

工业 CT 图像的亚像素级面积测量

马睿^{1,2}, 曾理^{1,2}, 卢艳平¹

MA Rui^{1,2}, ZENG Li^{1,2}, LU Yan-ping¹

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 数理学院, 重庆 400044

1.ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2.College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China

E-mail: drlizeng@hotmail.com

MA Rui, ZENG Li, LU Yan-ping. Sub-pixel area measurement method of ICT image. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(15): 233-236.

Abstract: In order to improve the accuracy of ICT (Industry Computerized Tomography) image measurement, a sub-pixel area measurement method based on Facet model is studied, and applied in actual ICT images. Firstly, an edge detection method based on Facet model is used to extract the sub-pixel edges. Secondly, the method of minimizing distance search is studied to separate and sort the edge of the measured object. At last, Green formula is adopted to compute the area. The edge detection method based on Facet model can achieve higher accuracy, reduce noise, and offer accurate data for further area measurement. The method of minimizing distance search method can separate the edge points of the measured object from the discontinuous edges of whole image, obtain sorted edge point chain, and offer available data for area computing. The measure method in this paper is based on sub-pixel edge; break through the restriction of measure precision by image resolution. Experiments have been done on emulation images and actual CT images, and the results prove that the accuracy of this paper's method is higher than the method of counting pixel.

Key words: image processing; Industry Computerized Tomography (ICT); Facet model; sub-pixel; area measurement

摘要: 为了提高工业 CT 图像测量的精度, 研究了一种基于 Facet 模型的亚像素级面积测量方法, 并将其应用于实际的工业 CT 图像测量中。首先采用基于 Facet 模型的边缘检测算法提取亚像素边缘, 然后通过最小距离搜索法分离出待测目标的边缘点并排序, 最后利用离散化的格林公式计算面积。其中, 基于 Facet 模型的边缘检测算法精度高、抗噪声能力强, 能为后续基于边缘的测量提供高精度的数据; 最小距离搜索法在浮点型边缘点上实现了待测目标边缘与整幅图像边缘的分离, 并生成排序链码, 克服了边缘点是浮点型且不连续的困难, 给面积的计算提供了有效的数据。测量方法是在亚像素边缘上进行的, 突破了图像分辨率对测量精度的限制, 使在低分辨率的图像上实现高精度的测量成为可能。分别针对仿真图像和实际的工业 CT 图像进行了实验, 实验结果表明该方法的测量精度高于普遍采用的像素累加法。

关键词: 图像处理; 工业 CT; Facet 模型; 亚像素; 面积测量

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.15.068 文章编号: 1002-8331(2009)15-0233-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391

1 引言

工业 CT (Industry Computerized Tomography, ICT) 技术作为 20 世纪 80 年代发展起来的先进射线无损检测技术, 它采用穿透能力较强的 X 射线或 γ 射线, 从不同角度扫描被测物体, 获得射线投影值并重建出物体断面图像。由于其具有非破坏性、影像不重叠、可检测物体内部结构等特点, 被广泛应用于机械制造、航空航天等领域。基于工业 CT 图像的测量, 是以工业

CT 切片图像为研究对象, 计算两点间距离、目标的面积、表面积和体积等参数, 可用于工业产品的质量检测及逆向制造等。在基于工业 CT 图像的测量中, 目标面积的测量是重要的内容。

提高测量精度的主要途径有两个: 一是可通过提高硬件设备的性能来实现, 如提高扫描系统分辨率等; 二是可利用软件提高精度, 如提高图像分割算法的精度等。其中, 前者不但提高了设备成本, 而且在精度的提高上也是有限; 后者方法简单有

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60672098); 国家高技术研究发展计划 (863) (the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA04Z104); 教育部春晖计划项目 (No.Z2005-2-63001)。

作者简介: 马睿 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为图像测量与处理; 曾理 (1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为工业 CT 图像重建、图像处理与测量; 卢艳平 (1979-), 男, 实习研究员, 主要研究领域为图像处理、图像测量及可视化技术。

