

基于先验分布活动轮廓模型的纹理缺陷检测

戴铭, 叶木超, 周智恒, 杨志伟

引用本文:

戴铭, 叶木超, 周智恒, 等. 基于先验分布活动轮廓模型的纹理缺陷检测[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1226–1230.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1220>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于变分贝叶斯推断的字典学习算法

Dictionary learning algorithm based on variable Bayes inference

控制与决策. 2020, 35(2): 469–473 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0609>

基于变分贝叶斯推断的字典学习算法

Dictionary learning algorithm based on variable Bayes inference

控制与决策. 2020, 35(2): 469–473 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0609>

基于邻域粗糙互信息熵的非单调性属性约简

Non-monotonic attribute reduction based on neighborhood rough mutual information entropy

控制与决策. 2019, 34(2): 353–361 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1065>

不完备质量和融资能力约束下的多产品风险厌恶库存模型

Multi-product risk-averse inventory system with imperfect quality and financing capacity constraint

控制与决策. 2017, 32(4): 647–655 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0569>

参数自适应的可变类FLICM灰度图像分割算法

Self-adaptive FLICM algorithm for gray image segmentation with unknown number of clusters

控制与决策. 2017, 32(2): 262–268 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0050>

一种考虑先验估计误差相关性的快速DUIF算法

A fast distributed unscented information filter algorithm taking into account the correlation among prior estimate errors

控制与决策. 2016, 31(9): 1663–1670 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0871>

基于容积卡尔曼滤波的神经网络训练算法

Training method of neural network based on cubature Kalman filter

控制与决策. 2016(2): 355–360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1579>

基于空间约束Student's-t混合模型的模糊聚类图像分割

Fuzzy clustering algorithm based on spatially constrained Student's-t mixture model for image segmentation

控制与决策. 2016, 31(11): 2065–2070 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1577>

基于先验分布活动轮廓模型的纹理缺陷检测

戴 铭¹, 叶木超¹, 周智恒^{1†}, 杨志伟²

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510640; 2. 广州智慧城市研究院, 广州 510060)

摘要: 在工业产品的表面缺陷检测中, 计算机视觉逐渐取代人工视觉, 这是工业自动化重要标志之一. 而产品的表面纹理对缺陷检测的干扰一直是个难点. 从图像分割的角度出发, 以缺陷为目标, 将纹理表面作为背景提取产品的表面缺陷. 基于非参数统计活动轮廓模型提出一种先验分布模型, 即以纹理的灰度分布作为背景的先验信息, 使得算法更容易区分纹理背景和缺陷. 实验结果表明, 所提出的算法适用于不同纹理背景的缺陷检测, 能准确地提取缺陷位置.

关键词: 缺陷检测; 纹理背景; 活动轮廓模型; 先验分布

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Texture defects detection based on prior distribution active contour model

DAI Ming¹, YE Mu-chao¹, ZHOU Zhi-heng^{1†}, YANG Zhi-wei²

(1. School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Smart City Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: Human vision is gradually substituted by computer vision in the field of products surface detection. This is the inevitable trend of industrial automation control. However, surface texture is always a difficult point for defects detection. This paper starts from the angle of image segmentation, treating defects as objects and textures as backgrounds, to extract the surface defects. Based on the non-parametric statistical active contour model, a distribution prior model is proposed. Our model utilizes the distribution of textures as the prior distribution of the background, which makes it easier to distinguish the defects and the textures. Experiment results show that the proposed method adapts to defects detection in different texture background, and exactly extracts the location of defects.

Keywords: defects detection; textures background; active contour model; prior distribution

0 引言

随着工业规模的扩展, 计算机视觉代替人工视觉成为主流研究方向. 特别是在对人体有害的工作环境中, 人类不宜长期逗留, 而计算机视觉可以在恶劣的环境中工作, 且检测精度高于人工视觉. 另外, 在大规模的流水线生产中, 人工视觉检测精度效率较低, 甚至存在视觉疲劳导致的失误. 因此, 应用计算机视觉对工业产品进行缺陷检测是很有必要的.

