

文章编号 1004-924X(2010)02-0451-07

# 工业 CT 含噪图像中的裂纹探测

李宗剑<sup>1,2</sup>, 曾 理<sup>1,3</sup>

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心, 重庆 400044;  
2. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044; 3. 重庆大学 数理学院, 重庆 400044)

**摘要:**提出一种基于快速 Beamlet 变换的工业 CT 含噪图像的裂纹探测方法。首先,分析图像在单尺度下的 Beamlet 组成以及 Beamlet 间的相互关系,设计出一种快速 Beamlet 变换。基于快速 Beamlet 变换,引入一个关于吻合度的控制量,并结合 Beamlet 自身的多尺度树型结构,采取“自上向下”寻找目标函数最优值的思路,得到裂纹的探测结果。最后,结合探测结果的相邻区域的像素特性,提取出含噪裂纹的区域边界。分别对含有裂纹的 CT 图像,以及叠加方差为 0.1 的高斯白噪声图像,叠加强度为 0.1 的椒盐噪声图像进行探测实验。结果表明,与基于 Laplace、Canny 或小波的探测方法相比,该方法能有效探测到工业 CT 含噪图像中的裂纹。因为 Beamlet 是以线基的方式分析图像数据,所以该方法对噪声干扰具有很好的抑制能力,成功实现了工业 CT 含噪图像中的裂纹探测。

**关键词:**工业 CT; 裂纹探测; 快速 Beamlet 变换; 噪声图像

**中图分类号:**TG115. 281; TP391 **文献标识码:**A

## Crack detection of industrial CT noisy image

LI Zong-jian<sup>1,2</sup>, ZENG Li<sup>1,3</sup>

(1. *ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*  
2. *College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*  
3. *College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

**Abstract:** A crack detection method of Industrial Computed Tomography (ICT) noisy images based on fast Beamlet transform is presented in this paper. After analyzing the composition and relation of Beamlet in a mono-scale, a fast Beamlet transform is proposed. On the basis of the Beamlet transform, a control variable about the relativity is introduced. Then, combining the tree-structure of Beamlet's multiscale and a “top to bottom” inter-scale inhibition to optimize the object function, the crack is detected. Finally, considering the near pixels of detection result of the crack, the edge of crack domain is extracted. A numerical experiment on the images including an original ICT noisy image, a Gaussian white noise image with a variance of 0.1 and a salt & pepper noise image with a superposition density of 0.1 is carried out. Compared with the methods of Laplace, Canny or wavelet, the proposed method can detect the crack of ICT noisy image more effectively. Because the Beamlet

收稿日期:2009-04-29; 修订日期:2009-07-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60672098; No. 60972104)

transform uses lines to analyze the image data, the proposed method has a robustness to noises.

**Key words:** industrial CT; crack detection; fast Beamlet transform; noise image

## 1 引言

计算机断层成像技术(Computed Tomography, CT)是一种重要的无损检测技术,能真实地再现被检物内部结构的详细信息。在工业中,常用 CT 对工件进行扫描并分析其内部结构,判断其是否存在缺陷。缺陷的形式多种多样,如在铸造过程中,由于金属液体中含有气体或其它杂质,且其在冷却时会产生收缩现象,因此铸件中会出现诸如气孔、裂纹、夹渣、收缩等缺陷。

在工业 CT 图像中,大部分的裂纹呈现出线性或分段线性的特点<sup>[1]</sup>,而且或多或少都带有一定的点状噪声,因此,对工业 CT 含噪图像中的线性裂纹进行有效探测是成功分析裂纹属性的第一步<sup>[2]</sup>。

常见的探测含噪图像中裂纹的方法,是采用先对图像进行降噪再提取裂纹的思路<sup>[3]</sup>。考虑在降噪过程中,不可避免地会损失一部分有用信息,本文提出了另外一种思路,即在不降噪的情况下,直接在工业 CT 含噪图像数据中探测裂纹。

Beamlet 是近年来出现的一种新的多尺度几何分析(Multiscale Geometric Analysis, MGA)工具<sup>[4-5]</sup>,以不同尺度、不同位置、不同方向的线段为基,将图像沿这些基作线积分,并以这些积分值作为目标函数,进而对图像特征进行分析。因此,如同小波适于分析点的奇异性(突变)一样,Beamlet 适于分析线段的奇异性,且在边缘探测<sup>[6]</sup>、焊缝探测<sup>[7]</sup>、遥感图像中线特征探测<sup>[8]</sup>等方面已有应用。

