

文章编号 1004-924X(2015)08-2400-07

快速 Arclet 变换及其在工业 CT 图像圆测量中的应用

李宗剑*, 邹晓兵

(重庆第二师范学院 数学与信息工程系, 重庆 400067)

摘要:为了准确描述工业 CT 图像中的圆形结构,提出一种基于多尺度几何分析工具 Arclet 的圆测量算法。首先,通过分析单尺度 Arclet 基函数间的空间关系,设计了单尺度快速 Arclet 数字变换算法;基于该 Arclet 数字变换,提取出单尺度上的候选圆特征。然后,考虑 Arclet 相邻尺度基函数间的空间关系并结合多尺度四叉树结构,按照从根到叶的方向,依次对相邻尺度间的候选圆特征进行取舍。最后,融合各尺度剩余的候选圆特征,得到提取结果,并根据提取结果计算出半径等圆参数。基于实际工业 CT 图像进行了圆测量试验,结果表明,最大半径绝对误差的绝对值 <0.1 mm,最大半径相对误差的绝对值 $<0.5\%$;即使对原工业 CT 图像引入不同强度的高斯噪声,测量结果依然满足要求。本文提出的工业 CT 图像圆测量算法对噪声干扰具有很好的抑制能力,能满足准确描述工业 CT 图像中圆形结构的要求。

关键词: Arclet 数字变换;圆特征;圆测量;多尺度几何分析;工业断层扫描(CT)

中图分类号: TG115.281; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2400

Fast Arclet transform and its application in circle measurement of industrial CT images

LI Zong-jian*, ZOU Xiao-bing

(Department of Mathematics and Information Engineering,
Chongqing University of Education, Chongqing 400067, China)

* Corresponding author, E-mail: joyli11@sohu.com

Abstract: To accurately describe the circular structures of industrial CT images, a measurement algorithm based on multi-scale geometric analysis tool, named Arclet, was presented. Firstly, a fast mono-scale Arclet numeric transform algorithm was designed through analysis of the spatial relationship between mono-scale Arclet basis functions. Then, the candidate circular features at mono-scale were extracted based on the mono-scale numeric transform transform. By considering the spatial relationship between Arclet basis functions at adjacent scales and the multi-scale tree structure, the candidate circular features between adjacent scales were chosen from a root to leafs. Finally, the surplus circular feature of each scale was fused to obtain the extracted results, and to calculate the related parameters such as radius based on the extracted results. The circle measurement for an actual industrial CT image was performed and the measurement results show that the absolute value of maximum radius absolute error is less than 0.1 mm and that of maximum radius relative error is less than 5%. Even

收稿日期:2015-05-07;修订日期:2015-06-09.

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(No. KJ131505, No. KJ121507);重庆市基础与前沿研究计划资助项目(No. cstc2014jcyjA40040)

if adding the Gauss noise of different intensities into the original industrial CT image, the measurement results are still can meet the requirements. The measurement algorithm based on fast Arclet transform has better ability to inhibit the noise interference and meet the requirements of industrial CT images for circular structure description.

Key words: Arclet numeric transform; circular feature; circular measurement; Multi-scale Geometric Analysis(MGA); industrial Computed Tomography(CT)

1 引 言

无损检测是常用的检测技术,其检测精度受材料和结构件的均匀性、质量和使用的可靠性的影响。计算机断层成像(Computed Tomography, CT)是重要的无损检测技术之一,其不仅能真实地再现被检物内部结构的详细信息,还能精确测量出被检物的各种内外参数,因此,在人们的生产生活中有着广泛的应用^[1-3]。

工业 CT 图像的信息量丰富,而人们感兴趣的信息常常以一些低维几何特征的形式出现,若能准确描述这些低维几何特征,即可完成对工业 CT 图像的准确理解。圆形结构是一种在工业 CT 检测对象中大量存在的特征,对其进行有效提取并获得精确的参数,在实际应用中具有重要的意义^[4],例如,在基于工业 CT 的逆向设计时,利用被检测物 CT 图像中的特征参数,可得到特征的计算机辅助设计(CAD)图形,进而可得到被检测物的设计图纸。