Ellis 等^[1]在冷轧钢条的表面缺陷检测中通过目标分割和边缘提取算法检测了裂纹缺陷; Piironen 等^[2]在铜合金板的表面缺陷检测中加入了数学形态学, 以优化分割结果; 基于图像处理的检测方法还应用在纺织物的表面缺陷检测中, Stojanovic 等^[3]成功地将 Gabor 滤波器和前馈神经网络等方法应用到织物的缺陷检测中, 并取得了较好的效果; 同样还有在

瓷砖表面缺陷的检测中, 艾娇燕^[4]在分析了瓷砖图像的颜色统计特征和灰度共生矩阵的基础上, 确定了瓷砖表面缺陷的判断依据. 然而, 计算机视觉也存在一些尚未完善的情况. 对于复杂背景(如纹理背景)的图像, 机器视觉难以又快又准地完成缺陷检测. 背景复杂的图像无法如背景简单的图像一样, 仅通过边缘检测或设置合适阈值, 就能够把目标分割出来. 在图像分割领域, 基于几何曲线演化的活动轮廓模型^[5]占据主导地位, 它是把分割或检测的问题转化为能量泛函的建立和优化, 通过求解能量泛函对应的欧拉-拉格朗日方程实现目标.

在活动轮廓模型的研究中, 纹理图像的分割也一直是一个难点. 主要体现在纹理的细节很容易被误以为是目标; 而人们感知的是物体的整体结构特征而不是部分细节, 这种差别导致了人眼能轻易辨别的

收稿日期: 2018-09-08; 修回日期: 2018-11-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61871188); 国家重点研发计划项目(2018YFC0309400).

责任编辑: 刘德荣.

[†]通讯作者. E-mail: zhouzh@scut.edu.cn.

目标对于计算机而言却难以辨别。Ojala等^[6]认为,纹理是某些像素点根据一定变化规律构成的模式,或者纹理满足局部统计特征一致,或者纹理的局部属性变化缓慢,表现出近似周期性变化的特点;Xu等^[7]通过图像分解的方法给出合成纹理和自然纹理的结构分析,发现纹理结构在相位和振幅上有明显的相似性;Liu等^[8]在纹理分类中引入了局部二值模式(local binary patterns, LBP)方法,详细分析了LBP方法的利弊,并给出一套简洁有效的纹理分类方案;另外,在纹理合成(texture synthesis)方面,Gatys等^[9-10]通过卷积神经网络滤波器表征图像的特征,引起了人们在这一领域的兴趣。综上所述,人们对纹理的认知不断加深,并应用在计算机视觉的各个方面。

近些年来,非参数统计活动轮廓模型^[11-14]的兴起引起了人们的注意。这类模型有这样一个基本假设:目标与背景的灰度分布是有显著差异的。由于图像的目标和背景属于不同的分布,找到一条闭合曲线使得曲线内部的灰度分布与曲线外部的灰度分布差异最大化,即可认为完成了分割。这就是非参数统计活动轮廓模型的基本思想。

一般地,在实际应用场景中,在进行图像分割之前可以获悉一些关于图像的先验信息,比如目标的形状^[15]。但在工业产品的缺陷检测中,缺陷是随机产生的,往往是不规则的,所以先验形状难以获取。但工业产品的纹理灰度分布一般是固定的,因此可以考虑将灰度分布信息作为先验信息加入到非参数统计活动轮廓模型中。下一节将详细阐述本文提出的先验分布活动轮廓模型。

1 先验分布活动轮廓模型

在这一节将详细阐述所提出的方法。方法的大致框架如图1所示。将描述模型的搭建,说明其中的物理意义,运用变分水平集方法对模型进行求解。对于输入图像,先提取图像背景的纹理灰度分布;同时在带分割图像中设置矩形框作为初始轮廓;然后结合所提取的分布信息,按照文中的算法进行曲线演化,进而提取目标(缺陷)位置。

