

基于改进的背景模型的图像识别算法研究

魏霖静¹ 宁璐璐² 代永强^{1,3} 侯振兴⁴

(甘肃农业大学信息科学技术学院 兰州 730070)¹ (江南大学生物工程学院 无锡 214000)²

(兰州大学信息科学与工程学院 兰州 730000)³ (南京大学信息管理学院 南京 210093)⁴

摘要 当图像亮度不均匀、对比度低时,提取图像前景较困难。为此,提出一种图像分割方法,结合正弦基函数和绝对值距离测度构建背景模型,依据优化理论和迭代法求解背景模型,通过比较背景模型中各像素点亮度与实际图像中各像素点亮度来判别各像素点是背景还是前景。为应对图像亮度不均匀的情况,在图像分割前对图像进行分块,在分块图像中依据背景模型或相邻分块背景相似度进行图像分割。实验结果表明,在普适性方面,相对于经典的模糊 C 均值法和 OTSU 法,该方法的分割误差小,尤其是对亮度不均匀和对比度低的图像;在掌纹图像分割应用方面,与迭代线跟踪法和模糊粗糙集法相比,该方法的错误率低、信噪比高、处理时间短。最后将提出的分割算法应用在人脸识别上,实验结果表明了该算法的先进性。

关键词 背景模型,图像分割,基函数,正弦函数,优化理论,迭代法,距离测度,人脸识别

中图法分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.9.063

Image Segmentation Method Based on Background Model and its Application in Face Recognition

WEI Lin-jing¹ NING Lu-lu² DAI Yong-qiang^{1,3} HOU Zhen-xing⁴

(Information Institute of Science and Technology, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China)¹

(School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China)²

(School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)³

(School of Information Management, Nanjing University, Nanjing 210093, China)⁴

Abstract The foreground image is hard to be extracted when image's intensity is inhomogeneous or the contrast is low. To solve this problem, an image segmentation method was proposed. This method reconstructs background model by combining sine basis functions with absolute distance measurement, and solves the model according to optimization theory and iteration method. This method discriminates between background and foreground of every pixel by comparing the intensity of each pixel in the background model with that in real image. To deal with the situation of inhomogeneous intensity of image, the image is divided into blocks before image segmentation, and is segmented according to background model and background similarity among adjacent blocks in sub-block image. Experimental results show that, comparing with classical methods including fuzzy C-means and OTSU, this method has lowest segmentation error, especially for the image with inhomogeneous intensity and low contrast. In the applications of palmprint image segmentation, comparing with iterated line tracing method and rough-fuzzy set method, this method has the characteristics of low error rate, high signal to noise ratio and shorter processing time.

Keywords Background model, Image segmentation, Basis function, Sine function, Optimization theory, Iteration method, Distance measure, Face recognition

1 引言

图像分割是采用图像分析、处理方法将图像中的目标和背景分离开来的技术,一直是数字图像处理、计算机视觉、人工智能、视频处理等学科的基础研究课题^[1-3]。图像分割的基本思路是将图像中各像素点亮度与某一阈值进行比较,依据比较结果区分目标和背景,此类方法称为阈值法,可依据阈值

的计算方法差异将其分为固定阈值法和自适应阈值法^[4]。自适应阈值法可依据图像属性自适应确定阈值,是图像分割领域的常用方法^[5]。模糊 C 均值法^[6]和 OTSU 法^[7]是图像分割领域应用最为广泛的自适应阈值分割方法。然而,当图像亮度不均匀、对比度低时,背景和前景的灰度分布区分不显著,此类方法分割效果也不理想^[8]。近些年涌现出很多优秀的图像分割方法,如图法^[9]、迭代线跟踪法^[10]、K 均值聚类与

到稿日期:2016-03-01 返修日期:2016-05-24 本文受国家自然科学基金项目(034031122,61063028),兰州市科技局项目(2014-1-74)资助。

魏霖静(1977-),女,博士,副教授,主要研究方向为智能计算、生物信息学,E-mail:wlj@gsau.edu.cn;宁璐璐(1989-),女,博士,助理研究员,主要研究方向为计算生物学、生物信息学;代永强(1981-),男,博士生,副教授,主要研究方向为智能计算、模式识别、生物信息技术;侯振兴(1977-),男,博士生,副教授,主要研究方向为人机交互与用户行为。

