

一种在铸件缺陷识别中的区域分形分割方法

谈绍熙 黄茜

(华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640)

摘要 在利用 X 射线对铸造缺陷识别的过程中, 由于 X 光图像中铸件形成的背景复杂, 传统的区域分割技术难以分割出缺陷集中的兴趣区域。利用缺陷边缘的分形特性从铸件边缘线图中确定缺陷的边缘线, 以聚类方法将缺陷边缘线聚集的区域, 即缺陷集中的兴趣区域分割出来。针对汽车铝合金轮毂铸件 X 光图像, 用铸造缺陷区域的分割实验结果证明了该方法的有效性。

关键词 图像分割 兴趣区域 分形 铸件 X 光图像

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)05-0918-06

A Fractal Based Region Segmentation Method and Its Application in Casting Defect Recognition

TAN Shao-xi, HUANG Qian

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract In casting defect recognition of an X-Ray image, due to the complex image background, it is difficult to do segmentation with traditional segmentation technology for interested regions, in which the defects are intense. In this paper, fractal feature of the edges is introduced to distinguish which edge belongs to the casting defects in an edge image and the regions containing mass defect edges, e. g. interest regions are segmented by clustering. Directed to the aluminum alloy casting of vehicle wheel X-Ray images, the fractal based region segmentation method of this paper is used for recognition experiments, and the results show that the approach is effective.

Keywords image segmentation, region of interest, fractal, casting, X-ray image

1 引言

在图像目标识别过程中, 为提高识别的准确性与快速性, 常需先将图像划分出一块或多块有意义的、包含目标的区域, 使后续目标识别算法只在这些区域上进行, 以避免在无关紧要的背景区域上消耗计算时间。这些区域通常称为“兴趣区”。在图像检测中, 兴趣区域的检测分割技术对提高目标识别效率、准确率和检测速度起着积极的作用。

兴趣区分割一般符合人的视觉特性。相关的视觉研究表明, 人类视觉神经生理学中有两种高级活

动规律^[1]: 扩散与集中。其中集中的作用表现在突出感兴趣区域和抑制无关区域, 目的在于简化甚至忽略无关的区域, 使人脑在视觉处理过程中着重分析和处理最主要的兴趣区域。基于这一原理, 兴趣区的分割已广泛应用于机器视觉中的目标识别。

许多学者在兴趣区的提取方法上做了大量研究, 但各种已有算法在轮毂 X 光缺陷图像的处理应用中, 却达不到理想的分割效果。本文采用分形维数确定缺陷边缘, 估算缺陷较为集中的区域, 并将这些区域从原图中分割出来作为兴趣区。实验结果表明, 该方法能很好地分割铸件 X 光图像中缺陷集中的兴趣区域。

基金项目: 广东省科技计划项目(2004B10201035)

收稿日期: 2006-09-06; 改回日期: 2006-12-26

第一作者简介: 谈绍熙(1981 ~), 男, 华南理工大学电子与信息学院硕士研究生。主要研究方向为模式识别和图像处理。E-mail: tanshaoxi@163.com

2 问题的提出

在工业检测中对 X 光图像缺陷的寻找与评判要求准确快捷,实际中二者却往往是一对矛盾。以轮毂铸件的 X 光图像为例,为清晰分辨并定性分析铸造缺陷,要求图像分辨率比较高,且所获得图像大小一般为 540×540 像素。使用异性扩散模型、snake 模型等边缘提取方法虽有利于对缺陷的寻找与定性分析,但这类算法需迭代运算,处理分辨率大的 X 光图像耗时相当长,不适于工业自动生产线上的实时检测;使用传统的分割算法分割轮毂铸件 X 光图像虽可缩短处理时间,但准确率不高。其效果不理想的原因主要在于轮毂 X 光图像具有如下的特点:

(1) 缺陷灰度没有明显的规律性,其灰度值直接受缺陷所在的位置和缺陷形状及大小的影响,且一般缺陷相对比较细小,各种阈值方法均难以将其准确和完全地分割出来;

(2) 不同缺陷的边缘、乃至同一缺陷边缘的梯度变化较大,易受噪声影响,prewitt、sobel 等边缘检测算法难以找到完整的缺陷边缘;