随着科学技术的快速进步,特征提取的研究呈现出如下趋势:多尺度提取、多种提取方法的有效融合、多元提取等。多尺度几何分析(Multi-scale Geometric Analysis, MGA)符合特征提取的发展趋势,其目的是通过对某类高维数据几何结构进行高效地逼近,从而更好地检测、表示、处理该类高维数据。根据变换类型的不同,多尺度几何分析方法可分为两大类,一类是使用多分辨率、局部、方向+各向异性基函数或框架的变换域方法,以 Curvelet^[5]、Contourlet^[6]、Bandelet^[7] 等为代表;另一类是考虑某种几何结构的空域方法,以 Wedgelet^[8]、Beamlet^[9]、Platelet^[10]、Surflet^[11] 等为代表。在国内,多尺度几何分析技术的研究工作起步不久,正处发展中^[12-15]。工业 CT 图像中的圆形结构,常常以不同灰度区域交界线的形式存在,其对应的数学模型可归结为水

平图像模型。在各式各样的多尺度几何分析工具中,Arclet^[16]对含有边界函数为 $f \in C^\alpha, 2 < \alpha < 3$ 的水平图像模型具有 $O(N^{-\alpha}), 2 < \alpha < 3$ 的逼近率。因此,本文以 Arclet 作为研究工具,对工业 CT 图像中的圆形结构进行准确描述。

本文旨在研究 Arclet 变换的快速数字实现及其在工业 CT 图像圆测量中的应用。首先,通过分析单尺度 Arclet 基函数间的空间关系,设计出单尺度快速 Arclet 数字变换;接着,基于单尺度快速 Arclet 数字变换,提取出单尺度上的候选圆特征;然后,通过考虑 Arclet 相邻尺度基函数间的空间关系,并结合多尺度二叉树结构,按照从根到叶的方向,依次对相邻尺度间的候选圆特征进行取舍;最后,融合各尺度剩余的候选圆特征,得到提取结果,并对半径等相关圆参数进行测量。通过实际工业 CT 图像的试验验证证实了本文算法的有效性和先进性。

2 Arclet 定义及其快速数字变换设计

2.1 连续 Arclet 定义

令 $S=[0,1]^2$ 表示一幅连续的图像,对任意的 $x_c=(x_{c,1}, x_{c,2}) \in \mathbf{R}^2$ 和 $r \in \mathbf{R}^+$,集合 $A_{x_c,r}(S)$ 和 $B_{x_c,r}(S)$ 称为一对互补的 Arclets,则有:

$$\begin{aligned} A_{x_c,r}(s) &= \{(u_1, u_2) \in S: r^2 \leq (u_1 - x_{c,1})^2 + (u_2 - x_{c,2})^2\} \\ B_{x_c,r}(s) &= \{(u_1, u_2) \in S: r^2 > (u_1 - x_{c,1})^2 + (u_2 - x_{c,2})^2\} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)给出了 Arclet 在连续图像中的定义,对于

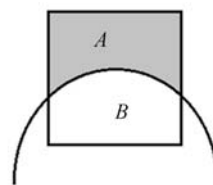


图 1 连续 Arclet 示例

Fig. 1 An example of continuous Arclet

数字图像处理而言,还需给出其离散化的形式,设计出相应的数字算法。图 1 为连续 Arclet 示例。

2.2 离散 Arclet 设计

对于一幅 $n \times n (n=2^j, j \in N)$ 的图像,对其进行二进递归划分,并标注每一小块的边界点,则每对标注点的连线将原图像分成两块区域,每块区域就是一个 Wedgelet。以这对标注点的连线为基础,在其中垂线上任取一点作为圆心,圆心到某一标注点的距离作为半径,就可以构造出经过该对标注点的互补 Arclets。理论上,对于每对标注点均能构造出无数对 Arclet,这不利于具体数字实现。因此,本文从实际应用角度出发,对于每对标注点,只保留以其连线的中点为圆心、标注点间的距离为最大直径构造得到的一系列互补 Arclets。离散 Arclet 设计示例如图 2 所示。



