

基于视觉显著度的射线图像微小缺陷提取方法*

余永维¹ 殷国富² 殷 鹰² 杜柳青¹

(1. 重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054; 2. 四川大学制造科学与工程学院, 成都 610065)

摘要: 为实现射线图像复杂大背景下微小目标检测,研究强噪声、大灰度梯度下微小缺陷的分割方法。提出面向射线图像的视觉显著度模型,模拟人眼视觉注意机制,采用线扫描及自适应中央-周边差策略,以视觉显著度为尺度,通过特征图计算与融合、显著图获取等算法,从射线图像复杂背景中分割出注意区域;进一步通过显著度竞争标记排序各注意区域,并根据显著度阈值识别可疑缺陷区域,由此减少图像数据处理量,排除射线图像其他部分的干扰。提出以显著图上可疑区域的注意焦点为种子点,基于各点显著度的区域生长分割方法,实现了可疑区域图像中微小缺陷目标的准确提取。在复杂大背景 X 射线图像的实验中,准确提取出含有未知缺陷目标的区域,对微小目标的分割取得了较好效果,准确率达到 96.1%,比传统方法高 8% 以上,证明了所提方法的有效性和适应性。

关键词: 射线图像 微小缺陷 缺陷提取 视觉注意机制 视觉显著度

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0365-07

Detection of Tiny Detect in Radiographic Images Based on Visual Saliency

Yu Yongwei¹ Yin Guofu² Yin Ying² Du Liuqing¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

2. School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To achieve detection of tiny defect in radiographic images with complex background, the segmentation method of tiny defects was studied under the conditions of strong noise and large gray gradient background. The visual attention model for radiographic testing image was proposed, and its realization method was analyzed in detail. The human visual attention mechanism was simulated. The line scanning strategy and self-adapting central-peripheral difference strategy was adopted. Based on the vision saliency, the feature map and the saliency map were achieved, and visual attention region was segmented from radiographic images with complex background. Each visual attention region was marked and ordered with visual saliency competition. According to the saliency threshold, the suspicious region was identified. So the image data to be processed was reduced and the interference was discharged from other parts of radiographic testing image. Then attention focuses of the suspicious region was used as the seed point. Based on region growing and visual saliency, a segmentation method for tiny target was introduced to accurately extract tiny defects in suspicious region image. In the experiment about complex radiographic testing image with more tiny target objects, each area containing unknown defect was accurately extracted. Segmentation for tiny target achieved good results. The accuracy rate was 96.1%, and it was 8% higher than that of the traditional method. The results prove the effectiveness and adaptability of the proposed method.

Key words: Radiographic image Tiny defect Defect detection Visual attention mechanism Visual saliency

收稿日期: 2015-03-24 修回日期: 2015-05-13

* 重庆市基础与前沿研究计划基金资助项目(cste2013jcyjA70009)和国家自然科学基金青年基金资助项目(51075419)

作者简介: 余永维,高级工程师,博士,主要从事机器视觉系统研究,E-mail: ftong@126.com

通讯作者: 杜柳青,教授,主要从事 CAD/CAM 和图形图像处理研究,E-mail: lqdu1@126.com

引言

用机器视觉进行射线无损检测是当前国内外研究的热点,而在视觉检测、识别及评价技术中,关键是图像中目标缺陷信息的提取和分割。

对于图像目标的提取和分割技术,国内外学者提出了不同的方法,如各种阈值方法、形态学方法、分水岭方法等^[1-5],但对射线图像复杂大背景下的微小目标,现有传统方法都失效,是射线图像检测技术的一个难点^[6-11]。王中宇等^[8]提出基于灰色关联分析和区域生长的微小缺陷分割方法^[8]。吴一全等^[9]采用基于对称 Tsallis 交叉熵的小目标图像阈值分割方法^[9]。上述方法虽针对微小缺陷,但需对图像全部区域同等看待,进行同等的检测与分析,这不但造成了计算资源浪费,而且各区域信息相互干扰,加重检测识别的分析难度、降低准确性;特别是针对占射线整体图像中极小比例(不到 1%)的微小缺陷目标,上述全图检测方法不能检出。

