

# 航空燃油喷嘴组件流道尺寸的 CT 测量方法

栾传彬<sup>1</sup>, 吕 健<sup>1</sup>, 韦会鸿<sup>2</sup>, 邹永宁<sup>2</sup>

(1. 中国航发集团南方航空工业集团有限公司, 株洲 412002;

2. 重庆大学 工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400044)

**摘 要:** 航空燃油喷嘴组件流道尺寸的控制对于航空器的可靠性和安全性具有至关重要的意义,传统方法是通过间接的流量试验来进行筛选,该方法不仅成本高而且效率低。提出了一种基于 CT 检测体数据的喷嘴组件流道偏移量的测量方法,其首先采用 RSF(区域可扩展拟合)模型分割喷嘴 CT 体数据的流道区域,然后提取流道内外轮廓面,接着采用最小二乘拟合方法计算流道内壁和外壁的圆方程,根据内外圆心距离得到流道的偏移量。采用该方法对标准喷嘴试样的 CT 图像进行测量,结果表明其能够精确提取流道轮廓表面数据,测量的线性误差为 0.010 4 mm,具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 航空燃油喷嘴;流道;CT;尺寸测量

**中图分类号:** TP391.41;TG115.28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6656(2023)06-0026-06

## CT measurement method for flow channel size of jet fuel nozzle assembly

LUAN Chuanbin<sup>1</sup>, LÜ Jian<sup>1</sup>, WEI Huihong<sup>2</sup>, ZOU Yongning<sup>2</sup>

(1. AECC Southern Aviation Industry Group Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China; 2. Industrial Computed Tomography NDT Engineering Research Center of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The control of the flow channel size of the jet fuel nozzle assembly is of great significance to the reliability and safety of the aircraft. The traditional method is to screen through indirect flow test, which is not only cost-effective but also inefficient. This paper presents a measurement method of flow channel offset of nozzle assembly based on CT volume data. Firstly, RSF (Region-Scalable Fitting) model was used to segment the flow channel area of nozzle CT volume data, and then the inner and outer contour surfaces of the flow channel were extracted. Then, the circular equations of the inner and outer walls of the flow channel were calculated by the least square fitting method, and the flow channel offset was obtained according to the inner and outer center distances. The CT image of the standard nozzle sample was measured. The results showed that the method can accurately extract the contour surface of the flow channel, and the uncertainty of measurement was 0.010 4 mm. It had a certain engineering application value.

**Key words:** aviation fuel nozzle; runner; CT; size measurement

航空燃油喷嘴组件采用了多件组合及多型面整体成型的结构设计,其流道尺寸公差的控制对于航空器的可靠性和安全性具有至关重要的意义。由于

其内部可达性差,传统方法是通过间接的流量试验来进行筛选,不仅成本高而且效率低。笔者采用微焦 CT 检测方法获取燃油喷嘴的体数据,而从体数据中分割流道型面并且分析流道尺寸是该过程的重要环节和难点问题。

CT 体数据的分割方法大致分为阈值分割、亚像素边缘检测法、模糊聚类分割、区域分割等。阈值分割通过设定不同的灰度阈值,将图像中的像素进行归类,从而分开目标区域与背景区域<sup>[1]</sup>。常用的

收稿日期:2022-11-01

基金项目:国家自然科学基金(11827809)

作者简介:栾传彬(1990—),男,工程师,主要从事航空发动机无损检测的工艺研究工作

通信作者:韦会鸿,weihuihong0909@163.com

阈值选择方法有最小误差法(总的误差划分概率最小)、Otsu 算法(前景与背景类间方差最大)、最大熵自动阈值法(图像信息熵最大)等。亚像素边缘检测法是对 CT 图像进行亚像素边缘定位从而实现几何元素测量的方法,典型的亚像素边缘检测算法有图像矩<sup>[2]</sup>、Facet 模型<sup>[3]</sup>。模糊均值聚类算法(FCM)通过令分到同一类中的样本间相似度最大,而不同类之间的相似度最小,实现聚类分割,其本质为对带约束的非线性规划问题求最优解<sup>[4-5]</sup>。王雪虎等<sup>[6]</sup>提出了一种结合先验稀疏字典和空洞填充的方法,实现了 CT 图像分割。区域分割法有区域生长法<sup>[7]</sup>、区域分裂合并法以及基于区域的水平集方法等。当图像中待分割对象边界轮廓清晰,且分割对象内部灰度相对均一时,基于区域的分割方法能够取得较好的效果<sup>[8]</sup>。局部区域拟合(RSF)有良好的局部特性,不仅边缘定位精度高,而且轮廓连续性好,是目前主流图像分割算法<sup>[9]</sup>。