图 2 离散 Arclet 示例

Fig. 2 An example of discrete Arclet

2.3 单尺度 Arclet 空间关系分析

对于一幅 $n \times n (n=2^j, j \in N)$ 的图像,在最大分解尺度的情形时(即 1 pixel 为 1 个图像区域),其外围标注点共有 $4n$ 个,理论上共有 C_{4n}^2 种选择标注点对的方法。根据每对标注点的相对位置关系,可以将它们分为同边型、邻边型、对边型。

一幅图像有 4 条边,因此,同边型可分为 4 大类情形(上边、右边、下边、左边,如图 3 所示),邻边型可分为 4 大类情形(上右、右下、下左、左上),对边型可分为 2 大类情形(上下、左右)。再结合斜率(即每对标注点连线的斜率)对每大类情形作进一步细分,则邻边型可分为 4 大类 8 小类情形(如图 4 所示),对边型可分为 2 大类 4 小类情形(如图 5 所示)。

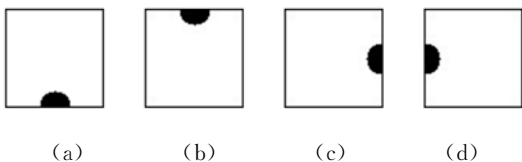


图 3 同边型

Fig. 3 Same side types

从图 3、图 4、图 5 分别可以看到,不同的同边

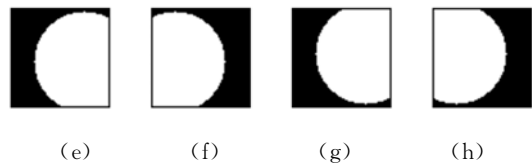
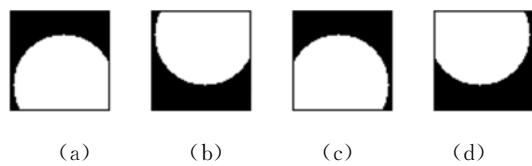


图 4 邻边型

Fig. 4 Adjacent edge types

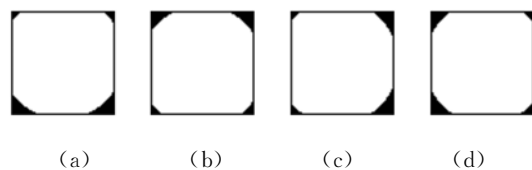


图 5 对边型

Fig. 5 Opposite edge types

型、邻边型、对边型标注点对构造所得的 Arclets,可能具有形状相同、位置和方向不同的 Arclets。因此,在实际计算某个 Arclet 所覆盖的图像区域时,并不需要计算该区域的坐标,根据本人的设计,只需分别计算同边型、邻边型、对边型各自一小部分 Arclets 所覆盖的图像区域,剩余大部分 Arclets 所覆盖的图像区域,可通过下述的空间坐标变换快速得到。

建立如图 6 所示的图像坐标系。

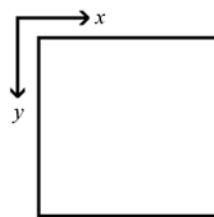


图 6 图像坐标系

Fig. 6 Image coordinate

假设已知图 3(a)中 Arclets 覆盖的图像区域,则图 3(b)中 Arclets 覆盖的图像区域可在 3(a)的基础上通过 y 方向的图像矩阵翻转得到,图 3(c)和 3(d)中 Arclets 覆盖的图像区域可分别在 3(a)和 3(b)的基础上通过图像矩阵转置得到;若已知图 4(a)中 Arclets 覆盖的图像区域,则图 4(b)-4(d)中 Arclets 覆盖的图像区域可分别在 4

(a)的基础上通过 y 方向的图像矩阵翻转、 x 方向的图像矩阵翻转、 y 方向和 x 方向同时的图像矩阵翻转得到,图 4(e)-4(h)中 Arclets 覆盖的图像区域可在 4(a)-4(d)的基础上,分别通过图像矩阵转置得到;若已知图 5(a)中 Arclets 覆盖的图像区域,则图 5(b)中 Arclets 覆盖的图像区域可在 5(a)的基础上通过 y 方向的图像矩阵翻转得到,图 5(c)和 5(d)中 Arclets 覆盖的图像区域可分别在 5(a)和 5(b)的基础上通过图像矩阵转置得到。