视觉注意机制使得人脑视觉皮层能在有限的神 经资源下很好地处理摄入的外部世界信息,即使在面对极其复杂场景时也能迅速地将自己的注意重点聚焦在一些相对显著的目标上,从而使视觉皮层可以对这些突出目标优先进行更细致分析^[10-11]。根据 Koch 和 Ullman 的模型及特征图、显著图、WTA 神经网络和返回抑制 (IOR) 等思想^[12-13],Itti 等^[14-15]提出数据驱动的视觉注意机制计算模型,在现有视觉注意机制计算模型中其应用最多,在对自然图像及普通物体的检测中取得了较好的效果。但 Itti 所提模型主要针对缺陷检测,在面对复杂大背景射线图像时,存在适应性差、计算复杂、效率低等缺点。

目前模拟人眼视觉机理的研究主要集中在环境条件较好的自然图像、汽车牌号、人脸模型、字符识别、语音等方面,现有文献鲜有引入射线图像检测识别领域的报道。本文鉴于复杂大背景射线图像模糊、整体灰度起伏大、目标类型多样、对比度低、目标相对微小(如铸件缺陷、焊件缺陷)等特点,提出面向射线图像的视觉显著度模型,有效解决 Itti 视觉注意计算模型在实际工程应用中存在的问题,进一步提出基于视觉显著度的区域生长方法,以准确提取射线图像复杂大背景下的微小缺陷。

1 基于视觉显著度的射线图像可疑缺陷区域检测方法

1.1 面向射线图像的视觉显著度模型

人类视觉神经元对位于其感受野中央小区域的

刺激最敏感,而中央区周围的更广、更弱区域内的刺激将抑制该神经元的响应。这种对局部空间具有不连续性的敏感结构特别适用于检测局部显著性较强的区域,这即是生物感受野的线性中央-周边操作。借鉴 Itti 模型,针对含有微小目标的射线图像具有复杂大背景、整体亮度不均匀等特点,提出面向射线图像、基于线扫描和自适应中央-周边差计算的视觉显著度模型,如图 1 所示。

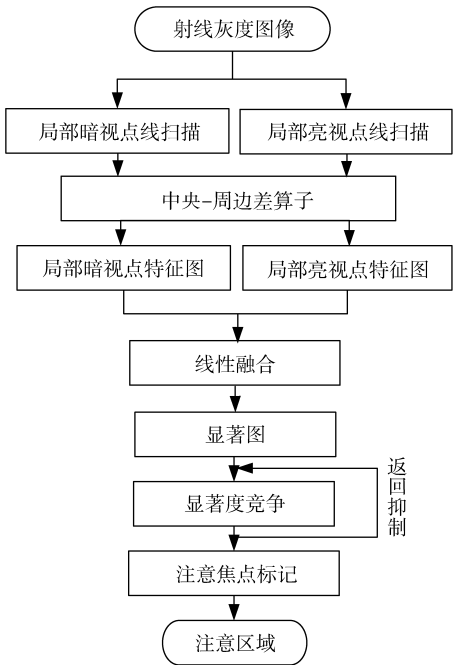


图 1 面向射线图像的视觉显著度模型
Fig.1 Visual attention mechanism model
for radiographic image

面向射线图像的视觉显著度模型,首先分别对局部暗视点和局部亮视点进行线扫描,通过提出的中央-周边差算子,获得两幅针对不同特征目标对象的特征图;经过特征图的线性融合,得到射线图像的显著图,同时获得其上各显著区域以及各显著区域的注意焦点;通过各注意焦点的显著度竞争机制和返回抑制机制,标记各注意焦点的显著度顺序;在各显著区域基础上计算出各注意区域,其上各注意焦点的显著度顺序决定了该注意区域在后续图像处理分析时的先后顺序。后续的图像处理、分析、识别都以注意区域为基础。