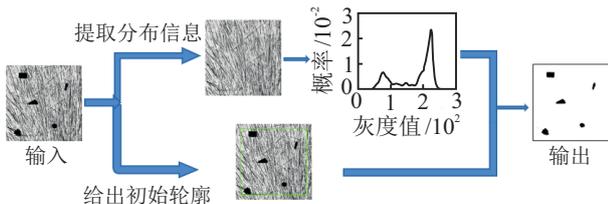


图1 先验分布活动轮廓模型的框架

1.1 模型描述

对于待分割的纹理图像 I ,其纹理背景的灰度分布是已知的,记为 Q' 。设置活动轮廓线 C ,活动轮廓线

C 把图像 I 分为内外两类区域 $R-$ 和 $R+$,它们的灰度分布分别记为 P 和 Q 。根据非参数统计活动轮廓模型的基本假设,当完成分割时, P 和 Q 的分布差异程度应该是尽可能大的。在本模型中采用海林格距离(Hellinger distance)衡量 P 与 Q 的分布差异程度,即

$$D(P, Q) = \int_{\mathbf{R}} (\sqrt{p(z)} - \sqrt{q(z)})^2 dz. \quad (1)$$

其中: z 为灰度值,取值范围是 $0 \sim 255$ 。关于 $p(z)$ 和 $q(z)$,可以通过parzen窗估计^[16]得到

$$\begin{aligned} p(z) &= \frac{1}{|R-|} \int_{R-} K_{\sigma}(z - I(x)) dx, \\ q(z) &= \frac{1}{|R+|} \int_{R+} K_{\sigma}(z - I(x)) dx. \end{aligned} \quad (2)$$

另外,在模型中,纹理背景的先验分布 Q' 已经给出,所以同时要保证 Q' 与 Q 的分布差异程度尽可能小。在本模型中,采用皮尔森卡方散度(Pearson Chi-square divergence)衡量 Q' 与 Q 的分布差异程度,即

$$D(Q', Q) = \int_{\mathbf{R}} \frac{(q'(z) - q(z))^2}{q(z)} dz. \quad (3)$$

因此,总的能量函数可以表达成以下形式:

$$\begin{aligned} E &= -D(P, Q) + \mu D(Q', Q) + \lambda \text{Length}(C) = \\ &= - \int_{\mathbf{R}} (\sqrt{p(z)} - \sqrt{q(z)})^2 dz + \\ &= \mu \int_{\mathbf{R}} \frac{(q'(z) - q(z))^2}{q(z)} dz + \lambda \text{Length}(C). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $\text{Length}(C)$ 为活动轮廓的周长, μ 和 λ 为正的参数。此外,由于 $p(z)$ 等都是概率密度函数,在全区域的积分为1。因此式(4)可以进一步化简为

$$\begin{aligned} E &= 2 \int_{\mathbf{R}} \sqrt{p(z)q(z)} dz + \\ &= \mu \int_{\mathbf{R}} \frac{q'(z)^2}{q(z)} dz + \lambda \text{Length}(C). \end{aligned} \quad (5)$$

注意,常数项不影响模型的求解,已在式(5)省略掉。在下一小节,将通过最小化式(5)提取目标区域,即将表面缺陷提取出来。

1.2 能量最小化与水平集演化公式

为了求解式(5),本文引入变分水平集方法^[17]。水平集函数定义为符号距离函数

$$\phi(x) = \begin{cases} d(x, C), & x \text{ 在封闭曲线外部;} \\ 0, & x \text{ 在封闭曲线上;} \\ -d(x, C), & x \text{ 在封闭曲线内部.} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $d(x, C)$ 为点与曲线 C 的欧氏距离,曲线 C 对应的就是零水平集。

记 $H(\cdot)$ 为Heaviside函数

$$H(y) = \begin{cases} 1, & y \geq 0; \\ 0, & y < 0; \end{cases} \quad \delta(y) = \frac{dH(y)}{dy}. \quad (7)$$