笔者设计了航空燃油喷嘴组件试样,研究了 CT 体数据中流道型面的提取方法和流道偏移尺寸的测量方法。该方法主要采用 RSF(区域可扩展拟合)能量模型提取流道面,对流道内壁和外壁分别进行拟合,并测量流道偏移尺寸,从而为产品工艺质量评估提供可靠依据。

### 1 试样制作与 CT 体数据获取

实际的燃油喷嘴组件内部流道比较复杂,为了验证所提方法的可行性,设计并制作了一套简化的燃油喷嘴组件试样其上面的喷嘴部分包含了孔件和棒芯,一共采用 3 种材料,即不锈钢、钛合金和铝合金。下面是 HXY80-L 型一维位移台和 HX40-C 型二维平移平台,一维位移台用于调节棒芯与孔件的间隙,二维平移平台用于调节喷嘴在 CT 视场中的位置。喷嘴

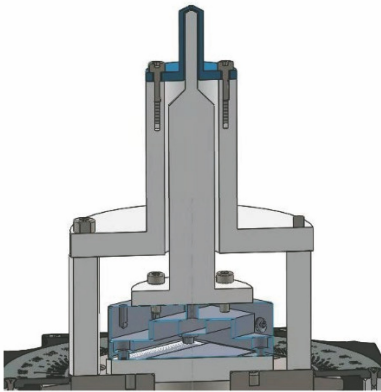


图 1 喷嘴试样剖面图

试样剖面图如图 1 所示,喷嘴试样实物如图 2 所示。

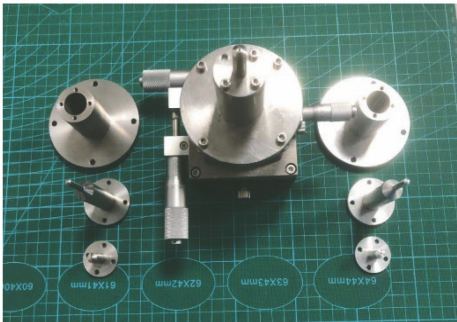


图 2 喷嘴试样实物

采用 CD-130BX 型 CT 系统对燃油喷嘴顶部进行扫描成像,经过图像软件重建后获得 CT 体数据。CT 扫描参数如表 1 所示。喷嘴试样 CT 体数据在成像软件中的显示效果如图 3 所示。

表 1 CT 扫描参数

序号	参数名称	参数数值
1	管电压/kV	150
2	管电流/ $\mu$ A	400
3	焦点尺寸/ $\mu$ m	5.0
4	探测器尺寸(长 $\times$ 宽)/像素	1 024 $\times$ 1 024
5	探测器单元宽度/mm	0.2
6	采样积分时间/ms	2 000
7	焦点到转台距离(SOD)/mm	160
8	焦点到探测器距离(SDD)/mm	445

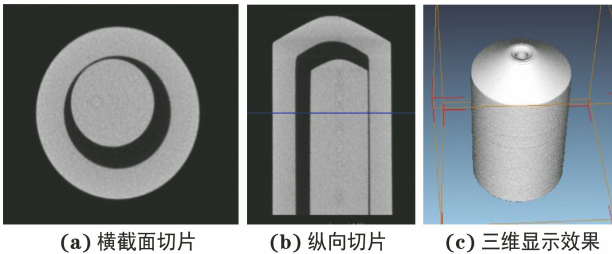


图 3 试样 CT 体数据在成像软件中的显示效果

### 2 测量方法与步骤

#### 2.1 基于 RSF 的图像分割

RSF 模型是 LI 等<sup>[10]</sup>为了处理灰度不均匀图像的分割问题而提出的。该模型利用局部区域在可控尺度上的强度信息,通过最小化能量泛函得到目标轮廓和两个局部拟合函数的最优解。在 CT 图像中,同种材料的灰度可能不同,采用经典的阈值分割方法无法得到正确分割结果,而 RSF 模型在处理灰度不均匀图像上具有较好的分割结果。

RSF 模型通过局部能量泛函在整个图像域的积分来描述轮廓线内、外的灰度信息,使得水平集函

数在演化过程中不仅能结合图像域中每个点附近的局部灰度信息,还能兼顾图像中各个同质区域的整体信息,由于该模型的图像局部信息处理对同种材料灰度不一致图像有着良好的分割效果。