(3) 轮毂结构复杂,不同的产品以及轮毂不同部位的结构、厚度均不一致,加之轮毂上的文字标识、铸造气孔、工艺铁线等异常结构,使得依靠分辨工件结构来产生缺陷定位非常困难。图 1 是轮毂铸件的 X 光图像。

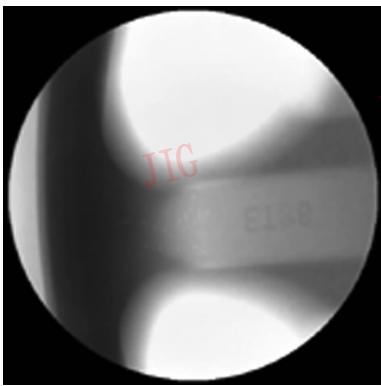


图 1 轮毂轮辐 X 光图

Fig. 1 X-Ray image of spoke of wheel

现有的兴趣区分割方法一般带有一定的先验知识,因而针对性比较强,如遥感图像的分割^[2-4],但针对铸件 X 光图像的兴趣区分割研究相对比较少。多数算法主要是以灰度作为分割依据^[4],将灰度变

化大的地方作为兴趣区^[5],而对轮毂铸件 X 光图像观察到,由铸造工艺形成的缺陷往往不出现在灰度变化大的位置。这使得仅以灰度作为分割兴趣区的特征在轮毂铸件 X 光图像上达不到预期效果。文献[2]、[3]利用 Sobel 算子求得目标的边缘,并用边缘长度求算兴趣区的显著性。由于 Sobel 算子在处理轮毂 X 光图像缺陷边缘时,检测出来的边缘大多不封闭,与缺陷边缘长度相近的干扰边缘相当多,因而仅利用边缘长度作为显著性难以满足分割轮毂铸件 X 光图像缺陷兴趣区的要求。

事实上,许多图像分割方法也可以作为兴趣区的分割方法,如基于分形特征图像分割方法^[6]、基于纹理特征的图像分割方法^[7]等。但文献[6]的分形特征是从图像灰度层面中提取,实验分析得到,铸件 X 光图像的灰度分形特性并不明显,文献[7]的纹理特性其实以灰度作为求算基础,使这些算法在纹理图像上有好效果,但在铸件 X 光图像上的效果并不明显。用梯度阈值和寻找“拐点”等方法通过确定缺陷的兴趣点来分割兴趣区,但噪声的干扰使这些算法的成功率大为降低。事实上,轮毂铸件 X 光图像的复杂背景是造成兴趣区分割困难的重要原因。

3 算法的基本原理

经过反复实验,Canny 算子在检测轮毂铸件 X 光图时能找到缺陷的边缘,其效果比 Sobel 算子好,但同时也增加了不少的干扰边缘。由于缺陷分布相对集中,若从中找到若干条属于缺陷的边缘,以这些边缘所在的位置作为基准粗略确定兴趣区所在位置,并划分一个最小的区域包含这些缺陷边缘,那么该区域就是所要找的兴趣区域。这是本文算法的主要思想,而在众多边缘中找出属于缺陷的边缘是我们的主要问题。

从实验观察中发现,Canny 找到的缺陷边缘主要有两种状态:一种是完全封闭;另一种虽不完全封闭但接近封闭,所谓接近封闭是指,封闭边缘因欠缺一小部分而成为弯曲边缘曲线(图 2),与呈直线状态的非缺陷边缘有所区别。这里定义曲线闭合的程度为封闭度,以此作为区分缺陷边缘与非缺陷边缘的依据。根据人类视觉模型,人类在识别目标时,视觉心理学上遵从“格式塔心理学”的原则^[1]。其认为人们对图像的局部特征在知觉上是模糊的,但综

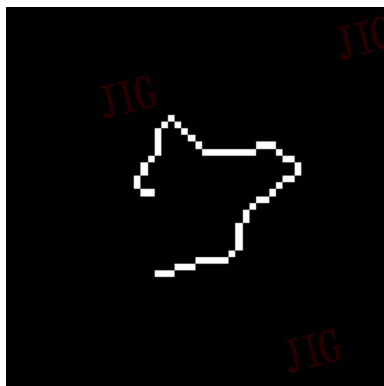


图 2 接近封闭的曲线

Fig. 2 The curve of approach close

合起来使知觉到的图形与背景是清晰可辨的。其组织原则与图形规律主要包括 5 个方面:(1)图形和背景;(2)接近性;(3)相似性;(4)连续性;(5)封闭性。以缺陷边缘的非封闭但接近封闭的性质作为识别缺陷边缘目标的特征,符合视觉心理学的接近性原则。

