分离的现象。这一现象被洛伦茨比喻为“蝴蝶效应”。混沌学揭示出,自然界除了存在着有序与无序两种状态外,还存在着过渡性的第三种序——混沌序。混沌是确定性系统的内在随机性,就其随机性来说,它是无序的,但它决不是简单的无序,而更像是具备周期性

和其他明显对称特征的有序态。在理想情况下,混沌状态具有无穷的内部结构,只要有足够精密的观察手段,就可以在混沌之间发现周期或准周期运动,以及在更小的尺度上重复出现的混沌运动。混沌是自然界的一种普通运动形式。耗散系统(即具有摩擦、黏性、扩散或热传导等性质或过程的系统)由于能量的耗散而使轨迹在相空间中的相体积不断收缩,或者使不同初始条件下所确定的轨迹可能趋向于同一点集,从而形成吸引子。

分形几何是研究自然物体形态的几何学。分形几何可能为物理学研究宏观现象提供一种数学方法。分形几何与混沌理论有着不同的起源。前者起源于对不规则集合的研究,后者起源于非线性动力学的研究。混沌理论主要研究非线性动力学系统的不稳定的发散过程,但系统状态在相空间中总是收敛于一定的吸引子,这与分形的生成过程十分相似。因此,如果说混沌理论主要研究非线性系统状态在时间上演化过程的行为特征,那么分形几何则主要研究吸引子在空间上的结构。所以,它们是从不同侧面来研究同一问题的。如果把非线性动力系统看成是一个不稳定的发散过程,那么由迭代法生成分形吸引子正好是一个稳定的收敛过程。因此,有的混沌学家说,混沌是时间上的分形,而分形是空间上的混沌。在非线性科学中,分形几何就成为研究混沌学的一种重要工具。

1.3 分形曲线的计算机生成规则及算法

通常使用 Lindenmayer 方法(L 系统)和迭代函数系统(IFS)在计算机上生成分形曲线。生成 Peano 曲线用 L 系统较为方便。

L 系统是一种形式语言,它通过产生一系列字符串来构造图形或曲线,不但能描述植物,而且其构图方法可用来绘制各类有规则的分形曲线及其他形状。最简单的类型称作 D0L 系统,“D”与