### 2.2 测量算法步骤

在航空燃油喷嘴试样 CT 图像中,存在一定的噪声,同时由于容积效应和射线散射的影响,窄流道区域的灰度对比度不高,因此采用 RSF 算法有利于抗噪声干扰和分割出对比度差的区域。

分割后提取的流道轮廓与实际工件的轮廓还有一定的偏差;受制于分辨率影响,CT 体数据中提取的轮廓常出现锯齿现象。为了得到流道准确的偏移量,进一步采用了圆方程拟合得到流道轮廓的圆心和半径。圆拟合算法采用 Kasa 代数圆拟合算法,其是速度最快、应用最为广泛的一种圆拟合算法<sup>[11]</sup>。Kasa 算法以采样点到目标圆的代数距离平方和作为目标函数,推导出拟合圆心坐标和拟合半径的表达式,不需要迭代计算,因此具有速度快的特点。设边缘点集 $(x_i, y_i)$ 到圆心 $(A, B)$ 距离为 $d_i$ ,则有

$$d_i^2 = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 \quad (1)$$

点 $(x_i, y_i)$ 到圆边缘的距离的平方与半径的平方差 $\delta$ 为

$$\begin{aligned} \delta &= d_i^2 - R^2 = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 - R^2 \\ &= x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $R$  为目标圆半径; $a = -2A$ ;  $b = -2B$ ;  $c = A^2 + B^2 - R^2$ 。

Kasa 算法的目标函数为

$$\begin{aligned} \min f(a, b, c) &= \sum_{i=1}^n \delta^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

分别对目标函数各参数求偏导,可以直接推导出 $a, b, c$ 的求解公式,最后求得圆心坐标和半径为

$$A = -\frac{a}{2}; \quad B = -\frac{b}{2}; \quad R = \frac{\sqrt{a^2 + b^2 - 4c}}{2} \quad (4)$$

算法的具体实现步骤如下。

(1) 读入待分割 CT 体数据,定义初始水平集函数,并预设高斯核函数参数、正则项系数、长度项系数和迭代步长。

(2) 选择分割感兴趣区域并进行图像分割,该步骤可节省图像分割时间,若不选择则默认对整个区域进行分割。

(3) 选择切片分割方向,从喷嘴组件试样的设计可知流道的偏离方向为棒芯轴向的垂直方向,因此切片的方向也选择棒芯轴向。

(4) 对 $N$ 张切片依次进行分割,再进行迭代计算,然后更新水平集图像,根据迭代次数和终止条件结束迭代,最后二值化水平集图像得到分割结果。

(5) 根据式(2)求解流道面内外轮廓的圆心坐标 $P_1(A_1, B_1)$ 和 $P_2(A_2, B_2)$ ,然后计算圆心距离 $|P_1, P_2|$ 作为流道偏移量。

### 3 试验结果与讨论

为了验证所提测量方法的有效性,手动调节图 2 所示喷嘴试样的棒芯偏移量,相邻两次偏移为 $0.1 \text{ mm}$ ,设置 8 个流道偏移位置,分别对 8 种情况下试样进行微焦 CT 扫描,经过图像重建获得 8 个 CT 体数据,并采用文章所提算法测量流道的偏移尺寸。其中的一张切片分割结果如图 4 所示。其分割参数设置为:高斯核参数为 80;长度项系数为 0.001;正则项系数为 1.5;迭代步距为 0.01;迭代次数为 100。由图 4 可以看出,理想的内流道是个标准圆环,而实际的内流道形状不是标准圆环,而是一边较窄,一边较宽;虽然内流道形状不规则,但是其内壁和外壁依然是圆形,所以可以通过计算内外壁两个圆的圆心来求取流道的偏移量。

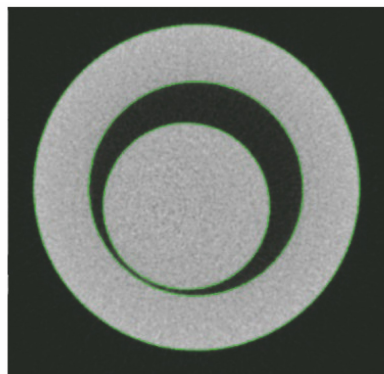


图 4 某切片的分割结果

流道内外轮廓圆拟合步骤如下:① 选定需要拟合的轮廓,先拟合外轮廓,再拟合内轮廓;② 根据轮廓上的点和文章算法步骤进行拟合。需要拟合的轮廓以及拟合后的圆如图 5 所示。