2.4 单尺度快速数字变换算法描述

记一对标注点分别为 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$, 线段 P_1P_2 的中点为 C 、长度为 l 。

同边型标注点对构造所得 Arclets 的数字变换:

```

 $y_1 = n, y_2 = n;$ 
for  $x_1 = 0 : n - 1$ 
  for  $x_2 = x_1 + 1 : n$ 
    transform( );
  end
end

```

邻边型标注点对构造所得 Arclets 的数字变换:

```

 $y_1 = n, x_2 = n;$ 
for  $x_1 = 0 : n - 1$ 
  for  $y_2 = x_1 : n - 1$ 
    transform( );
  end
end

```

对边型标注点对构造所得 Arclets 的数字变换:

```

 $x_1 = 0, x_2 = n;$ 
for  $y_1 = n - 1 : 0$ 
  for  $y_2 = y_1 : 0$ 
    transform( );
  end
end

```

其中, transform() 包括:

第 1 步, 分别计算 C 和 l 的值;

第 2 步, 以 C 为圆心, 以 $l/2$ 为最大半径并按等差数列递减的方式选取半径值, 依次构造 Arclets, 分别标记各 Arclets 覆盖的图像区域, 计算并存储 Arclets 区域内所有像素的均值;

第 3 步, 分别通过 y 方向的图像矩阵翻转、 x 方向的图像矩阵翻转、 y 方向和 x 方向同时的图

像矩阵翻转、图像矩阵转置等空间变换, 得到相同形状 Arclets 覆盖的图像区域, 计算并存储各自 Arclets 区域内所有像素的均值。

3 工业 CT 图像圆特征提取和测量

本文提出的基于快速 Arclet 变换的工业 CT 图像圆特征提取和测量算法的整体思路如图 7 所示。第 1 步, 单尺度上候选圆特征的提取; 第 2 步, 相邻尺度间候选圆特征的取舍; 第 3 步, 各尺度剩余候选圆特征的融合; 第 4 步, 得到提取结果, 并测量圆心、半径等特征参数。

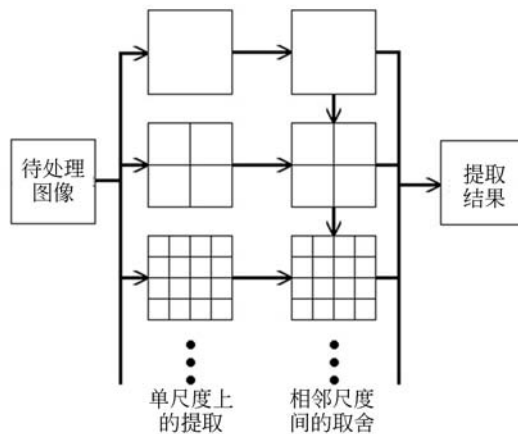


图 7 提取思路

Fig. 7 Extraction idea

3.1 单尺度上候选圆特征的提取

对于一幅 $n \times n (n = 2^j, j \in \mathbb{N})$ 的图像, 在某种分解尺度 $i (0 \leq i \leq j, i \in \mathbb{N})$ 时, 分别找出该尺度每一图像区域 $S_{i,k} (0 \leq i \leq j, 0 \leq k \leq 4^{i-1}, i, k \in \mathbb{N})$ 内满足式(2)的圆心 $C_{i,k}$ 和半径值 $r_{i,k}$ 。

$$m = \max |m_1 - m_2|, \quad (2)$$

其中: m_1 和 m_2 为互补 Arclets 图像区域内像素的均值。

当 $m > T$ (其中, T 为一阈值) 时, 则认为当前图像区域内有候选圆特征存在, 保存 $m, C_{i,k}$ 和 $r_{i,k}$, 为接下来相邻尺度间的综合考虑做准备。