Beamlet 最大的问题就是计算量较大,针对这一问题,本文通过分析图像在单尺度下 Beamlet 的组成以及 Beamlet 间的相互关系,设计出计算 Beamlet 变换的快速算法。接着在快速 Beamlet 变换的基础上,通过引入关于吻合度的控制量,并结合 Beamlet 自身的多尺度树型结构,采取“自上向下”寻找目标函数的最优值,进而得到裂纹的探测结果。最后,结合探测结果的相邻区域的像素特性,提取出含噪裂纹的区域边界。

实验图像包括含有裂纹的实际工业 CT 图像,在其上叠加方差为 0.1 的高斯白噪声图像,在其上叠加强度为 0.1 的椒盐噪声图像。探测结果表明,与基于 Laplace、Canny 或小波的探测方法相比,本文的方法能有效地探测工业 CT 含噪图像中的裂纹。

## 2 Beamlet 快速算法

### 2.1 Beamlet 的定义

Donoho 于 1999 年提出 Beamlet 的概念。对于一幅  $n \times n (n=2^j, j \in \mathbf{Z})$  的图像,对图像进行二进递归划分,并标注每一图像小块的边界点,则每对标注点的连线被称为一条 Beamlet。图 1 描述了  $8 \times 8$  的方格图中的一条 Beamlet,其中一个方格代表一个像素,黑点代表标注的边界点。

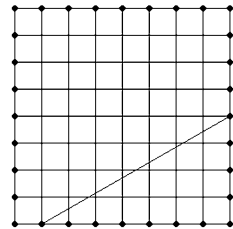


图 1  $8 \times 8$  图像中的一条 Beamlet

Fig. 1 A Beamlet in  $8 \times 8$  image

### 2.2 离散 Beamlet 变换

数字图像在一条 Beamlet 上的离散 Beamlet 变换,就是这条 Beamlet 经过的像素的灰度值之和,表达式如下<sup>[5]</sup>:

$$T(b) = \sum_{(i,j) \in b} f(i,j), b \in B, \quad (1)$$

其中  $B$  表示所有 Beamlet 构成的集合,  $b$  表示一条 Beamlet,  $(i,j)$  表示坐标值,  $f(i,j)$  表示像素灰度值。

### 2.3 快速 Beamlet 变换

#### 2.3.1 关于单尺度 Beamlet 的分析

对于一幅  $n \times n (n=2^j, j \in \mathbf{Z})$  的图像,在最小尺度下,理论上  $C_{4n}^2 = 2n(4n-1)$  条 Beamlet。

根据这些 Beamlet 的两个端点所在位置的关系,可以分为 3 大类:同边型、邻边型、对边型。

同边型 Beamlet,  $2n(n+1)$  条;邻边型 Beamlet,  $4(n-1)^2$  条;对边型 Beamlet,  $2(n+1)^2$  条。其中,有 6 条 Beamlet 被重复计算一次,它们是由 4 个顶点两两组合得到的 6 条 Beamlet。

下面讨论邻边型和对边型 Beamlet 各自的内在联系,建立如图 2 的坐标系,原点在图像的左下角。

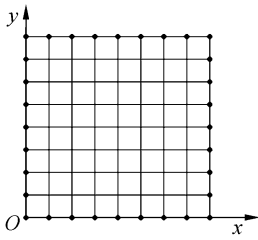


图 2 坐标系  
Fig. 2 Coordinate

(1) 邻边型的情况(不含 4 个顶点)

设  $b_1$  为一条邻边型 Beamlet,其起始点和结束点的坐标分别为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ ,与  $b_1$  相关的 Beamlet 共 7 条,如图 3 所示,表达式如下:

$$\begin{cases} b_2: \{(x, n-y) | (x, y) \in b_1\} \\ b_3: \{(n-x, y) | (x, y) \in b_1\} \\ b_4: \{(n-x, n-y) | (x, y) \in b_1\} \\ b_5: \{(y, x) | (x, y) \in b_1\} \\ b_6: \{(n-y, x) | (x, y) \in b_1\} \\ b_7: \{(y, n-x) | (x, y) \in b_1\} \\ b_8: \{(n-y, n-x) | (x, y) \in b_1\} \end{cases} \quad (2)$$