由图 5 可以看出,设置合理的参数能使分割结果近似于工件真实轮廓,下面分析改变各参数时对分割结果的影响。

(1) 改变 $\delta(x)$ 参数

当 $\delta(x)$ 参数过小时,会使得轮廓变得凹凸不



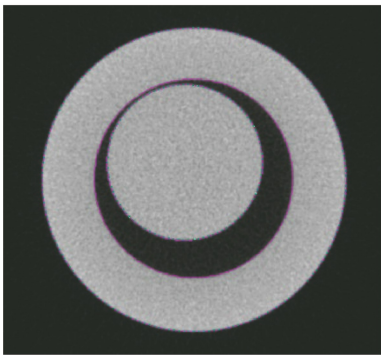
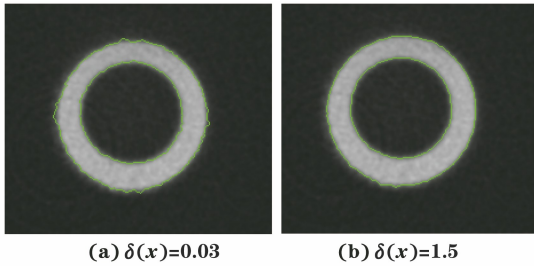


图 5 需要拟合的轮廓以及拟合后的圆示意图

平,偏离真实轮廓;适当增大 $\delta(x)$ 参数时,可以使轮廓变得更加平滑,逼近真实轮廓。改变 $\delta(x)$ 参数时的分割结果如图 6 所示。



(a)  $\delta(x)=0.03$  (b)  $\delta(x)=1.5$

图 6 改变 $\delta(x)$ 参数时的分割结果

(2) 改变高斯核参数

当高斯核参数增大时,会增加分割程序运行时间。切片高斯核参数为 80 时运行时间为 1.400 s,高斯核参数为 120 时耗时 1.466 s。当前景权系数 $\lambda_1$  大于背景权系数 $\lambda_2$  时,分割轮廓会趋近灰度级低的区域,当前景权系数 $\lambda_1$  小于背景权系数 $\lambda_2$  时,分割轮廓会趋近灰度级高的区域。改变高斯核函数参数时的分割结果如图 7 所示。