结合水平集方法, P 和 Q 的概率密度估计可以写成以下形式:

$$p(z|\phi(x)) = \frac{\int_{\Omega} K_{\sigma}(z - I(x))H(-\phi(x))dx}{\int_{\Omega} H(-\phi(x))dx},$$

$$q(z|\phi(x)) = \frac{\int_{\Omega} K_{\sigma}(z - I(x))H(\phi(x))dx}{\int_{\Omega} H(\phi(x))dx}. \quad (8)$$

那么式(5)可以重写为水平集的形式

$$E(\phi, p, q) = 2 \int_{\mathbf{R}} \sqrt{p(z|\phi(x))q(z|\phi(x))}dz +$$

$$\mu \int_{\mathbf{R}} \frac{q'(z|\phi(x))^2}{q(z|\phi(x))}dz +$$

$$\lambda \int_{\Omega} |\nabla H(\phi(x))|dx. \quad (9)$$

对于式(9), 使用经典的梯度下降法与交替下降法求解. 下面将自变量分成两类, 概率密度估计 $p(z)$ 、 $q(z)$ 和水平集函数 $\phi(x)$:

1) 固定 ϕ , 优化 $p(z)$ 和 $q(z)$ 达到能量最小化: $p(z)$ 和 $q(z)$ 可以直接由式(8)得到.

2) 固定 p 和 q , 优化 ϕ 达到能量最小化: 首先求得式(9)关于 ϕ 的导数如下:

$$\frac{\partial E}{\partial \phi} = \int_{\mathbf{R}} \frac{\partial p}{\partial \phi} \cdot \sqrt{\frac{q}{p}} + \frac{\partial q}{\partial \phi} \cdot \sqrt{\frac{p}{q}} dz -$$

$$\mu \int_{\mathbf{R}} \frac{\partial q}{\partial \phi} \cdot \left(\frac{q'}{q}\right)^2 dz +$$

$$\lambda \delta(\phi(x)) \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi(x)}{|\nabla \phi(x)|} \right). \quad (10)$$

而根据式(8)可以得到

$$\frac{\partial p}{\partial \phi} = \frac{\delta(\phi(x))}{|R-|} (p(z) - K(z - I(x))),$$

$$\frac{\partial q}{\partial \phi} = \frac{\delta(\phi(x))}{|R+|} (K(z - I(x)) - q(z)). \quad (11)$$

将式(11)代入(10)中, 可以得到

$$\frac{\partial E}{\partial \phi} = \delta(\phi(x)) \cdot V(x). \quad (12)$$

其中

$$V(x) = \int_{\mathbf{R}} |R-|^{-1} (p - K) \sqrt{\frac{q}{p}} dz +$$

$$\int_{\mathbf{R}} |R+|^{-1} (K - p) \left(\sqrt{\frac{p}{q}} - \mu \left(\frac{q'}{q}\right)^2 \right) dz +$$

$$\lambda \delta(\phi(x)) \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi(x)}{|\nabla \phi(x)|} \right). \quad (13)$$

最后, 在水平集函数中引入时间变量 t , 得到水平集函数的梯度下降流

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\partial E_{\alpha}}{\partial \phi} = -\delta(\phi(x)) \cdot V(x). \quad (14)$$

那么, 水平集函数的迭代方程为

$$\phi_{t+1} = \phi_t + \Delta t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial t}, \quad (15)$$

其中 Δt 为时间步长.

作为这一小节的总结, 给出模型求解的数值算法步骤如下.

step 1: 选定参数 μ 、 λ 和时间步长 Δt , 设置初始时间参数 $t = 0$, 给出初始水平集 ϕ_0 ;

step 2: 根据当前水平集 ϕ_t , 通过式(8)更新概率密度估计 p_{t+1} 和 q_{t+1} ;

step 3: 根据 p_{t+1} 、 q_{t+1} 和 ϕ_t , 通过式(15)更新水平集函数 ϕ_{t+1} ;

step 4: $t \rightarrow t + 1$;

step 5: 判断是否收敛, 是则停止, 否则返回 step 2.