1.2 视觉显著度模型的实现方法

面向射线图像的视觉显著度模型对强度特征的计算,是通过线扫描及计算自适应中央-周边差阈值的方式来获得视点中央与周围部分的视觉差值,即视觉显著度,从而实现与生物感受野类似的线性中央-周边操作。基于线扫描和自适应中央周边差计算的视觉显著度模型实现方法,同时也是基于视觉显著度的可疑区域检测过程,所述如下:

(1)对射线图像进行逐列局部暗视点线扫描。图2是扫描线上的灰度分布曲线。

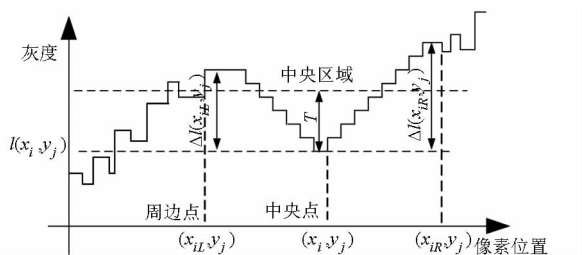


图2 局部暗视点线扫描线

Fig. 2 Scan line for local dark view

(2)搜索第 j 列灰度曲线各局部极小峰值点 $l(x_i, y_j)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 即中央点, n 为中央点的数量;各中央点对应的像素坐标为 (x_i, y_j) 。

由各中央点开始向左右两侧分别搜索离其最近的顶部,分别为 $l(x_{il}, y_j)$ 和 $l(x_{ir}, y_j)$;各顶部对应的像素点即周边点,分别为 (x_{il}, y_j) 和 (x_{ir}, y_j) 。

(3)作如下定义:中央区域 $N(x_i, y_j)$:由左右两侧周边点之间的像素组成,为可能的目标区域, $N(x_i, y_j) = \{(x_{im}, y_j) | m \in \mathbf{Z}, L \leq m \leq R\}$, 其中 $\mathbf{Z}$ 表示整数。中央-周边差 Δl : $\Delta l(x_{il}, y_j) = l(x_{il}, y_j) - l(x_i, y_j)$, $\Delta l(x_{ir}, y_j) = l(x_{ir}, y_j) - l(x_i, y_j)$;取 $\Delta l(x_{il}, y_j)$ 和 $\Delta l(x_{ir}, y_j)$ 的较小者为中央-周边差 Δl 。

(4)定义第 j 行扫描线的自适应中央-周边差阈值 T_j : $T_j = \mu_{\Delta l} + k\sigma_{\Delta l}$, 其中 $\mu_{\Delta l}$ 为扫描线中央-周边差的均值; $\sigma_{\Delta l}$ 为标准差; k 为常数,一般取 $3 \sim 5$ 。

(5)扫描线上各点显著度:将 $\Delta l(x_{il}, y_j)$ 和 $\Delta l(x_{ir}, y_j)$ 与各扫描线自适应中央-周边差阈值 T_j 比较,假设 $\Delta l(x_{il}, y_j) \geq \Delta l(x_{ir}, y_j)$ 。如 $\Delta l(x_{il}, y_j) \geq T_j$, 则该中央区域 $N(x_i, y_j)$ 为显著区域,中央点左边各点在显著图中的显著度为 $S(x_i, y_j) = l(x_{il}, y_j) - l(x_i, y_j)$, 中央点右边各点在显著图中的显著度为 $S(x_i, y_j) = l(x_{ir}, y_j) - l(x_i, y_j)$, 扫描线上其余各点显著度置为零。