特殊情形,当  $y_2 - y_1 = x_2 - x_1$  时,则与  $b_1$  相关的 Beamlet 共 3 条,即  $b_2, b_3, b_4$ 。

(2) 对边型的情况(含 4 个顶点)

设  $b_1$  为一条对边型 Beamlet,其起始点和结束点的坐标分别为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ 。

当  $x_1 = x_2$  或  $y_1 = y_2$  时(共  $2(n+1)$  条),相当于一垂直线或水平线,由于没有穿过任何的像素,故视为无效的 Beamlet。

当  $|x_2 - x_1| = 1$  或  $|y_2 - y_1| = 1$  时(共  $4n$  条),相当于计算图像的列和或行和。

当  $y_1 = 0, y_2 = n$  时,则为 2 条对角线的像素值求和。

除去上述三种情形,与  $b_1$  相关的 Beamlet 共 3 条,如图 4 所示,表达式如下:

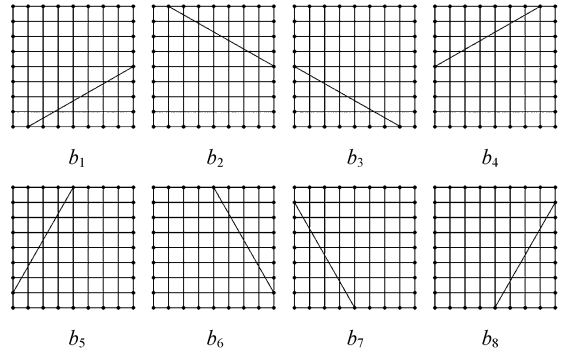


图 3 邻边型 Beamlet 的内在联系  
Fig. 3 Beamlet's relationship of near sides

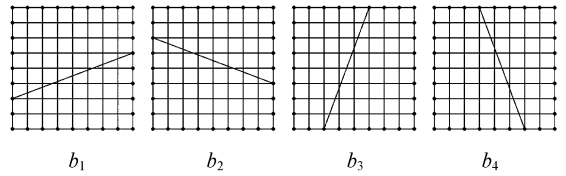


图 4 对边型 Beamlet 的内在联系  
Fig. 4 Beamlet's relationship of opposite sides

$$\begin{cases} b_2: \{(x, n-y) | (x, y) \in b_1\} \\ b_3: \{(y, x) | (x, y) \in b_1\} \\ b_4: \{(n-y, x) | (x, y) \in b_1\} \end{cases} \quad (3)$$

2.3.2 快速 Beamlet 变换的算法步骤

图像的坐标系如图 2 所示,图像尺寸  $n \times n$ ,记经过起始点  $(x_1, y_1)$ ,结束点  $(x_2, y_2)$  的 Beamlet 为  $b_1$ 。

第一步,计算邻边型 Beamlet 变换,记与  $b_1$  相关的 Beamlet 为  $b_2 - b_8$ 。

$y_1 = 0, x_2 = n;$

for  $x_1 = 1 : n - 1$

for  $y_2 = 1 : x_2 - x_1$

用 Bresenham 算法<sup>[9]</sup>计算  $b_1$  经过的像素坐标;

沿  $b_1$  进行像素值求和;

if  $(y_2 - y_1 = x_2 - x_1)$

由坐标变换得  $b_2 - b_4$  的坐标值;

分别沿  $b_2 - b_4$  进行像素值求和;

else

由坐标变换得  $b_2 - b_8$  的坐标值;

分别沿  $b_2 - b_8$  进行像素值求和;

end

end

第二步,计算对边型 Beamlet 变换,记与  $b_1$

相关的 Beamlet 为  $b_2 - b_4$ 。

分别沿每行或每列进行像素值求和；

$x_1 = 0, x_2 = n$ ;

for  $y_1 = 0 : n - 2$

for  $y_2 = y_1 + 2 : n$

用 Bresenham 算法<sup>[9]</sup>计算  $b_1$  经过的像素坐

标；

沿  $b_1$  进行像素值求和；

if( $y_1 = 0 \&\& y_2 = n$ )

沿另一条对角线进行像素值求和；

else

由坐标变换得  $b_2 - b_4$  的坐标值；

分别沿  $b_2 - b_4$  进行像素值求和；

end

end

### 2.3.3 计算时间比较

计算机配置如下：AMD3100 +, 1 G 内存，VC++6.0, Windows XP。使用本文算法、文献[10]的算法、文献[11]的算法对不同尺寸的图像进行 Beamlet 的计算，计算时间的对比结果如表 1 所示。