收稿日期: 2008-04-01 修回日期: 2008-06-15

效、设备成本低,成为提高测量精度的重要途径。

如果将图像上的特征目标定位在亚像素级别,就相当于提高了测量系统精度。当算法的测量精度为 0.1 像素,相当于测量系统的硬件分辨率提高了 10 倍。因此,亚像素定位技术具有十分重要的理论意义和实践意义。目前,常用的亚像素边缘检测方法主要有以下几类:基于一阶微分期望值、小波变换、矩、插值、拟合等的亚像素边缘检测算法。上述方法都能提取亚像素级边缘,但是大多有抗噪能力弱或获得的边缘不够连续等不足。而基于 Facet 模型的亚像素边缘检测算法^[1-5]充分利用了相邻点的相关信息,具有抗噪能力强、定位精度高等优点,解决了高精度测量中的瓶颈问题,在国内外图像检测领域获得了广泛地应用。

在面积的测量上,普遍采用的方法是像素累加法^[6-10]。也就是先通过鼠标勾画或者图像分割算法分离出待测目标,再统计目标中的像素点数目作为目标的面积。这种方法简单,易于实现,但是精度不高。为了提高测量精度,研究了一种基于 Facet 模型的亚像素级面积测量方法,并将其应用于实际工业 CT 图像测量中。首先采用基于 Facet 模型的边缘检测算法提取亚像素边缘,然后通过最小距离搜索法分离出待测目标的边缘点并生成排序链码,最后利用离散化的格林公式计算面积。此方法是在亚像素边缘上进行的,测量精度高于像素级的累加法,而且有一定的抗噪能力。

2 面积测量方法的主要步骤

2.1 基于 Facet 模型的亚像素边缘检测

Facet 模型^[1]是由 Robert M.Haralick 于 1984 年首先提出的。假定一幅图像已经被划分为若干个连接着的区域,每个区域满足一定的灰度分布,Haralick 称这样的—个区域为一个 Facet。灰度分布要求每个 Facet 的灰度函数是其对应区域内像元行与列的多项式函数。对一幅图像而言,它可以用若干个相互连接着的 Facet 来近似。用 Facet 模型进行边缘检测^[2-5]是先对原始图像作正交多项式最佳曲面拟合,然后根据多项式的一、二、三阶方向导数确定边缘像素并进一步定位亚像素边缘位置。

2D Facet 模型利用当前像素 2D 邻域中的灰度值拟合为二元三次多项式,记为:

$$f(x, y, z) = k_1 + k_2x + k_3y + k_4x^2 + k_5xy + k_6y^2 + k_7xy^2 + k_8x^2y + k_9x^3 + k_{10}y^3 \quad (1)$$

这里的 x, y 分别表示像素在长、宽方向上的坐标。2D 邻域可以取为 5×5 像素集,通过该 5×5 数据集用最小二乘方法拟合上式,求得待定系数 k_1, k_2, \dots, k_{10} 。

为了推导,将上述的 2D Facet 模型改写为极坐标形式,令 $x = \rho \sin \alpha, y = \rho \cos \alpha$,代入式(1)有:

$$f_\alpha(\rho) = k_1 + (k_2 \sin \alpha + k_3 \cos \alpha)\rho + (k_4 \sin^2 \alpha + k_5 \sin \alpha \cos \alpha + k_6 \cos^2 \alpha)\rho^2 + (k_7 \sin^3 \alpha + k_8 \sin^2 \alpha \cos \alpha + k_9 \sin \alpha \cos^2 \alpha + k_{10} \cos^3 \alpha)\rho^3 \quad (2)$$

极坐标形式下多项式的一、二、三阶导数分别为:

$$f'_\alpha(\rho) = k_2 \sin \alpha + k_3 \cos \alpha + 2(k_4 \sin^2 \alpha + k_5 \sin \alpha \cos \alpha + k_6 \cos^2 \alpha)\rho + 3(k_7 \sin^3 \alpha + k_8 \sin^2 \alpha \cos \alpha + k_9 \sin \alpha \cos^2 \alpha + k_{10} \cos^3 \alpha)\rho^2 = (k_2 \sin \alpha + k_3 \cos \alpha) + A\rho + B\rho^2 \quad (3)$$

$$f''_\alpha(\rho) = A + 2B\rho, f'''_\alpha(\rho) = 2B$$

其中 A, B 是记号,可以通过 $f'_\alpha(\rho)$ 看出。

通过求 $f'_\alpha(\rho)|_{\rho=0}$ 最大值,可得梯度方向: $\sin \alpha = \frac{k_2}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}}$,

$$\cos \alpha = \frac{k_3}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}} \text{ 梯度模值为: } f'_\alpha = \sqrt{k_2^2 + k_3^2}.$$