3.2 相邻尺度间候选圆特征的取舍

不同单尺度上的提取结果构成空间上的一种二叉树结构。由图 8 可以看到, 大尺寸互补 Arclets 的交界线可能会经过 1、2、3 或 4 个相邻小尺寸的图像区域。因此该交界线呈现出的圆特征, 既可以在大尺寸图像区域内描述, 也可以在相

邻小尺寸图像区域内描述,判断到底选用哪个尺度对其进行描述更好,单尺度分析就不具备多尺度分析的灵活性。

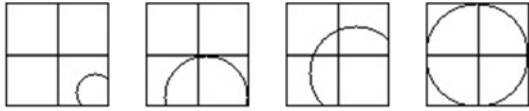


图 8 Arclet 相邻尺度关系

Fig. 8 Arclet relationship between adjacent scales

记大尺寸图像区域为 S , 相邻 4 个小尺寸图像区域分别为 S_1, S_2, S_3, S_4 , 互补 Arclets 图像区域内的像素均值分别为 m_1 和 m_2 。式(3)和式(4)的判断按照二叉树结构从“根”到“叶”的方向进行。当式(3)和式(4)均成立时,舍弃大尺寸,保留小尺寸图像区域的候选圆特征,每个小尺寸图像区域继续向相邻的更小尺寸的图像区域进行判断,以此类推;否则,舍弃小尺寸,保留大尺寸图像区域的候选圆特征,此时,该图像区域不再继续向“叶”的方向进行判断。

$$\max_{m_1, m_2 \in S} |m_1 - m_2| \leq \max(\max_{m_1, m_2 \in S_i} |m_1 - m_2|, i=1, 2, 3, 4), \quad (3)$$

$$\max_{m_1, m_2 \in S} |m_1 - m_2| \leq \sum_i \max_{m_1, m_2 \in S_i} |m_1 - m_2| / N, \quad (4)$$

其中, N 表示大尺寸互补 Arclets 的交界线经过相邻小尺寸图像区域的个数。

式(3)表明相邻小尺寸图像区域存在比大尺寸图像区域更明显的圆特征。式(4)是为了限制将长的候选圆特征划分成短的候选圆特征的情形发生。

4 试验结果及分析

4.1 试验图像

试验图像如图 9 所示(共包含 10 个感兴趣的圆特征), 它由重庆大学 ICT(Industrial Computed Tomography) 研究中心 CD-650BX 工业 CT 系统扫描重建所得, 图像矩阵尺寸为 $800 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$, 扫描视场直径为 398.872 mm 。

4.2 提取及测量结果

圆特征提取结果及相应的参数检测结果分别如图 10、表 1 所示。

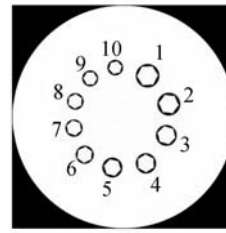


图 9 试验图像

Fig. 9 Test image

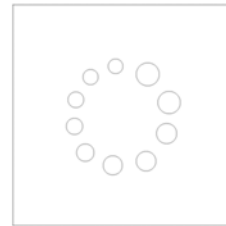


图 10 提取结果图像

Fig. 10 Extraction results

表 1 圆参数检测结果

Tab. 1 Detection results of circle parameters

序号	圆心坐标/ pixel	半径测量值 /pixel	半径真 实值 /mm	半径绝 对误差 /mm	半径相 对误差 /(%)
1	(485, 252)	42.024	20.953	21.030	-0.077 - 0.366
2	(562, 354)	41.046	20.465	20.420	0.045 0.220
3	(553, 466)	37.234	18.565	18.590	-0.025 - 0.134
4	(479, 566)	36.511	18.204	18.125	0.079 0.436
5	(359, 581)	35.766	17.833	17.810	0.023 0.129
6	(260, 535)	32.092	16.001	16.075	-0.074 - 0.460
7	(221, 440)	30.825	15.369	15.350	0.019 0.124
8	(226, 344)	29.553	14.735	14.780	-0.045 - 0.304
9	(279, 262)	28.483	14.201	14.240	-0.039 - 0.274
10	(369, 223)	28.011	13.966	13.925	0.041 0.294