(6)整幅图像局部暗视点扫描完成后,合并相连的显著区域,显著度最大的点为合并后显著区域的中央点,得到射线图的局部暗视点特征图。

为了适应不同灰度性质的缺陷,局部亮视点线扫描实现的方法与获得局部暗视点特征图方法类似。重复步骤(1)~(6),不同的是步骤(2)、(3)是搜索局部极大灰度,再左右搜索最近的谷底。最后获得射线图的局部亮视点特征图。

局部亮视点特征图和局部暗视点特征图具有相同的动态范围,相互之间可以直接进行线性融合,得到射线图像的完整显著图。

将显著图上各显著区域的中央点作为该显著区域的注意焦点。各注意焦点进行显著度竞争排序,

按竞争结果分别标记为 $F_0, F_1, \dots, F_n$ 。则 $F_0, F_1, \dots, F_n$ 既是各注意焦点的显著度顺序,也是其所在显著区域的显著度顺序。

显著度竞争的方法如下:

(1)搜索过程:搜索整个显著图,显著度最大的注意焦点标记为 F_0 , 其所在显著区域最优先处理。

(2)返回抑制过程:将注意焦点 F_0 所在显著区域的显著度置为零,以注意焦点 F_0 为中心的邻域被屏蔽,视觉注意转移到下一个较为显著的目标。

(3)继续搜索过程:搜索显著图,当前显著度最大的注意焦点标记为 F_1 , 其所在显著区域次优先处理。

(4)继续返回抑制过程:将注意焦点 F_1 所在显著区域的显著度置为零,以注意焦点 F_1 为中心的邻域被屏蔽,视觉注意再次转移。

(5)重复过程(1)到(4),标记排序剩下的显著区域 $F_2, F_3, \dots, F_n$, 直到完成显著度竞争。

注意区域的确定:在显著区域的基础上,计算各显著区域的外接矩形,再扩大一定比例(实验中取2倍)作为注意区域,并合并相连的注意区域,其上各注意焦点的显著度顺序决定了其在后续图像处理分析时的先后顺序,按优先顺序各注意区域记为 $S_0, S_1, \dots, S_n$ 。

确定可疑缺陷区域:如注意焦点的显著度 $S(x_i, y_j) > T$, T 为判定阈值,则该注意区域为可疑缺陷区域,需通过后续区域生长算法作进一步细致分析。阈值 T 是一个重要的参数,由系统针对不同类型的射线检测图像自动标定,其方法为:扫描一幅同类型标准(无缺陷)射线图像,计算并搜索各注意焦点显著度的最大值,假设最大值为 S , 则 $T = S_{\max} + c\sigma$ 。其中 σ 为20幅无缺陷射线图像各注意焦点显著度最大值的标准偏差,通过实验统计得出,为已知; c 为常数,一般取 $1 \sim 5$ 。

2 基于视觉显著度的区域生长微小目标提取

利用面向射线图像的视觉显著度模型,准确分割出各含有未知微小目标的注意区域,由此减少了图像数据处理量,更重要的是排除了射线图像其他部分的干扰,有助于提高后续图像处理的效率和准确性。

在获得各注意区域并标记排序的基础上,提出显著图上可疑区域的注意焦点为种子点,基于可疑区域各点显著度的区域生长分割方法。如当前生长区域为 R , 各像素点显著度为 $S(x, y)$, 显著度均值 μ_{SR} 和显著度方差 σ_{SR} 为

$$\mu_{SR} = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R} S(x,y)$$

$$\sigma_{SR} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R} (S(x,y) - \mu_{SR})^2}$$

各像素点灰度为 $f(x,y)$, 灰度均值 μ_R 和灰度方差 σ_R 为

$$\mu_R = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R} f(x,y)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R} (f(x,y) - \mu_R)^2}$$