计算 $f_\alpha(\rho)$ 前三阶方向导数 $f'_\alpha(\rho), f''_\alpha(\rho), f'''_\alpha(\rho)$,由以下准则判断是否为边缘像素:

(1) 计算 $f'_\alpha(\rho)$,若 $f'_\alpha(\rho) \neq 0$ 且必须大于阈值 T ,当小于等于 T 时即认为是噪声, T 由实验确定;

(2) 计算 $f''_\alpha(\rho), f'''_\alpha(\rho)$ 应小于零,即定义边缘点沿梯度方向二阶方向导数零交叉处是负斜坡;

(3) 令 $f'''_\alpha(\rho) = 0$, 求出 $\hat{\rho} = -\frac{A}{B}$, $|\hat{\rho}|$ 应小于 0.5, 即半个像素。

如果满足以上 3 个条件,即可认为待处理像素是边缘像素,其准确位置可以通过下式计算出:

$$\begin{cases} \hat{x} = x_i + \hat{\rho} \sin \alpha \\ \hat{y} = y_i + \hat{\rho} \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中, \hat{x}, \hat{y} 是边缘点坐标的估计值, x_i, y_i 是像素整数坐标。

通过 Facet 模型拟合图像灰度,再根据沿梯度方向的二阶导数零点获得边缘点的亚像素级精确位置。传统的边缘检测算法提取是像素级的边缘,而基于 Facet 模型的边缘检测算法提取的是亚像素边缘点,能为后续的测量提供高精度的边缘数据,这为高精度的测量创造了前提条件。

2.2 最小距离搜索法分离目标边缘点并生成排序链码

为了提高测量精度,采用基于 Facet 模型的边缘检测算法提取的亚像素边缘计算目标的面积。而此算法提取的是整幅图像的边缘点,需要把目标上的边缘点与其他边缘点分离出来。而且利用格林公式计算面积时,要求边缘点按一定的顺序排放。

在数字图像上,如果像素级边缘点是连续的,可以采用八邻域跟踪的方法将目标边缘位置坐标分离并排序,得到边缘点链码。但是这里的亚像素边缘点是浮点型的,而且有可能有小的断裂,所以不能用八邻域跟踪的方法。研究了最小距离搜索的方法解决了此问题,在亚像素边缘上实现了目标边缘点的分离和排序。最小距离搜索算法的步骤如下:

(1) 在目标上任选一个点,找到离这个点最近的边缘点作为搜索的起点,也作为处理的当前点,并将它的坐标存入目标边缘点链码;

(2) 找出离当前点最近的边缘点,把它作为当前点,并将它的坐标存入目标边缘点链码;

(3) 重复步骤(2),直到回到搜索的起点,则终止操作。

通过最小距离搜索法,解决了边缘是浮点型和有微小断裂的问题,把待测目标的边缘点从整幅图像的边缘点中分离出来,并且按一定的顺序排放,为下一步面积的计算打下了基础。该搜索算法实际上是在跟踪的同时,把断裂的相邻边缘点之间用直线段连接起来,形成封闭轮廓,便于用格林公式计算面积。其不足之处在于,如果断裂的相邻边缘点离太远,若直接用直线连起来,势必与原边缘有一定偏差,会造成计算的面积精度降低。

2.3 面积的计算

在用最小距离搜索算法得到了目标边缘点的排序链码后,目标的面积可由格林公式 $A = \frac{1}{2} \int (xdy - ydx)$ 进行计算,将其离散化后可以得到:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_i} [x_i(y_{i+1} - y_i) - y_i(x_{i+1} - x_i)] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_i} [x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}] \quad (5)$$