表 1 不同算法计算 Beamlet 变换时间比较

Tab.1 Computation time contrast of different algorithms

	本文算法	文献[10]算法	文献[11]算法
256×256	0.657 s	1.816 s	0.640 s
512×512	6.243 s	11.192 s	5.906 s
1 024×1 024	61.859 s	82.564 s	61.389 s

文献[10]对每条 Beamlet 利用 Bresenham 算法确定其经过的像素，文献[11]只对部分 Beamlet 利用 Bresenham 算法确定其经过的像素，剩余的 Beamlet 由对称性、平行性得到。可以看到，本文算法的计算时间明显快于文献[10]的算法，与文献[11]算法的计算时间相当。本文算法与文献[11]算法的不同之处在于，两者 Beamlet 的端点模型不一样。本文的算法，以图像的边界点作为 Beamlet 的起始点和结束点，对于  $n \times n$  的图像，在最小尺度下，有  $C_{4n}^2$  条 Beamlet；而文献[11]的算法，以图像的边界像素作为 Beamlet 的起始点和结束点，对于  $n \times n$  的图像，在最小尺度下，有  $C_{4(n-1)}^2$  条 Beamlet。另外，如图 5 所示的 4 条 Beamlet，在本文算法中存在，而在文献[11]的算

法中是不存在的。

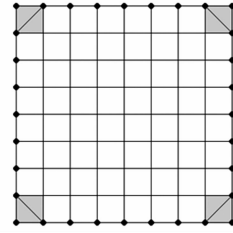


图 5 文献[11]算法中不存在的 4 条 Beamlet

Fig.5 4 Beamlet are not exist in algorithm of reference [11]

## 3 工业 CT 含噪图像的裂纹探测

### 3.1 单尺度下的广义似然比检验

单尺度下，探测含噪裂纹的问题，可以利用广义似然比检验的方法来解决，建立如下的含噪数字图像模型<sup>[5]</sup>：

$$y_{i,j} = A \cdot \Phi_{i,j} + \epsilon \cdot z_{i,j}, \quad (4)$$

其中， $0 \leq i, j < N, N = 2^n, n \in \mathbf{Z}$ ,  $y_{i,j}$  表示含噪数字图像， $A$  表示未知的幅度系数， $\Phi_{i,j}$  表示沿一条未知的离散 Beamlet 得到的观察结果， $\epsilon$  表示噪声水平， $z_{i,j}$  表示噪声。在文献[5]中， $z_{i,j}$  为高斯白噪声，而在本文中， $z_{i,j}$  除了可以为高斯白噪声外，还可以为椒盐噪声、泊松噪声等。将上述模型视为一个假设检验问题，其简单零假设为  $H_0 : A = 0$ ，复合备则假设为  $H_1 : A > 0$ 。

做含噪数字图像与各条离散 Beamlet 的内积，将上述假设检验问题转化为求解最大 Beamlet 统计问题<sup>[5]</sup>，即求解：

$$Y^+ = \max \{ T_y(b) / \sqrt{L(b)} \}, \quad (5)$$

其中， $T_y(b)$  为含噪数字图像  $y_{i,j}$  的 Beamlet 变换系数， $L(b)$  为 Beamlet  $b$  的欧式长度（范数）。文献[5]的做法是，当  $Y^+$  超过某一阈值时拒绝简单零假设  $H_0$ ，接受复合备择假设  $H_1$ ；反之拒绝复合备则假设  $H_1$ ，接受简单零假设  $H_0$ 。

由于阈值的选取随图像的不同、经验值的不同差异很大，因此，我们考虑引入一个新的控制量  $R(b) (\in [0, 1])$ ，其意义是既属于 Beamlet  $b$  又属于探测对象的像素个数，占 Beamlet  $b$  总像素个数的百分比。在计算  $Y^+$  的同时计算  $R(b)$ ，当  $R(b)$  超过某一阈值时拒绝  $H_0$ ，接受  $H_1$ ；反之拒绝

$H_1$ , 接受  $H_0$ 。

$R(b)$ 的阈值确定只与人的主观期望(即离散 Beamlet 与探测对象的吻合程度)相关,而与图像内容、经验值无关。考虑到裂纹上的像素灰度值相近这一特点,因此判断一条离散 Beamlet 上的像素是否为探测对象,例如可利用该条 Beamlet 像素值的均值(记为  $m$ )和方差(记为  $\sigma$ )作为判断条件,若像素值  $p(i, j)$  满足  $p(i, j) \in [m - k\sigma, m + k\sigma]$  ( $k$  为一常数),则判断为是。