当前搜索像素 (x,y) 并入缺陷区域的区域生长规则为

$$|S(x,y) - \mu_{SR}| \leq k_1 \sigma_{SR}$$

且 $|f(x,y) - \mu_R| \leq k_2 \sigma_R$

式中 $k_1、k_2$ 为决定生长条件严格程度的控制量。区域生长分别按照水平和竖直方向搜索,如当前

搜索像素的显著度满足聚类判定准则时,该像素并入种子像素集合,并重新计算生长区域的显著度均值和标准差。否则,当前搜索像素不被并入种子像素集合,停止该方向的搜索,并得到该方向的边界。

3 实验及分析

以精密机械零件的焊缝或铸件射线检测图像为研究对象,进行实验分析。图 3 所示为含有微小缺陷目标的复杂大背景 X 射线图像,图像整体亮度极不均匀、灰度起伏大,其灰度三维显示如图 4。微小目标只占整体图像极小的比例,不到千分之一。如采用传统方法对该 X 射线图像所有区域同等看待、进行同等的检测与分析,不但效率低且很难准确检测识别。

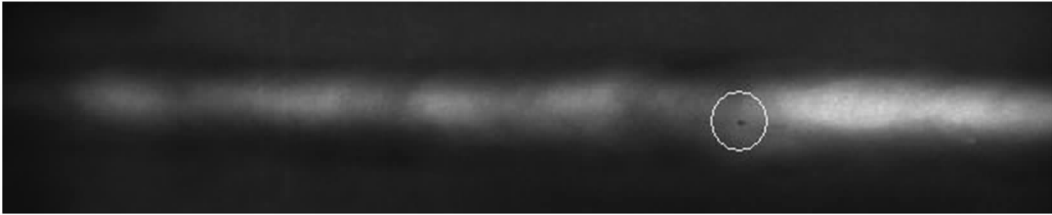


图 3 含微小缺陷的 X 射线图像

Fig. 3 Radiographic testing image containing tiny defects

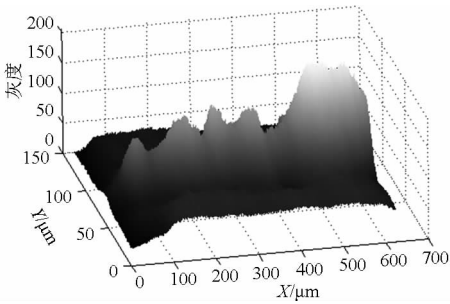


图 4 X 射线图像的灰度三维图

上没有显著区域。显著图的三维显示如图 6 所示。

显著图上各显著区域的中央点即为该显著区域的注意焦点。根据各注意焦点的显著度竞争进行排序标记, $F_0、F_1、F_2、F_3、F_4$ 即为各注意焦点的显著度顺序,即各所在显著区域在后续图像处理分析的先后顺序,如图 7 所示。根据显著区域确定的注意区域如图 8 所示。

确定各注意区域后,大大降低了 X 射线图像其他区域的干扰,降低了分割难度,且提高了分割效率。按其显著度顺序,首先在注意区域 S_0 内进行区域生长法分割,如图 9 所示,以显著图上可疑区域的注意焦点为种子点,基于可疑区域各点的显著度的区域生长分割方法,提取出的微小缺陷图像如图 10 所示,微小缺陷目标被准确提取,效果较好。再按显

基于视觉选择性注意原理,应用本文所提出的面向 X 射线图像的视觉注意模型和实现方法。首先,进行暗视点视觉扫描,中央-周边差运算后得到局部暗视点显著图,如图 5 所示,图中白色表示显著区域。因其上没有亮视点目标,作亮视点扫描后,其



图 5 局部暗视点显著图

Fig. 5 Saliency map of local dark view

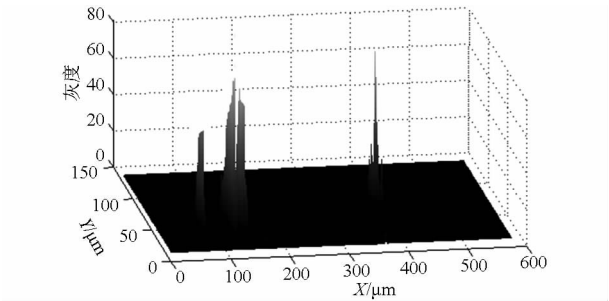


图 6 显著图灰度三维图

Fig. 6 3D display of saliency map

著度顺序,依次对注意区域 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 进行分析,根据其上注意焦点显著度与判定阈值 T 比较,都没有缺陷目标。