从表 1 的检测结果可以看到, 最大半径绝对误差的绝对值 $< 0.1 \text{ mm}$, 最大半径相对误差的绝对值 $< 0.5\%$, 完全符合工业 CT 图像圆特征测量精度的要求。

4.3 加噪情况下的检测结果

考虑到工业 CT 图像在成像过程中或多或少会引入一定量的噪声, 因此对本文方法的抗噪性做进一步的试验验证。结合工业 CT 图像噪声源的特点, 对图 9 所示的试验图像分别加入不同强度的高斯噪声, 与原试验图像的对比检测结果如表 2 所示。

表 2 抗噪性测试
Tab.2 Robustness test (pixel)

序 号	均值 0 标准差 10		均值 0 标准差 100		均值 0 标准差 1000	
	圆心 坐标 偏离	半径 测量 值偏离	圆心 坐标 偏离	半径 测量 值偏离	圆心 坐标 偏离	半径 测量 值偏离
1	0	0	0	0	0	0
2	0	<1	<1	<1	<1	<1
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	<1	<1	<1	0
6	<1	<1	<1	<1	<1	<1
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0

从表 2 的对比检测结果可以看到,本文方法具有较强的抗噪性。这是因为 Arclet 以区域均值的方式分析图像,本身对噪声就有一定的抑制作用,即使在不加降噪预处理的情况下直接进行提取,也能达到较好的检测结果。

4.4 检测结果的对比

文献[4]利用基于 Facet 模型进行亚像素图像边缘的检测,通过计算圆存在概率的大小识别边缘图像中的圆,并实现圆参数的精确测量。将本文方法的检测结果与文献[4]方法的检测结果进行对比,对比结果如表 3 所示。

从表 3 的对比结果可以看到,虽然本文方法比文献[4]的方法需要的时间开销更大(3 倍左右,具体耗时与计算机配置、提取圆特征的个数、算法参数设置等相关,以 IntelG630 + 2G + win7 + vs2010,尺度分别为 64、32、16,半径步长为 0.5 pixel 为例,图 9 中平均每个圆特征的时间

开销在 20 s 左右),但检测得到的结果更加值得信赖。

表 3 对比结果
Tab.3 Comparison results

对比项	方 法	
	本文	文献[4]
最大半径绝对误差绝对值/mm	0.079	0.095
最大半径相对误差绝对值/(%)	0.460	0.460
平均半径绝对误差绝对值/mm	0.047	0.065
平均半径相对误差绝对值/(%)	0.274	0.370
抗噪性	强	较强
时间开销	大	小

5 结 论

本文介绍了连续 Arclet 的定义,并根据实际需要设计出它的数字实现方式。通过寻找单尺度基函数间的空间关系,设计出单尺度快速 Arclet 数字变换,达到了减少计算开销的目的。综合考虑相邻尺度间的空间关系和多尺度四叉树结构,设计了基于快速 Arclet 变换的工业 CT 图像圆形结构测量算法。最后通过实际工业 CT 图像试验,验证了算法的有效性和抗噪性。在检测结果中,最大半径绝对误差的绝对值<0.1 mm,最大半径相对误差的绝对值<0.5%,完全符合工业 CT 图像圆特征测量精度的要求。

本文的方法除了适用于工业 CT 图像的圆特征测量外,对其它类型图像的圆特征检测也具有一定的参考价值。

下一步的研究重点一方面是通过引入新的基函数将圆特征的测量拓展到更一般的曲线特征测量中;另一方面是将本文方法推广到球或球面等 3D 特征的提取和测量。

参考文献:

[1] 吕宁,徐更光.基于工业计算机断层成像的装药底隙无损检测方法研究[J].兵工学报,2015,36(1):157-162.
LV N, XU G G. Inspection of base separation of charge by industrial CT imaging[J]. ACTA ARMAMENTARII, 2015, 36(1):157-162. (in Chinese)
[2] 王林元,刘宏奎,李磊,等.基于稀疏优化的计算