根据边缘的弯曲封闭度做一个分类器,设定阈值,求算每条曲线的封闭度,将高于阈值的判定为缺陷边缘。这里需要一种数学方法来描述封闭度。该算法采用分形维数作为封闭度的描述。根据分形原理,弯曲而接近封闭线段的维数比呈直线线段的维数有较大区别,因而可以找到一个阈值来区分缺陷边缘和非缺陷边缘。

另外,由于缺陷面积相对比较小,无论封闭或是非封闭,缺陷边缘长度只会有一定范围。根据这一特性,设定范围 $[L_{\min}, L_{\max}]$,凡属于缺陷的边缘长度应当在这个范围里。若边缘线封闭,在该范围内的可视为缺陷边缘;若边缘非封闭,则先要判定其长度是否属该范围,然后由分形维数判定其封闭度。

完成对边缘线的判断与识别后,将判为缺陷边缘的边缘线按距离进行聚类。这基于以下两方面:一是由于轮毂结构的复杂性,缺陷有可能集中出现在两个或两个以上的不同地方,因而应自适应地将缺陷边缘线聚类划分出多个不同的兴趣区域;二是实际上由于边缘线段的复杂性,有可能会出出现误判情况,致使误判为缺陷边缘的线段有可能集中在多处。利用聚类的方法能很好地将缺陷边缘线段不同的集中处进行分类,以每类的缺陷边缘为中心从原图中截取长方形区域,再利用简单的方法筛选出真正属于所需要的包含缺陷最小区域的兴趣区。

4 分形原理

分形(fractal)这个名词是 Mandelbrot 在 20 世纪 70 年代为了表征复杂图形和复杂过程首先引入自然科学领域的,它的原意是不规则的、支离破碎的物体。迄今为止,分形还没有一个严格的定义。1982 年 Mandelbrot 将分形定义为 Hausdorff(豪斯道夫)维数大于拓扑维数的集合^[8]。

在分形研究中,主要研究物体的分形维数,以分形维数作为区分具有自相似性的物体的参考。能用分形进行研究的物体必须具有某种意义下的自相似性。一般认为自然界的许多物体都具有自相似特性。从铸件缺陷的形成机理可以将缺陷的边缘视为有一定的自相似性,因而可以确定缺陷边缘的分形维数。

分形维数的测定方法有很多,改变观察尺度求维数是其中的一种^[9]。具体方法是:用圆和球、线段和正方形、立方体等具有特征长度的基本图形去近似分形图形。例如本文要处理的边缘曲线,先把曲线的一端作为起点,然后以此点作为中心画一个半径为 r 的圆,把此圆与曲线最初相交的点和起点用直线连接起来,再把此交点重新看作起点,以后反复进行同样的操作。也就是说用长度为 r 的折线去近似边缘曲线,把测得的线段总数记作 $N(r)$ 。如果改变基准长度 r ,则 $N(r)$ 也要变化。一般地说,如果曲线具有

$$N(r) \propto r^{-D}$$

关系,则可称 D 为这一曲线的维数。在求算时,两边取对数可得

$$\ln N(r) = -D \ln r$$

通过改变基准长度 r ,可获取多个 $(\ln r, \ln N(r))$ 的数据对,利用回归方法可求得曲线的维数 D 。边缘线越弯曲,维数 D 比 1 大得越多(直线的维数 D 为 1)。

5 算法的实现

根据上述原理,本文算法首先用 Canny 算子对原图(即图 1)进行运算,找出原图的边缘线,得到一幅 0-1 的二值图(0 为背景,1 为边缘线像素的值),记为 Im 。并对边缘线进行细化,这一步是非常重要的,因为可以方便后续的链码搜索方法的执行。为