2 实验分析

2.1 实验设置

本文实验从 Brodatz 纹理库中选取 112 张纹理图像作为背景, 图片大小都是 640×640 . 然后在每张纹理图像的不同位置随机添加不同形状的图形, 以此来模拟工业产品的表面缺陷. 以下 4 种缺陷基准是本文主要用到的, 如图 2 所示.

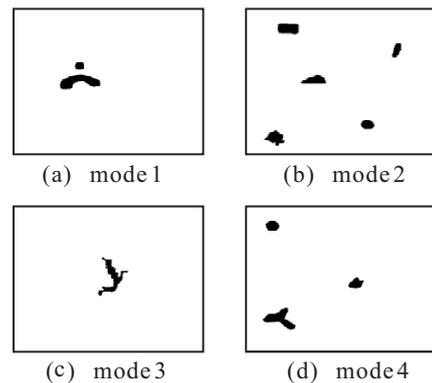


图 2 缺陷基准模式

将 Brodatz 纹理库的纹理图与上述的基准模式组合作为本文的实验对象, 如图 3 所示. 接下来对这类合成图像进行缺陷检测的模拟实验, 在图 3 中“DX”代表纹理库中第 X 幅图.

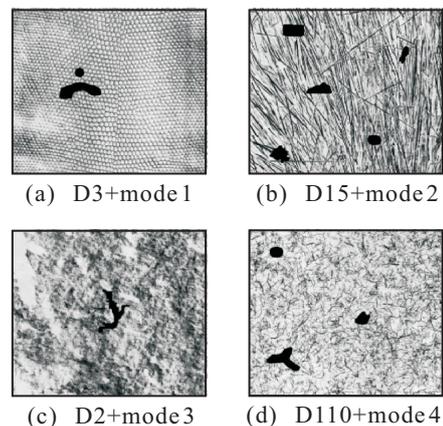


图 3 实验对象示例

2.2 评价标准

在本文的实验中,为了客观评价算法的效果,引入一套评价方案. 图像分割可以看作是一个分类问题,先记 T = 实际的目标, F = 实际的背景, P = 被认为是目标, N = 被认为是背景. 那么对于图像中 640×640 个像素点,分割之后可以分为以下4类. TP = 实际属于目标且被认为是目标; TN = 实际属于目标但被误认为是背景; FP = 实际属于背景但被误认为是目标; FN = 实际属于背景且被认为是背景. 显然,理想情况下,正确的分类 TP 和 FN 越大,说明分割效果越好,错误的分类 TN 和 FP 越大说明分割效果越差. 据此可以定义3个指标如下:

1) 精确率

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (16)$$

2) 召回率

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + TN}; \quad (17)$$

3) 成功率

$$\text{Success} = \frac{TP + FN}{TP + TN + FP + FN}. \quad (18)$$

2.3 实验结果

首先展示所提出的算法在图3中这4幅合成图中的实验效果. 为了方便对照缺陷基准,将目标区域(即缺陷)标注为黑色,背景区域(即模拟工业产品)标注为白色,如图4所示.