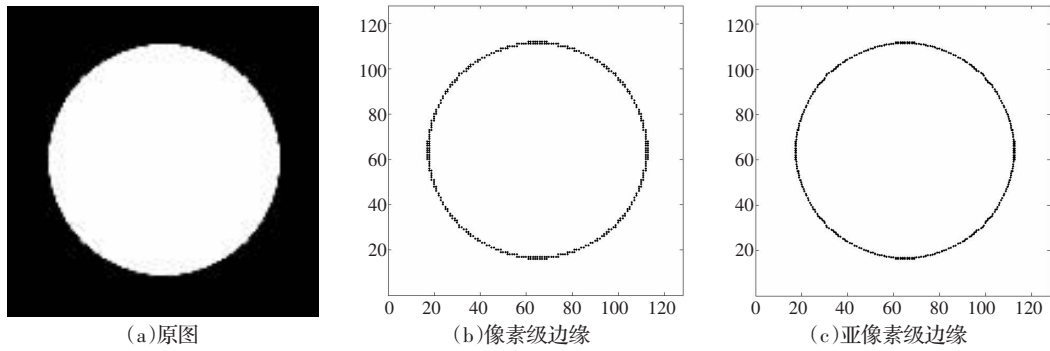


图1 仿真圆的测量图

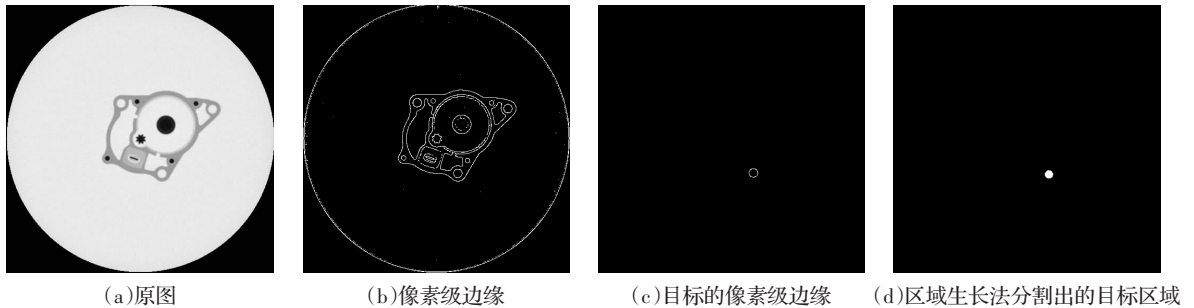


图2 实际圆孔面积的测量图

图像面积测量中常用的是像素累加法,其算法简单、易于实现,但是其精度不高。因为它的精度受制于两个因素:一是图像的分辨率;二是图像分割算法的精度。所以,像素累加法的精度提高很难。与像素累加法不同的是本文方法不受限于图像分辨率的限制。只要采用的边缘检测算法精度高,就可以得到高精度的面积。

3 实验及结果

3.1 仿真圆的测量

为了验证面积测量方法的精度,在 128×128 的图像中,构造一个直径为 $D=95$ 的圆模型(面积为: $S=\pi(D/2)^2=7\,084.6$),如图 1(a)。首先采用基于 Facet 模型的边缘检测算法提取边缘。从提取效果来看,该算法提取的像素级边缘比较精细;而相对于的像素级边缘而言,亚像素级边缘消除了锯齿状现象,更光滑,更接近实际物体的轮廓,如图 1(b)、(c)。分别利用传统的像素累加法和本文的方法测量圆的面积,而且给出了两种方法的测量精度,如表 1。从测量结果可以看出,本文的方法精度高。这里的原始图像是二值图像,没有加入二值化处理时的误差。如果是一般的灰度图像,采用像素累加法计算面积,先要对图像进行二值化处理,而一般的二值化处理算法的精度都不高,会导致计算的面积精度更低。而本文的方法已经涵盖了边缘检测的误差和面积计算的误差,所以对于一般的灰度图像,测量精度不会降低。

表1 仿真圆面积的测量

	像素 ²		
	理论值	像素累加法	本文的方法(亚像素级)
圆的面积	7 084.6	7 049	7 120
相对误差	--	0.005 0	0.002 1

3.2 实际圆孔的测量

针对实际的工业 CT 图像进行实验,这里采用的是电机切片序列中的一张图像,如图 2(a)。

在进行测量之前,先要对该图像中一个像素代表的实际尺寸进行标定,将目标面积的单位转换为平方毫米。对于 CT 图像,可以根据扫描时的视场直径和重建出的图像尺寸算出标定系数。这里算出的这幅电机图上每个像素代表的实际尺寸是: $0.449\,2\text{ mm} \times 0.449\,2\text{ mm}$ 。对于其他图像,可以在图上选一个大的参照物,先用图像处理的方法得到它在图像上的尺寸,再用游标卡尺量出它的实际尺寸,进而换算出标定系数。