了检测所有边缘线,本文算法采用链码搜索方法,跟踪检索每一条边缘线段。由于对封闭与非封闭边缘线链码搜索的方法有所不同,在本文算法里将两者的检测分开,并按顺序执行,即先检测非封闭边缘线,再检测封闭边缘线。最后将检测出来的缺陷边缘线进行聚类,根据聚类的结果分割出缺陷兴趣区。

5.1 非封闭边缘线链码搜索

对每条非封闭边缘线,链码搜索从其端点开始。对 Im 从左到右,从上到下进行扫描,遇到值为 1 的像素检测其 8 邻域,若邻域内只有一个值为 1 的像素,则该像素点为其所在边缘线的端点。链码搜索从这点开始。为了区分每条边缘线,利用变量 $mark$ 记录当前边缘线的标号。在搜索的过程中,将边缘线上每个像素值改为属于该边缘线的标号值,同时将每个像素点的位置按顺序记录在数组 $LinkArray$ 里,直到搜索完毕。 Im 上的边缘线一般存在分叉情况,链码搜索技术处理线段分叉的方法一般比较复杂。为简化算法,提高算法的运算速度,在不明显影响结果的情况下,本文算法采用以下方法:从多条分叉线中找出与当前跟踪搜索的方向夹角最小的分叉线,以此作为当前边缘线上的一部分跟踪搜索下去,其他分叉线不进行考虑。原因是缺陷呈颗粒圆状,其边缘线应是平滑曲线。

当搜索跟踪了当前的边缘线后,利用数组 $LinkArray$ 求算该边缘线段的分形维数。为提高算法的运算速度又不失分形维数的求算准确性,基准长度 r 取 $[1, 10]$ 的范围(由于图像是离散的, r 只取整数)。 r 从 1 循环到 10, 设基准长度当前值 $r = r_0$ ($r_0 = 1, 2, \dots, 10$), 以数组 $LinkArray$ 第 1 个元素作为起点,按顺序检索其他数组元素,判断当前检索到的元素与起点的距离是否小于 r_0 , 小于 r_0 的继续顺序判断下一个元素,否则以当前元素作为新的起点,同时线段计数变量 $N(r)$ 加 1。直到数组 $LinkArray$ 检索判断完毕,得到一个 $N(r)$ 。令 $r = r_0 + 1$, 重复上述过程,最终得到 10 个 $(r, N(r))$ 的数据对,通过回归方法求得其斜率,即该边缘线对应的分形维数。利用该分形维数与阈值 D_0 比较,大于阈值 D_0 就保留该曲线,认为边缘线是接近封闭,是缺陷的边缘;否则去除该边缘线,去除的方法是,将 $LinkArray$ 元素中对应图像上的像素都置为 0,同时清空该边缘线数组 $LinkArray$ 的内容。根据分形原理,阈值 D_0 应在 $(1, 2)$ 范围里。一般可以选取为大于 1 而又接近 1 的数,因为直线的分形维数为 1,

弯曲的曲线其维数比直线大,但缺陷边缘曲折程度一般不大,使分形维数值较低。

5.2 封闭边缘线链码搜索

当上述算法对整幅图像 Im 处理完后,所有非封闭的边缘线将会全部检查完毕,判为缺陷边缘的线段将保留下来,同时有相应的标号,判为非缺陷边缘的线段都基本删除,而剩下的就是封闭边缘线,其值在图 Im 上仍为 1。对于封闭边缘线,只用简单的周长作为判断的依据。因而要同样采用链码搜索法检测每条封闭边缘线。但与非封闭边缘线的检测有所不同。在寻找边缘线及其搜索开始点时,对当前像素值为 1 的像素点,不再以其邻域作为搜索开始点的判断,而是直接以该点作为链码搜索的开始点。因为封闭的边缘线没有端点,只能找出当前边缘线上第 1 个像素点作为搜索的开始点。

在搜索跟踪时,同样用数组 $LinkArray$ 记录边缘线上每像素点的位置信息,计算该封闭边缘线的周长。最后在判断其是否为缺陷边缘时,不再采用分形维数,而是判断其周长是否在经验范围内,如 $[10, 100]$ 。若是在该经验范围内可视为缺陷边缘,并且保留;否则删除,删除的方法与上述一样。