为了验证所提出方法的有效性,图 11 是用不同方法得到的该 X 射线焊缝缺陷的二值化图像。比



图 7 射线图像的注意焦点

Fig. 7 Attention focus of radiographic image

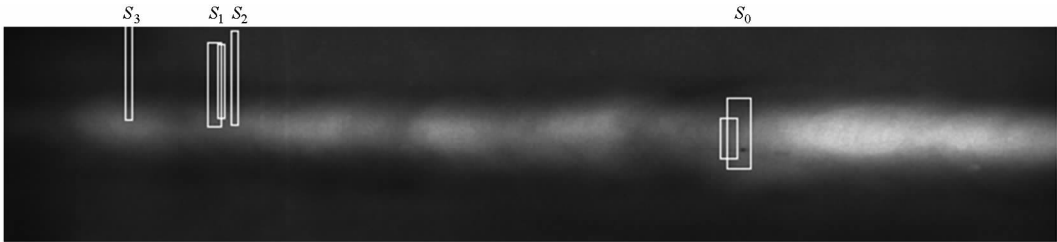


图 8 射线图像的注意区域

Fig. 8 Attention area of radiographic image



图 9 注意区域 S_0

Fig. 9 Attention area S_0



图 10 提取的微小缺陷目标图像

Fig. 10 Tiny defect image

较可知,由于背景较复杂,微小缺陷对比度低,如不用视觉注意方法提取出注意区域,直接对全图作处理,传统方法都不能分割出该微小缺陷。即使只对注意区域 S_0 作处理,自适应阈值方法和分水岭方法都不能正确提取,自适应形态学滤波方法出现了较多的伪缺陷。

图 12 所示为复杂大背景下含有多个(8 个)微小缺陷目标射线图像,全部缺陷目标占整个图像不到 1%,如全图作同等处理,现有目标分割方法很难准确提取出以上目标,用本文方法也取得了很好的效果,提取过程如图 13 ~ 17 所示。

本文对 128 幅具有复杂大背景的发动机铸件或焊缝 X 射线图像进行了微小目标提取实验,能准确分割出各含有未知目标的注意区域,提取出微小缺

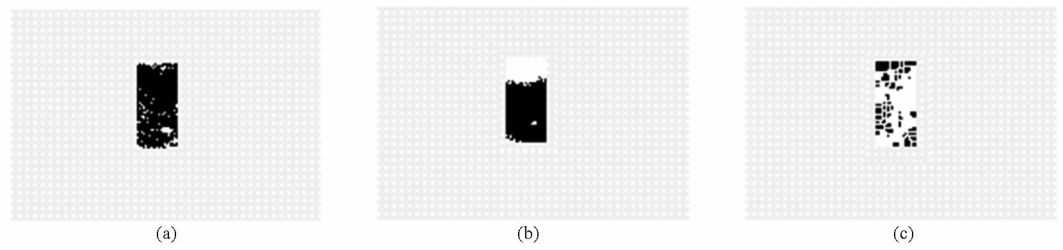


图 11 不同方法提取结果对比

Fig. 11 Comparison of extraction results by different methods
(a) 自适应形态学方法 (b) 自适应阈值方法 (c) 分水岭方法