选取最下方的小圆为待测目标,用游标卡尺测得其在电机上对应的圆孔的直径是 7.30 mm ,则圆孔的截面面积为: $3.141\,6 \times (7.30/2)^2 = 41.854\,0\text{ mm}^2$ 。利用像素累加法(用区域生长法分割目标)和本文方法测量其面积,如表 2,如果把游标卡尺测量的值暂时作为理论值,计算了这两种方法的相对误差,可以看出,本文的方法精度较高。

表2 实际圆孔面积的测量

	mm ²		
	游标卡尺测量	像素累加法	本文的方法(亚像素级)
圆孔的面积	41.854 0	38.943 7	42.878 4
相对误差	--	0.069 5	0.024 5

3.3 任意形状区域的测量

对于任意形状的区域,本文的方法也可以测量其面积,这里是对发动机切片序列^[2]的第 1 张图像(如图 3(a))进行实验,选择中间的大腔为待测目标。分别利用本文方法和像素累加法(用区域生长法分割目标)测量了它的面积,如表 3。由于该图中目标面积未知,故未计算测量误差,但是从测量结果可以看出,表 3 中几种算法测量值的大小趋势和表 1、表 2 中一致。

表3 任意形状的区域面积的测量

	像素 ²		
	像素累加法	本文的方法(像素级)	本文的方法(亚像素级)
区域的面积	2 956	3 025	2 984.1

另外,由于基于 Facet 模型的亚像素边缘检测算法的时间复杂度比较高,所以这里讨论一下本文测量方法的运算时间。

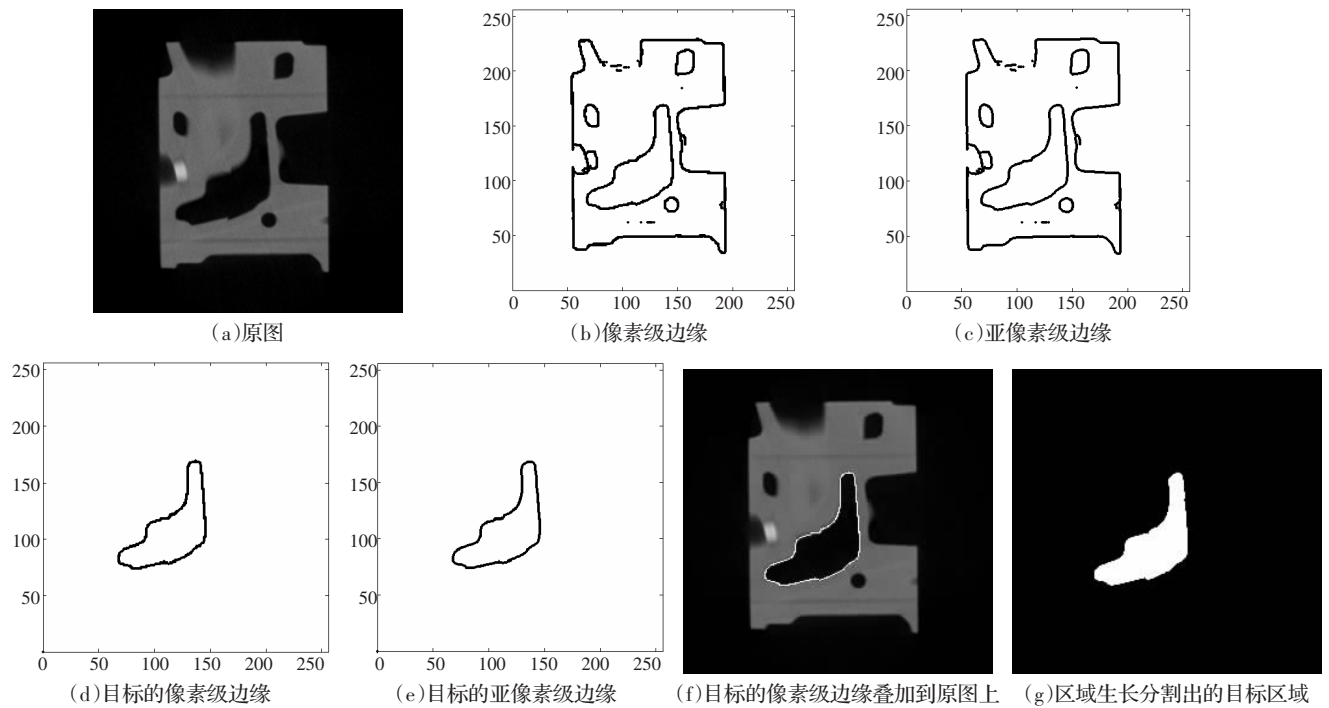


图3 任意形状区域的测量图

在 PC 机 (CPU 为 AMD Sempron™ Processor 2800+, 内存为 512 M) 和 Microsoft Visual C++ 6.0 的环境下, 对于图 1 中 128×128 和图 3 中 256×256 的图像, 基本上在点下鼠标后马上可以出结果, 运算时间约 1~2 s。对于图 2 中 512×512 的图像, 运算时间为 10 s (10 次运算的平均值)。可见本文测量方法的运算时间对于二维图像测量来说是可以接受的。

4 结束语

研究了一种基于 Facet 模型的亚像素级面积测量方法, 并将其应用于实际工业 CT 图像测量中, 实验结果表明该方法的抗噪能力强, 测量精度高。在该方法中, 基于 Facet 模型的边缘检测算法不仅能提取更接近实际物体的轮廓的亚像素边缘, 而且抗噪声能力强, 能为测量提供高精度的边缘数据; 最小距离搜索法有效的分离出目标边缘点并生成排序链码, 克服了边缘点是浮点型且不连续的困难, 给利用离散化的格林公式计算面积提供了有效的数据。该方法是在高精度的亚像素边缘上进行的, 突破了图像分辨率对测量精度的限制, 使在低分辨率的图像上实现高精度的测量成为可能。

参考文献:

- [1] Haralick R M. Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 26(2): 211-229.
- [2] Wu X G, Wee W G. Surface detection with subvoxel accuracy us-