(3) 改变长度项系数、时间步长

在灰度变化不明显区域,适当减小长度项系数或时间步长,可以让轮廓更趋近真实轮廓。改变长度项系数、时间步长参数时的分割结果如图 8,9 所示。

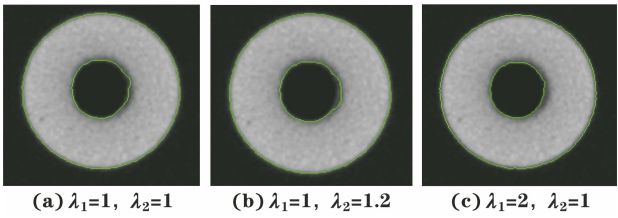


图 7 改变高斯核函数参数时的分割结果

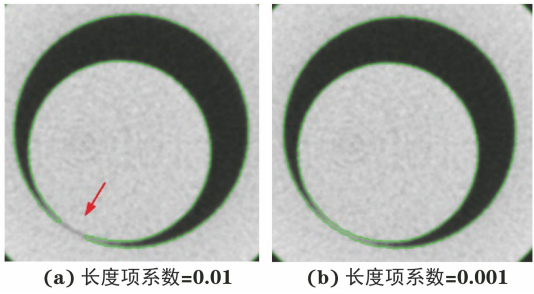


图 8 改变长度项系数参数时的分割结果

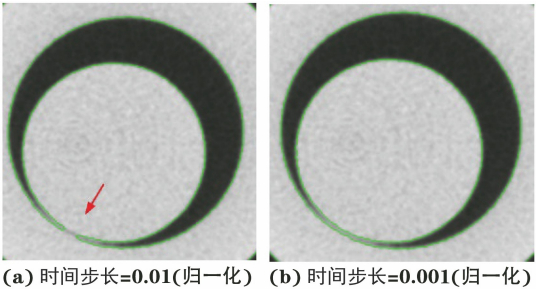


图 9 改变时间步长参数时的分割结果

表 2 流道偏移尺寸测量结果

试样编号	外半径	内半径	外圆圆心		内圆圆心		圆心偏差
			x	y	x	y	
1	2.554 1	2.015 9	1.231 6	−0.501 9	1.158 1	0.052 5	0.559 3
	2.557 2	1.999 2	1.221 0	−0.494 0	1.167 7	0.033 0	0.529 7
2	2.549 3	2.014 1	1.140 6	−0.447 0	1.145 1	0.094 9	0.541 9
	2.566 0	2.010 5	1.154 8	−0.434 4	1.149 5	0.096 6	0.531 0
3	2.549 8	1.996 5	1.072 6	−0.309 7	0.811 1	0.161 7	0.539 1
	2.548 9	1.993 3	1.070 2	−0.298 6	0.816 2	0.161 8	0.525 9
4	2.540 4	2.000 9	1.019 8	−0.470 9	0.775 8	−0.017 1	0.515 3
	2.537 9	1.997 0	1.023 9	−0.471 3	0.774 4	−0.024 4	0.511 9
5	2.544 8	1.992 6	−0.502 2	−1.004 0	−0.167 1	−0.749 6	0.420 8
	2.545 7	1.995 9	−0.480 9	−1.002 8	−0.166 8	−0.751 8	0.402 0
6	2.549 3	1.994 8	0.946 5	−0.594 4	0.746 3	−0.293 9	0.361 1
	2.544 4	1.998 7	0.941 3	−0.591 3	0.743 9	−0.294 9	0.356 1
7	2.543 9	2.000 4	0.984 2	−0.534 1	0.709 9	−0.350 1	0.330 3
	2.543 5	1.993 5	0.982 7	−0.525 0	0.717 0	−0.358 7	0.313 5
8	2.543 2	1.9966	0.9891	−0.5261	0.7144	−0.4587	0.2829
	2.544 1	2.0079	0.9930	−0.5249	0.6969	−0.4556	0.3041

对 8 组喷嘴试样 CT 体数据进行了分割和测量,先测量工件的半径、圆心位置,然后计算流道偏移尺寸,测量结果如表 2 所示,其中流道偏移等于圆心偏差。

根据测量结果绘制标称流道偏差-测量流道偏差曲线,并使用最小二乘法拟合直线,其结果如图 10 所示,计算得到线性误差为 0.010 4 mm。

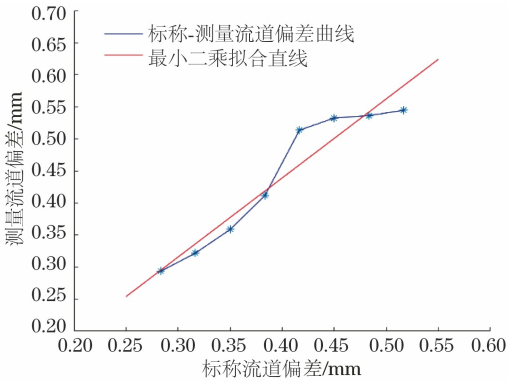


图 10 标称-测量流道偏差曲线及其拟合结果

为了进一步验证该测量方法的实际效果,对某实际航空燃油喷嘴(设计尺寸见图 11)进行 CT 扫描,扫描管电压为 220 kV,管电流为 100  $\mu$ A,放大倍数为 6.79,平板探测器尺寸为 2 048 像素 $\times$ 2 048 像素(长 $\times$ 宽),重建得到 CT 图像。垂直于油路方向的两张 CT 切片如图 12 所示。