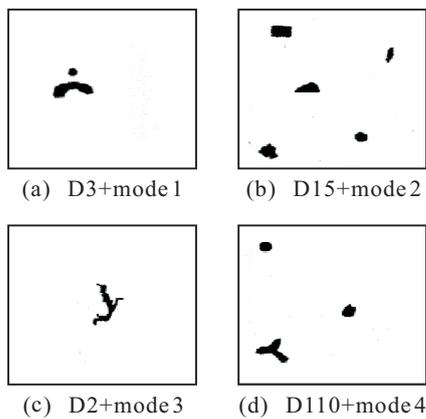


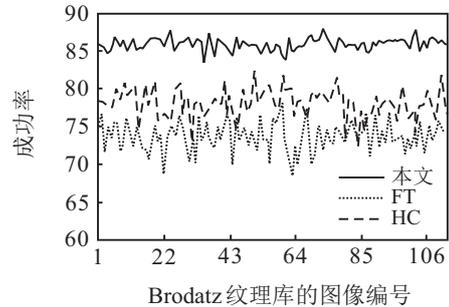
图4 本文算法的分割效果

对比图2给出的缺陷基准可以看出,在视觉效果上,所提出的算法取得了较为满意的分割效果. 但由于实验对象的纹理背景干扰比较大,还是会有一些本是背景的像素点被误分割为目标. 从图4可以看出,这些误分割与纹理背景以及缺陷位置、形状都有关系.

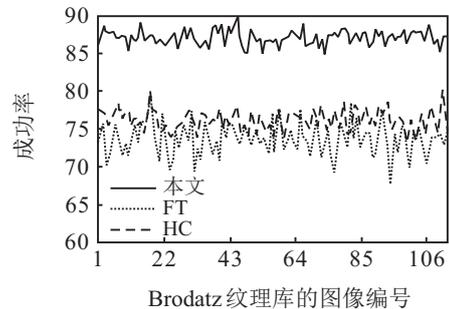
接下来看本文算法与其他算法的数值比较,参与对比的是两种显著性检测算法: FT 算法^[18] 和 HC 算法^[19]. 这两种算法主要是通过颜色特征建立显著性

模型,对于纹理背景复杂的灰度图像不能够有效地检测出纹理背景中的缺陷.

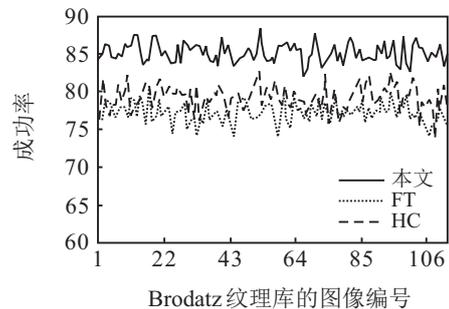
图5给出了3种算法关于所有缺陷基准与纹理库的组合图像的认识成功率折线图. 表1总结了3种算法在 $Brodatz$ 纹理库的平均表现.



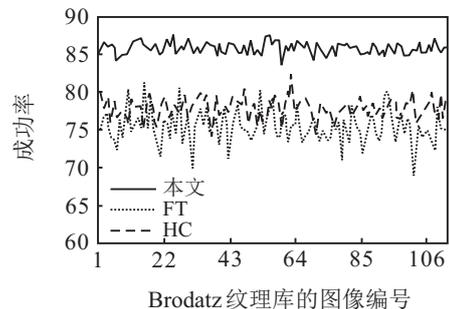
(a) 不同算法对 mode 1 缺陷的识别成功率



(b) 不同算法对 mode 2 缺陷的识别成功率



(c) 不同算法对 mode 3 缺陷的识别成功率



(d) 不同算法对 mode 4 缺陷的识别成功率

图5 不同算法关于4种缺陷模式的识别成功率

表1 不同算法在 $Brodatz$ 纹理库的检测结果

算法	precision / %	recall / %	success / %	time / s
FT	77.35	69.52	73.87	0.56
HC	80.48	79.13	79.65	0.74
本文	85.37	83.29	84.62	2.14

总体而言,所提出算法的表现优于前两者.但有一点值得注意,由于Parzen窗估计这一步所需的时间和图像大小是正相关的,在 640×640 的图像中,所提出的算法的分割速度明显不如前两者.这个缺陷将会在进一步的研究中弥补.

3 结论

针对纹理背景下工业产品的表面缺陷检测,本文在非参数统计活动轮廓模型的基础上,引入纹理的灰度分布作为先验信息,提出了一种先验分布活动轮廓模型,对纹理背景图像进行目标提取.通过分割的视觉效果和准确率、召回率等指标可以看出,所提出的模型是有一定成效的.但是在分割速度上尚有不足,未能够又快又好地完成检测任务.今后将在此基础上进一步研究,提升算法的速度.