### 3.2 多尺度下的 Beamlet 修饰递归二进分解

多尺度下的 Beamlet 间构成了一种树结构。与树结构对应的是递归二进分解(recursive dyadic partition, RDP),其严格定义参见文献[5]。在一个递归二进分解中,当全部子块或者部分子块被块内的 Beamlet 所“修饰”时,该递归二进分解称为“Beamlet 修饰的递归二进分解”(Beamlet-decorated RDP, 简称 BD-RDP)。BD-RDP 的主要性质是关于 Beamlet 系数间的“尺度间互抑”(inter-scale inhibition)<sup>[5]</sup>。

多尺度下,探测含噪裂纹的问题,可以利用寻求 BD-RDP 的最优目标函数来解决。文献[5]中给出的目标函数为:

$$J(P) = \sum_{S \in P} C_S^2 - \lambda \#P, \quad (6)$$

其中,  $S$  表示二进方块,  $C_S = \max_{b \in S} \frac{T(b)}{\sqrt{l(b)}}$ ,  $T(b)$  和  $l(b)$  分别为 Beamlet 的变换系数和欧式长度,  $\lambda$  为一变量,  $\#P$  表示 RDP 中二进方块的数目,求解采用“自下向上的树型修剪”处理过程。

同单尺度下的阈值选取问题一样,  $\lambda$  的选取随图像的不同、经验值的不同差异很大,因此,我们沿用单尺度下的处理思想,加入一新的控制量,将目标函数改为:

$$J(P) = \sum_{S \in P} R(b)_s C_S^2, \quad (7)$$

其中,  $C_S$  与(6)式中的定义相同,  $R(b)_s$  表示对应  $C_S$  的 Beamlet  $b$  的  $R(b)$ 。当离散 Beamlet 的能量越高,且与探测对象的吻合度越高,则目标函数将会越大。

另一方面,考虑到处理的图像是含噪图像,而噪声在细尺度下对探测对象的影响比在粗尺度下对探测对象的影响要大。因此,我们将“自下向上

的树型修剪”策略改为“自上向下”的寻找过程,即先粗尺度,后细尺度。当粗尺度下的  $J(P)$  占优时,不再向细尺度下分解,以粗尺度下的探测结果作为输出结果。

最后,考虑到大部分裂纹不是严格的单像素的线性情形,因此,我们对探测到的裂纹的相邻像素再进行一个判断处理,并提取出含噪裂纹的区域边界,作为最终的输出结果。

### 3.3 探测含噪裂纹的方法步骤

具体的方法实现步骤如下:

第一步,截取原始图像中,尺寸为  $2^n \times 2^n$  ( $n \in \mathbf{Z}$ ) 的裂纹所在区域,并设定最大分解尺度  $J(\leq n)$  和  $R(b)$  的阈值;

第二步,利用快速 Beamlet 变换和 3.1 节的判断方法计算出各单尺度下的最优离散 Beamlet;

第三步,构造离散 Beamlet 树,并利用 3.2 节的判断方法得到 Beamlet 树中最优的离散 Beamlet;

第四步,分析最优离散 Beamlet 的相邻像素,判断其是否属于探测对象;

第五步,提取探测对象的区域边界。

## 4 实验结果及分析

本文实验的原始工业 CT 图像如图 6(a) (316 pixel  $\times$  316 pixel) 所示;截取出裂纹所在的中心部分 128 pixel  $\times$  128 pixel 的图像,如图 6(b) (经反色变换) 所示;考虑到原始图像中的噪声不太强,为检测本文算法的抗噪性能,我们对原始图像又分别加了方差为 0.1 的高斯白噪声(经反色变换后如图 6(c) 所示)和强度为 0.1 的椒盐噪声(经反色变换后如图 6(d) 所示)。

图 7(a)、7(b)、7(c)、7(d) 是分别使用本文、Laplace、Canny、小波方法对图 6(b) 进行探测的结果;图 7(e)、7(f)、7(g)、7(h) 是分别使用本文、Laplace、Canny、小波方法对图 6(c) 进行探测的结果;图 7(i)、7(j)、7(k)、7(l) 是分别使用本文、Laplace、Canny、小波方法对图 6(d) 进行探测的结果。可以看出本文的方法对含噪裂纹的探测明显优于 Laplace、Canny、小波的方法,且探测结果与实际裂纹的形状基本吻合。