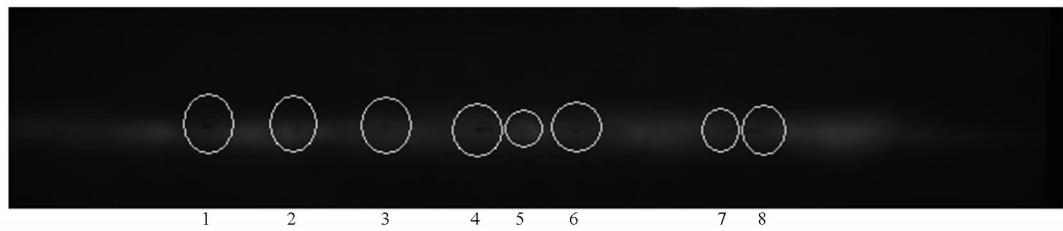


图 12 含 8 处微小缺陷的焊缝 X 射线图像

Fig. 12 Radiographic testing digital image of welding



图 13 局部暗视点显著图

Fig. 13 Saliency map of local dark view

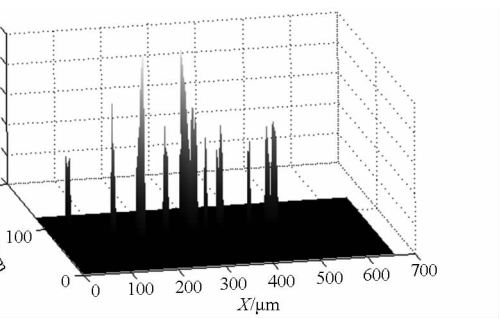


图 14 显著图的三维显示

Fig. 14 3D display of saliency map

陷,并与传统方法进行了比较,检测结果如表 1 所示,本文方法取得了较好的效果,准确率高于 96%,且检测效率更高,说明了本文提出的视觉注意模型和基于显著度的区域生长方法的有效性和

适应性。

4 结束语

分析了 Itti 视觉注意模型在实际应用中存在的问题和不足,结合射线图像特征及其上目标对象的特点,为了检测出射线图像中应该被重点关注的注意区域,在提出模拟人眼视觉的视觉扫描和中央-周边差运算的基础上,提出了面向射线图像的视觉显著度模型及其实现方法,基于视觉显著度搜索注意区域,由此减少了图像数据处理量、排除了射线图像其他部分的干扰,为微小(弱)缺陷的提取创造了良好条件。进一步提出基于视觉显著度和区域生长的微小目标分割方法,在复杂大背景 X 射线图像的实验