ing 3-D directional derivatives[C]//Proceedings of the 1st Image Registration Workshop, Greenbelt, Maryland, USA, 1997: 319-329.

- [3] Matalas I, Benjamin R, Kitney R. An edge detection technique using the facet model and parameterized relaxation labeling[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(4): 328-341.
- [4] 王凯, 张定华, 黄鹤龄, 等. 基于 3-D Facet 模型的亚像素边缘检测算法研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 865-868.
- [5] 王凯, 张定华, 赵歆波, 等. 一种改进的基于 Facet 模型的亚像素表面检测算法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(3): 343-347.
- [6] Hara T, Yamamoto A, Zhou X, et al. Automated volume measurements of pulmonary emphysema on 3-D chest CT images[C]//International Congress Series, 2003: 1043-1048.
- [7] 张显全, 王公瑞, 秦东兴, 等. 肝血窦连续切片的计算机三维重建与参数测量[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1998, 21(2): 30-34.
- [8] 付树军, 阮秋琦, 穆成坡, 等. 基于非线性扩散滤波的边缘检测和图像测量[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 289-293.
- [9] 胡正磊, 孙进平, 袁运能, 等. 基于小波边缘提取和脊线跟踪技术的 SAR 图像河流检测算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 524-527.
- [10] 王茂春, 蓝春生, 孔广忠. 成人脏器的 CT 图像计算机三维测量与分析[J]. 国体视学与图像分析, 2000, 5(4): 206-210.
- [11] 曾理, 悦秀娟, 侯立华. 基于改进 Snake 模型的工业 CT 图像内窥显示及测量[J]. 计算机应用, 2007, 27(1): 177-179.
- [12] Engine[EB/OL]. (2001-09-26). <http://www.gris.uni-tuebingen.de/areas/scivis/volren/datasets/data/engine.raw.gz>.