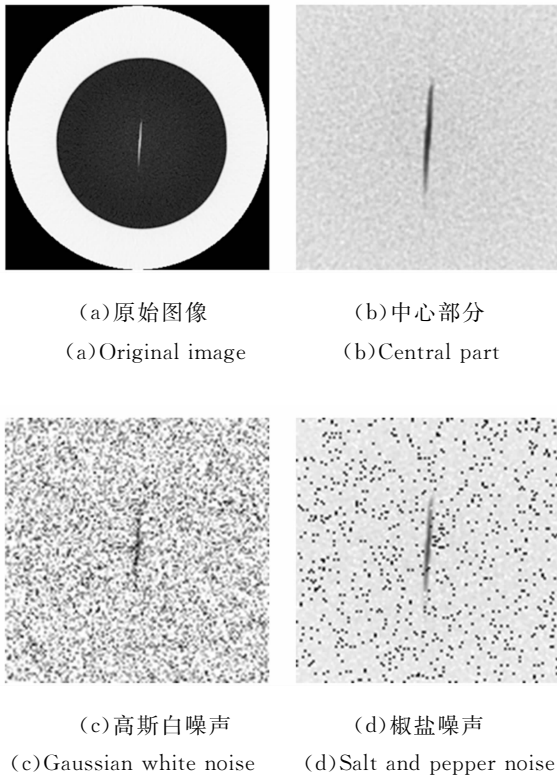


图 6 实验图像

Fig. 6 Experiment images

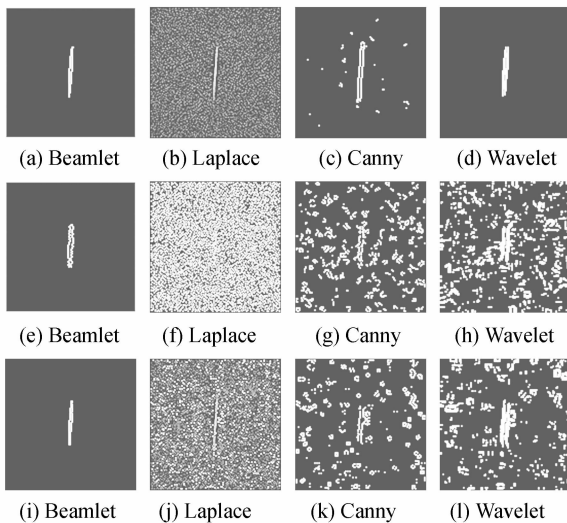


图 7 不同方法探测结果对比

Fig. 7 Detection results of different methods

## 参考文献:

- [1] 曾理, 安贝贝, 马睿. 脊波在工业 CT 图像裂纹边缘检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6): 981-986.

本文的方法之所以能对噪声环境下的裂纹进行有效探测, 都是因为 Beamlet 是以一种线基的方式在分析图像数据, 而 Laplace 方法、Canny 方法和小波方法都可以看作是点基(邻域)的方式在分析图像数据。点基受噪声影响较大, 而线基在一定程度上却能起到抑制噪声的作用。

本文采用的是不降噪直接在噪声数据中探测裂纹的思路, 除此之外, 还可以采用先对含噪图像进行降噪处理, 再探测的思路。因此, 在不知道噪声类型的前提下, 如何进行有效的降噪(如使用小波包方法降噪<sup>[12]</sup>、Curvelet 方法降噪<sup>[13]</sup>等)并提取出有用信息, 是另外一个值得研究的问题。

## 5 总结

本文首先分析了图像在单尺度下, Beamlet 的组成以及 Beamlet 间的相互关系, 设计出计算 Beamlet 变换的快速算法。接着, 在快速 Beamlet 变换算法的基础上, 通过引入一个吻合度控制量, 并结合 Beamlet 变换在多尺度下的树型结构, 采取“自上向下”的策略寻找目标函数最优值, 进而得到裂纹的探测结果。最后, 结合探测结果相邻区域的像素特性, 提取出裂纹的区域边界。