5.3 聚类缺陷边缘线和分割兴趣区

经过上述的运算后,图 Im 中只剩下被判为缺陷边缘并标有标号的边缘线。一般情况下,这些线段并不多。按照原理,接着的步骤是将这些边缘线段按距离进行聚类。也就是要设计一个分类器将边缘线进行分类。分类的依据是线段两者间的距离,并设定阈值 $DistLimit$ 作为判决准则。具体的操作是:

- (1) 判断当前扫描到的边缘线是否已判断其类属,若已判断其类属就跳到第 3 步,否则到第 2 步;
- (2) 循环检测其他各边缘线,计算它们与当前边缘线之间各自的距离,得到的距离与阈值 $DistLimit$ 对比,小于阈值的将该边缘线与当前边缘线归为一类,并做出相应的标记,否则跳过;
- (3) 检测下一条边缘线,重复第 1 步。

最后可以将 Im 上所有被判为缺陷边缘的边缘线分为 n 类。若 Im 中有 M 条缺陷边缘线,则分类这些边缘线需要 $M \times (M - 1)$ 次判断,也就是说算法的复杂度是 $O(M^2)$ 。实际上最后的 M 值通常比较小,所以算法运行的速度还是相当快的。

但影响上述算法速度的关键是在于边缘线之间距离的求算。传统的方法是两条线段上各像素间欧

几里德距离的最小值作为两线段的距离,实际上这样的运算量相当大,并不符合实际情况。为降低距离计算的运算量而又对算法效果影响较小,在本文算法里将简化距离计算方法,即在每条边缘线上找出 4 个代表点,分别是位于线段的最左点、最右点、最上点与最下点。该 4 点可以通过 5.1 节和 5.2 节中的链码搜索执行时利用数组 *LinkArray* 对像素位置的记录来确定,在求距离时,用边缘线间该 4 点距离的最小值来代替两边缘线的距离。

算法的最后将以上分成的 n 类边缘线用固定大小的区域将它们从原图中分割出来,得到 n 幅截图,也就是所要得到的兴趣区域。区域的大小可以根据实际情况或者后续算法要求来确定。

6 实验结果及分析

根据上述原理和算法的实现过程,对图 1 进行运算,得到以下结果(图 3)。其中各个参数分别为 $L_{\min} = 10$, $L_{\max} = 100$, $D_0 = 1.05$, $DistLimit = 100$ 。

需要说明的是,正如前文所说,Sobel 边缘检测难以检测缺陷边缘,在不改变原意的情况下,仿真实验将该算法的初始边缘检测改用 Canny 算子。从图 3(b)中可以看出,分割的区域没有覆盖大部分的缺陷目标,却包含了大量非缺陷的无用信息。造成这一结果的主要原因是单以长度和边缘两边灰度的对比作为分割特征在缺陷边缘识别中显得不够。而本文算法根据视觉上的封闭性,利用边缘的封闭度识别缺陷边缘并分割兴趣区,使兴趣区的分割效果更理想。

本文算法中,参数 L_{\min} 、 L_{\max} 和 $DistLimit$ 的选取跟实际检测目标和传感器获取图像的具体情况有关。例如单位像素代表实际距离值的不同会使这些参数的取值有所不同。原则上,在同一条件下取得的图像,可选取一定的样本进行统计,根据样本中最小与最大缺陷的周长值,以及缺陷间的最大距离的统计值作为这些参数的参考值。正如 5.1 节所说,根据分形原理, D_0 在 (1, 2) 范围里。在仿真实验中, D_0 对分割效果有较大的影响。 D_0 越接近 2, 筛选出的曲线越曲折。事实上当 D_0 选取较大值(但小于 2)时,会出现兴趣区分割不出的情况,这是因为在铸件轮毂 X 光图中极少边缘会非常曲折。在仿真实验中, D_0 一般选取在 [1.05, 1.20] 范围里有较好的分割效果。

经过对大量轮廓 X 光图的测试,算法分割缺陷兴趣区域的效果都是比较理想的,具有一定的适用性。

7 结 论

本文算法采用非传统的方法来寻找 X 光图像中缺陷所在的兴趣区。该算法通过 Canny 算子检测到的大量边缘线中,利用缺陷边缘线的分形特性来判断各边缘线是否属于缺陷的边缘。将没被判为缺陷边缘的其他边缘线删除,并将被判为缺陷边缘的边缘线按距离进行聚类。最后以聚类结果中各类边缘线为中心,用固定大小的区域截取原图,得到最后的结果——兴趣区域。从实验的结果看来,该方法得到的效果比较理想,具有实用性。