参考文献(References)

- [1] Ellis T, Hill W, Finkelstein L. Automatic inspection of cold-rolled steel strip[C]. Proceedings of IEE Conference on Electronic Image Processing. London: IEEE, 1982: 1415-1420.
- [2] Piironen T, Silven O, Pietik I M, et al. Automated visual inspection of rolled metal surfaces[J]. Machine Vision and Applications, 1990, 3(4): 247-254.
- [3] Stojanovic R, Mttropulos P, Koulamas C, et al. Real-time vision-based system for textile fabric inspection[J]. Real-Time Imaging, 2001, 7(6): 507-518.
- [4] 艾娇燕. 基于计算机视觉的墙地砖颜色分类和缺陷检测研究[D]. 广州: 华南理工大学自动化科学与工程学院, 2003: 52-64.
(Ai Q Y. Research on color grading and defect detection based on computer vision[D]. Guangzhou: College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, 2003: 52-64.)
- [5] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4): 321-331.
- [6] Ojala T, Pietikainen M, Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 971-987.
- [7] Xu G, Wang X, Zhou L, et al. Image decomposition and texture analysis via combined bi-dimensional Bedrosian's principles[J]. Iet Image Processing, 2018, 12(2): 262-273.
- [8] Liu L, Fieguth P, Guo Y, et al. Local binary features for texture classification: Taxonomy and experimental study[J]. Pattern Recognition, 2017, 62(1): 135-160.
- [9] Gatys L A, Ecker A S, Bethge M. Texture synthesis using convolutional neural networks[J]. Computer Science, 2015, 70(1): 262-270.
- [10] Gatys L A, Ecker A S, Bethge M. Image style transfer using convolutional neural networks[C]. Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE, 2016: 2414-2423.
- [11] Kim J, Fisher J W, Yezzi A, et al. A nonparametric statistical method for image segmentation using information theory and curve evolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(10): 1486-1502.
- [12] Michailovich O, Rathi Y, Tannenbaum A. Image segmentation using active contours driven by the Bhattacharyya gradient flow[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(11): 2787-2801.
- [13] Wu H, Appia V, Yezzi A. Numerical conditioning problems and solutions for nonparametric i.i.d. statistical active contours[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1298-1311.
- [14] Gong M, Li H, Zhang X, et al. Nonparametric statistical active contour based on inclusion degree of fuzzy sets[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2016, 24(5): 1176-1192.
- [15] Chan T, Zhu W. Level set based shape prior segmentation[C]. Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego: IEEE, 2005: 1164-1170.
- [16] Parzen E. On estimation of a probability density function and mode[C]. The Annals of Mathematical Statistics, 1962, 33(3): 1065-1076.
- [17] Zhao H K, Chan T, Merriman B, et al. A variational level set approach to multiphase motion[J]. Journal of Computational Physics, 1996, 127(1): 179-195.
- [18] Achanta R, Hemami S. Frequency-tuned salient region detection[C]. Computer Vision and Pattern Recognition. Florida: IEEE, 2009: 1597-1604.
- [19] Cheng M M, Mitra N J. Global contrast based salient region detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 37(3): 409-416.

作者简介

戴铭(1991—),男,博士生,从事数字图像处理、人工智能的研究, E-mail: dai.ming@mail.scut.edu.cn;

叶木超(1997—),男,学士,从事图像分割、深度学习的研究, E-mail: eemuchaoye@mail.scut.edu.cn;

周智恒(1977—),男,教授,博士,从事模式识别、人工智能、大数据分析、智能制造等研究, E-mail: zhouzh@scut.edu.cn;

杨志伟(1968—),男,高级工程师,从事工业互联网、5G应用和智慧城市的规划、咨询和设计、工业化和信息化融合体系的建立的研究, E-mail: yangzhiwei@caict.ac.cn.