机断层成像图像不完全角度重建综述[J].物理学报,2014,63(20):208702.
WANG L Y, LIU H K, LI L, et al.. Review of sparse optimization-based computed tomography image reconstruction from few-view projections [J]. Acta Phys. Sin., 2014, 63(20):208702. (in Chinese)
[3] 黄娅,徐荣栏,沈超,等.利用计算机断层成像方法由观测图像重建等离子体层全球密度分布——投影数据不完备问题[J].地球物理学报,2012,55

- (4):1071-1077.
- HUANG Y, XU R L, SHEN CH, *et al.*. Deduction of the global density of the plasmasphere reconstructed from the observation images using computer tomography technique—Incomplete projection data[J]. *Chinese J. Geophys.*, 2012, 55(4): 1071-1077. (in Chinese)
- [4] 刘丰林, 乔桂锋, 邹斌. 工业 CT 图像圆精确测量[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2842-2848.
- LIU F L, QIAO G F, ZOU B. Precise measurement of circles in industrial computed tomographic images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2842-2848. (in Chinese)
- [5] CANDES E J, DONOHO D L. Curvelets—a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges[C]. *Proceedings of Curve and Surface Fitting, Saint-Malo, Nashville, TN.*, 1999.
- [6] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2005, 14(12): 2091-2106.
- [7] ENNEC E L, MALLAT S. Sparse geometric image representations with bandelets[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(4): 423-438.
- [8] DONOHO D L. Wedgelets: nearly-minimax estimation of edges [J]. *Annals of Statistics*, 1999 27(3): 859-897.
- [9] DONOHO D L, HUO X M. Beamlets and multi-scale image analysis [C]. Berlin, Germany: Springer Press, 2001, 20: 149-196.
- [10] WILLETT R M, NOWAK R D. Platelets: a multiscale approach for recovering edges and surfaces in photon-limited medical imaging [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2003, 22(3): 332-350.
- [11] CHANDRASEKARAN V, WAKIN M B, BARON D, *et al.*. Representation and compression of multidimensional piecewise functions using surflets [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2009, 55(1): 374-400.
- [12] 彭真明, 景亮, 何艳敏, 等. 基于多尺度稀疏字典的多聚焦图像超分辨率融合[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 169-176.
- PENG ZH M, JING L, HE Y M, *et al.*. Super-resolution fusion of multi-focus image based on multiscale sparse dictionary [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 169-176. (in Chinese)
- [13] 周妍, 李庆武, 霍冠英. 基于非下采样 Contourlet 变换系数直方图匹配的自适应图像增强[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2214-2222.
- ZHOU Y, LI Q W, HUO G Y. Adaptive image enhancement based on NSCT coefficient histogram matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2214-2222. (in Chinese)
- [14] 龚俊亮, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于贝叶斯估计的剪切波域局部自适应图像去噪[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(5): 799-804.
- GONG J L, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Local adaptive image denoising based on Bayesian estimation in shearlet domain [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(5): 799-804. (in Chinese)
- [15] 傅瑶, 孙雪晨, 薛旭成, 等. 基于非下采样轮廓波变换的全色图像与多光谱图像融合方法研究[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(3): 429-434.
- FU Y, SUN X CH, XUE X CH, *et al.*. Panchromatic and multispectral image fusion method based on nonsubsampling contourlet transform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 429-434. (in Chinese)
- [16] PONGPIYAPAIBOON P. *Development of efficient algorithm for geometrical representation based on arclet decomposition* [D]. Bavaria: Munich Technology University, 2005.

作者简介:



李宗剑(1981—),男,重庆人,博士,副教授,2004年、2007年、2010年于重庆大学分别获得理学学士、理学硕士、工学博士学位,主要从事数字图像处理、模式识别的研究。E-mail: joyli11@sohu.com



邹晓兵(1974—),男,四川大竹人,博士,副教授,1997年于重庆师范大学获得理学学士学位,2007年、2010年于重庆大学分别获得理学硕士、工学博士学位,主要从事 CT 扫描方式、成像算法的研究。E-mail: xiaobingzou@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)