参考文献 (References)

- 1 Jin Xiao-jun, Li Jian-feng, Zhang Su-hui, et al. Image intelligent technology of target detection (I) ——target-background expression

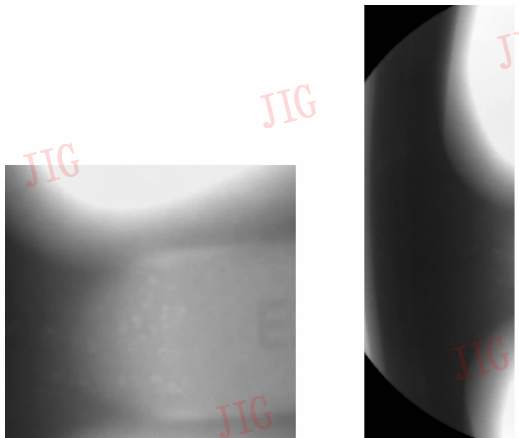


图 3 针对图 1 的实验结果

Fig. 3 Experiment result of Fig. 1

由图 3(a)可以看出,截取出来的兴趣区域包含了原图中所有的缺陷,且兴趣区域为 200×200 ,面积小于原图的 $1/4$,后续处理中,用该兴趣区域进行运算将比用原图进行运算至少快 4 倍。

文献[2]的分割算法在众多兴趣区分割算法中具有一定的代表性,所以用此做对比仿真实验。由于该文没有详细给出具体参数的参考值,仿真实验时采用多组参数组合并取效果最好的结果做对比。

- model [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2003, 26(s1): 1~7. [景晓军, 李剑锋, 张苏慧等. 图像智能化的目标检测技术(I)——目标-背景视觉模型[J]. 北京邮电大学学报, 2003, 26(s1): 1~7.]
- 2 Zuo Zheng-rong, Zhang Tian-xu. Study on the recognition method of ground target based on detecting interest region [J]. Infrared Technology, 2004, (3): 35~38. [左峥嵘, 张天序. 基于兴趣区检测的地面目标识别方法研究[J]. 红外技术, 2004, (3): 35~38.]
- 3 Wu Wei-ren, Zhang Tian-xu, Peng Hui. Investigation of airdrome runway based on detection of region of interest [J]. Computer Measurement & Control, 2004, 12(4): 319~321. [吴伟仁, 张天序, 彭辉. 基于兴趣区检测的远距离机场目标识别研究[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(4): 319~321.]
- 4 Yuan Xiao-hui, Jin Li-zuo, Li Ju-xian, et al. Recognition of bridge over water through detecting and analyzing regions of interest [J]. Journal Infrared Millim. Waves, 2003, 22(5): 331~336. [袁晓辉, 金立左, 李久贤等. 基于兴趣区检测与分析的水上桥梁识别[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 331~336.]
- 5 Li Jiang, Cheng Jian, Zhou Xin. Self-adapting median filtering under multi-window structures in the digital image processing [J]. Computer Engineering, 2003, 29(17): 154~156. [李江, 程健, 周鑫. 数字图像处理中多窗口下的自适应中值滤波[J]. 计算机工程, 2003, 29(17): 154~156.]
- 6 Guo Xin, Zeng Liang, Wen Tie-feng F. Image segmentation based on fractal feature [J]. Systems Engineering and Electronics, 1997, (5): 47~50. [郭欣, 曾亮, 文铁峰. 基于分形特征的图像分割[J]. 系统工程与电子技术, 1997, (5): 47~50.]
- 7 Zhao Rong-chun. A new method for texture features extraction and segmentation of image [J]. Acta Electronica Sinica, 1994, 22(4): 46~52. [赵荣椿. 一种图象纹理特征提取与分割的新方法[J]. 电子学报, 1994, 22(4): 46~52.]
- 8 Sun Xia, Wu Zi-qin, Huang Yun. The Principle and Application of Fractal [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003: 23~24. [孙霞, 吴自勤, 黄韵. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 23~24]
- 9 Zhang Ji-zhong. Fractal [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 112~114. [张济忠. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 112~114]