设置好参数,利用 RSF 算法对切片进行分割,得到燃油喷嘴的分割结果(见图 13)以进行流道拟合,进而利用 Kasa 算法得到燃油喷嘴的几何尺寸。

整理两张切片的拟合数据(见表 3),得到外半径测量值与设计值偏差分别为 0.017 983 mm 和

0.015 551 mm;利用内外圆圆心计算两张切片的圆心偏差,分别为 0.015 018 mm 和 0.032 298 mm。

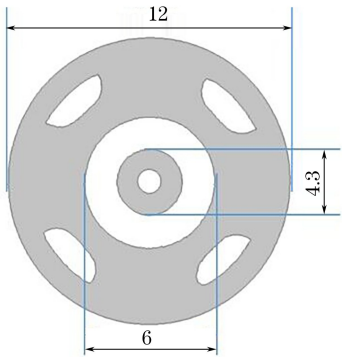


图 11 某航空燃油喷嘴设计尺寸

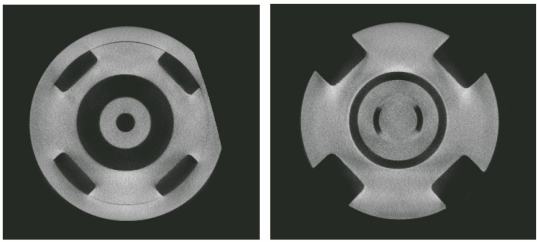


图 12 垂直于油路方向的燃油喷嘴切片

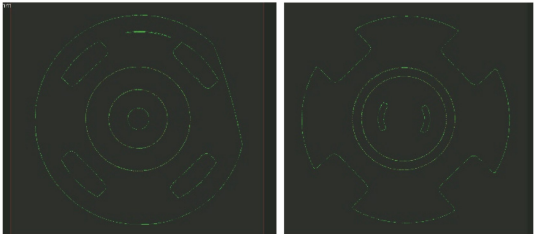


图 13 RSF 算法分割结果

表 3 喷嘴测量拟合结果

切片编号	外圆半径	内圆半径	外圆圆心			内圆圆心			偏差
			$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	
1	3.967 983	2.235 929	0.868 476	−6.197 108	−1.919 855	0.869 806	−6.201 452	−1.905 540	0.015 018
2	3.965 551	3.270 571	0.434 996	−2.921 176	−0.877 285	0.466 942	−2.916 635	−0.878 714	0.032 298

4 结语

通过分析航空燃油喷嘴组件流道特点,提出了一种基于 CT 扫描体数据的喷嘴流道偏移尺寸测量方法。该方法首先采用 RSF 模型分割喷嘴流道区域,然后提取流道内外轮廓表面,再采用最小二乘拟合方法计算流道内外型面的圆方程,最后根据内外型面圆心距离得到流道的偏移量。采用一套定制的喷嘴试样进行测量试验,结果表明,该方法能够精确

分割流道区域和测量流道偏移,测量的线性误差为 0.010 4 mm,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] MILAN S,VACLAV H,ROGER B 著,兴军亮,艾海舟,等译. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 北京:清华大学出版社,2016.

[2] 傅健,路宏年,侯涛,等. 基于 ICT 图像的航空发动机涡轮叶片壁厚尺寸精密测量方法[J]. 航空学报,2006,27(2):325-330.

[3] HARALICK R M. Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1984,6(1):58-68.

[4] TANABE J, MILLER D, TREGELLAS J, et al. Comparison of detrending methods for optimal fMRI preprocessing[J]. Neuro Image, 2002, 15 (4): 902-907.

[5] YIN S L, ZHANG Y, KARIM S. Large scale remote sensing image segmentation based on fuzzy region competition and Gaussian mixture model[J]. IEEE Access,2018,6:26069-26080.

[6] 王雪虎,杨健,艾丹妮,等. 结合先验稀疏字典和空洞填充的 CT 图像肝脏分割[J]. 光学 精密工程,2015, 23(9):2687-2697.

[7] ALMOND D, SOUZA N A, SEENIVASAGAM V. Colour image segmentation using region-growing and region-merging methods[J]. International Journal of Biomedical Engineering and Technology,2011,7(2): 165.

[8] ADAMS R,BISCHOF L. Seeded region growing[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1994,16(6):641-647.

[9] 肖婷. 基于深度特征迁移与融合的乳腺超声图像分类[D]. 重庆:重庆大学,2018.

[10] LI C M,KAO C Y,GORE J C,et al. Minimization of region-scalable fitting energy for image segmentation [J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2008,17(10):1940-1949.

[11] 祝强,徐臻. 改进的 Kasa 算法及其在圆拟合中的精度分析[J]. 测控技术,2016,35(1):30-33,37.



(上接第 25 页)

[8] LORENSEN W E, JOHNSON C, KASIK D, et al. History of the marching cubes algorithm[J]. IEEE Computer Graphics and Applications,2020,40(2):8-15.

[9] IGLESIAS-GUITIAN J A, MANE P, MOON B. Real-time denoising of volumetric path tracing for direct volume rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2022, 28 (7): 2734-2747.

[10] 柳盛,吉根林. 空间聚类技术研究综述[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2010,10(2):57-62.

欢迎网上投稿    欢迎订阅    欢迎刊登广告