对含有裂纹的实际 CT 图像, 以及叠加方差为 0.1 的高斯白噪声图像, 叠加强度为 0.1 的椒盐噪声图像分别进行探测实验, 结果表明, 与基于 Laplace 方法、Canny 方法、小波变换的方法相比, 本文的方法能有效地探测到工业 CT 含噪图像中的裂纹, 且对噪声干扰具有很好的抑制能力。

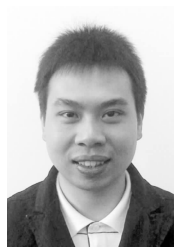
本文的方法, 对其它类型的含噪图像中的线性特征检测, 具有一定的参考价值。如何有效探测体数据中的裂纹面, 是下一步的研究重点。

ZENG L, AN B B, MA R. Application of ridgelet in crack edge detection of ICT image[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(6): 981-986. (in Chinese)

- [2] 徐夏刚, 张定华, 赵歆波, 等. 一种短裂纹群 CT 仿

- 真投影获取新方法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(10):1211-1213.
- XU X G, ZHANG D H, ZHAO X B, *et al.*. A novel acquisition technique of simulated CT projections of short collective cracks[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(10):1211-1213. (in Chinese)
- [3] 张俊雄, 荀一, 李伟. 基于形态特征的玉米种子表面裂纹检测方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 951-956.
- ZHANG J X, XUN Y, LI W. Detection of surface cracks of corn kernel based on morphology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 951-956. (in Chinese)
- [4] DONOHO D L. Wedgelet: nearly-minimax estimation of edges[J]. *Annals of Statistics*, 1999, 27(3):859-897.
- [5] DONOHO D L, HUO X. *Beamlets and Multiscale Image Analysis*[A]. Berlin: Springer Press, 2001, 20:149-196.
- [6] LI J, HUANG P K, WANG X H, *et al.*. Image edge detection based on beamlet transform [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(1):1-5.
- [7] 邓双城, 蒋力培, 焦向东, 等. 基于束波变换的焊缝图像处理技术[J]. 焊接学报, 2009, 30(1):68-72.
- DENG SH C, JIANG L P, JIAO X D, *et al.*. Image processing of weld seam based on beamlet transform[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2009, 30(1):68-72. (in Chinese)
- [8] 梅小名, 张良培, 李平湘. 利用 Beamlet 变换算法提取遥感图像线性特征[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(5):1576-1578.
- MEI X M, ZHANG L P, LI P X. Linear features extraction from remote sensing image with Beamlet transform[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(5):1576-1578. (in Chinese)
- [9] 贾银亮, 张焕春, 经亚枝. Bresenham 直线生成算法的改进[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(1): 158-161.
- JIA Y L, ZHANG H C, JING Y Z. A modified Bresenham algorithm of line drawing[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(1): 158-161. (in Chinese)
- [10] SHI Q F, ZHANG Y N. Adaptive linear feature detection based on beamlet [C]. *Proceedings of the third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2004:3981-3984.
- [11] 杨明, 尹勇, 彭玉华, 等. Beamlet 变换与多尺度线特征提取[J]. 电子学报, 2007, 35(1):100-103.
- YANG M, YIN Y, PENG Y H, *et al.*. Beamlet transform and multiscale linear feature extraction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(1):100-103. (in Chinese)
- [12] 高印寒, 马喜来, 何丽桥, 等. 基于小波包分解的阈值消噪在车载 CAN 总线上的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):434-439.
- GAO Y H, MA X L, HE L Q, *et al.*. Application of threshold denoising based on wavelet packet decomposition to vehicular CAN-bus [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 434-439. (in Chinese)
- [13] 郭琰, 张晔, 谷延锋, 等. 基于二代 Curvelet 变换和 ProbShrink 算法的红外图像背景抑制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10):1988-1994.
- GUO Y, ZHANG Y, GU Y F, *et al.*. Infrared image background suppression based on 2nd generation Curvelet transform and ProbShrink algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1988-1994. (in Chinese)

#### 作者简介:



李宗剑(1981—),男,重庆人,博士研究生,2004年、2007年在重庆大学先后获得理学学士和理学硕士学位,主要从事数字图像处理的研究。E-mail: joylil1@sohu.com



曾理(1959—),男,四川郫县人,博士,教授,博士生导师,1986年于四川师范大学获理学学士学位,1989年于大连理工大学获理学硕士学位,1997年于重庆大学获工学博士学位,2000年至2001年在瑞士巴塞尔大学作博士后研究,主要从事工业CT和数字图像处理的研究。E-mail: drlizeng@hotmail.com