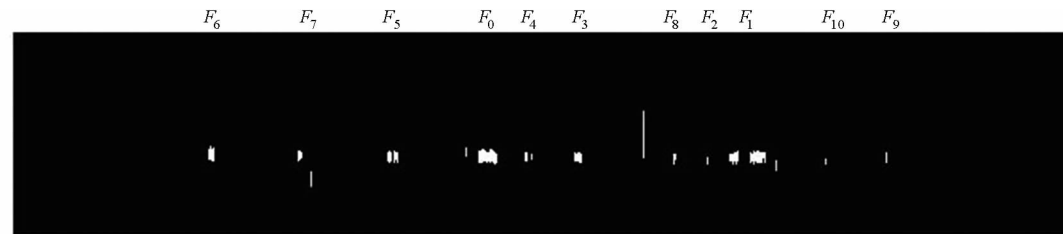


图 15 注意焦点标记

Fig. 15 Marks of FOA

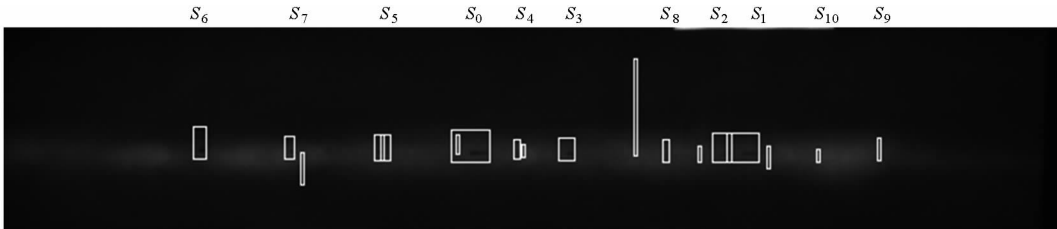


图 16 注意区域确定及标记
Fig. 16 Marks of attention area



图 17 二值化缺陷图像
Fig. 17 Binarized defect image

表 1 实验检测结果

Tab.1 Experimental results

方法	准确检出数 (产品总数)	准确率/%	误检图像数 (图像总数)	误检率/%	漏检图像数 (图像总数)	漏检率/%	平均检 测时间/ms
本文方法	123(128)	96.1	1(25)	4.0	4(76)	5.3	816
自适应形态学方法	113(128)	88.3	3(25)	12.0	12(76)	15.8	1 570
自适应阈值方法	105(128)	82.0	7(25)	28.0	16(76)	21.1	1 156

目标的分割取得了较好的效果,准确率高 于 96% , 方法的 82.0% ,平均检测时间是自适应形态学方法 远高于自适应形态学方法的 88.3% 和自适应阈 值的 51.9% 和自适应阈值方法的 70.59% 。

参 考 文 献

1 Turaga P, Chellappa R, Subrahmanian V S, et al. Machine recognition of human activities: a survey[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(11): 1473 – 1488.

2 周学成, 罗锡文. 采用区域生长法分割根系 CT 图像的改进算法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 122 – 125.

3 余永维, 殷国富, 蒋红海, 等. 磁瓦表面图像的自适应形态学滤波缺陷提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2012, 24(3): 351 – 356.

4 郭文川, 梁玮, 宋怀波. 基于邻差和的农产品 X 射线图像分割算法 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 214 – 219.

Guo Wenchuan, Liang Wei, Song Huaibo. Segmentation method of agricultural products' X-ray image based on sum of neighborhood differences [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 214 – 219. (in Chinese)

5 Alaknand A, Anand R S, Kumar P. Flaw detection in radiographic weldment images using morphological watershed segmentation technique[J]. NDT & E International, 2009, 42(1): 2 – 8.

6 Tian Yuan, Du Dong, Cai Guorui, et al. Automatic defect detection in X-radiographic testing images using image data fusion[J]. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11(6): 720 – 724.

7 董金勇, 王建仑, 李道亮, 等. 田间枣树叶片复杂目标图像综合分割方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 165 – 170.

Dong Jinyong, Wang Jianlun, Li Daoliang, et al. Complex target image of field jujube leaf segmentation based on integrated technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 165 – 170. (in Chinese)

8 吴一全, 沈毅, 刚铁, 等. 基于二维对称 Tsallis 交叉熵的小目标图像阈值分割[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2161 – 2167.

9 王中宇, 付继华, 孟浩, 等. 基于灰色关联分析和区域生长的微小缺陷提取[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 166 – 169.

Wang Zhongyu, Fu Jihua, Meng Hao, et al. Small defect extracting based on region growing algorithm and grey relational analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 166 – 169. (in Chinese)

10 史晋芳, 苏真伟, 刘小平, 等. 一种基于视觉预注意机制的选择性成像机器视觉系统[J]. 四川大学学报, 2012, 44(2): 206 – 209.

11 Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry[J]. Human Neurobiology, 1985, 4(6): 219 – 227.

12 Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1254 – 1259.

13 Itti L, Koch C. A comparison of feature combination strategies for saliency-based visual attention systems[J]. Proceedings of SPIE Human Vision and Electronic Imaging, 1999, 3644: 473 – 482.

14 Itti L. Visual attention and target detection in cluttered natural scenes[J]. Optical Engineering, 2001, 40(9): 1784 – 1793.

15 Silito A M, Grieve K L, Jones H E. Visual cortical mechanisms detecting foveal orientation discontinuities[J]. Nature, 1995, 378: 492 – 496.