图分割法^[11]、能量函数法^[12]。这些方法都是针对特定应用场景提出的,在解决对应应用场景的图像分割问题时具有比较理想的效果,然而对其他应用场景可能无法达到较好的效果。如文献[10]提出的迭代线跟踪方法仅对具有线状结构的静脉纹路图像分割效果较优,文献[12]提出的方法仅对包含文字信息的文本图像分割效果较优。

一般地,图像中背景部分较平滑而前景不平滑。因此,本文从信号分解的角度来研究图像分割问题,采用一个平滑的背景模型来拟合图像,将背景模型中各像素点的值作为阈值来判断实际图像中各像素点的属性,这能有效解决图像亮度不均匀和对对比度低时的前景提取难题。同时,针对掌纹识别的具体应用场景,采用本文图像分割方法进行掌纹图像分割可以提取清晰完整的掌纹纹路,有助于提升掌纹识别的性能。

2 背景模型构建与图像分割

2.1 背景模型构建

对于任意一幅图像,背景区域一般是平滑的。假定背景区域可以采用一个平滑的背景模型表示,那么该模型需要满足两个条件:1)背景区域实际像素值与模型中的估计值之间差异较小;2)目标区域实际像素值与模型中的估计值之间差异较大。

在此情况下,将图像中各像素点的亮度值与背景模型中对应点的亮度值进行比较,绝对偏差较大的像素点可以判定为目标像素点,而绝对偏差较小的像素点则可以判定为背景像素点,从而可以实现图像分割。

考虑到环境光照等因素影响,图像中不同位置处的背景区域可能存在较大的亮度差异,如图1所示,很明显,区域B处的亮度要远大于区域A处的亮度,尽管区域B和区域A都是平滑区域,但总体而言区域B和区域A之间并不平滑。为消除这一现象的影响,在构建图像背景模型前,需要将图像划分成互不重叠的图像块,记为 f ,尺寸为 $N \times N$,尺寸小于 $N \times N$ 的图像块通过补零扩充至 $N \times N$ 。假定图像块中背景区域是平滑的,如果不平滑,可以继续划分为更小的图像块,具体划分准则将在下一节的图像分割阶段详述。本节仅针对图像块 f 讨论背景模型的构建问题。

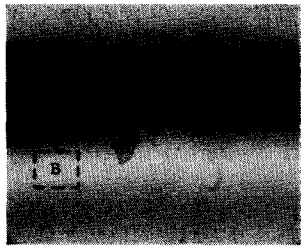


图1 背景亮度不均匀的图像示例

图像块 f 的背景模型可以表示为 $Q(x, y, \alpha)$,其中, (x, y) 为像素点坐标, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M]^T$ 为模型参数, M 为参数个数。

背景模型中待求变量为模型参数,常采用最优化方法求解模型的最优参数。该方法需要构建一个目标函数。结合背景模型需要满足的第1个条件,这里以像素点实际亮度值与背景模型中估计值之间的距离作为目标函数,定义为:

$$P(\alpha) = \|f(x, y) - Q(x, y, \alpha)\|_a \quad (1)$$

其中, $f(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 的亮度值, $\|\cdot\|_a$ 表示一种距离测度。

结合背景模型条件1,当目标函数取最小值时模型参数为最优模型,即最优模型参数为:

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} \|f(x, y) - Q(x, y, \alpha)\|_a \quad (2)$$

对于式(2),需要解决的问题有两个:如何表示背景模型 Q ;如何计算距离测度。

针对第1个问题,考虑到线性函数简单易求解,本文采用基函数的线性组合来表示背景模型,定义为:

$$Q(x, y, \alpha) = \sum_{i=1}^M \alpha_i B_i(x, y) \quad (3)$$

其中, $B_i(x, y)$ 表示第 i 个二维基函数。

常用的基函数有幂函数、正弦函数和余弦函数^[13]。幂函数对图像的平滑性要求较高,且需要考虑基点和收敛半径,不适用于构建鲁棒的背景模型。正弦函数和余弦函数原理一致,对图像的平滑性要求不高。本文采用正弦函数作为基函数,其定义如下:

$$B_{u,v}(x, y) = \sin\left[\frac{(2x+1)\pi u}{2N}\right] \sin\left[\frac{(2y+1)\pi v}{2N}\right] \quad (4)$$

其中, u, v 为基函数的频率。

基函数越多,模型拟合误差越小,但复杂度也相应增加。在兼顾拟合误差和复杂度的情况下,常按照 zig-zag 顺序对 (u, v) 平面上的基函数进行排序,并挑选前 M 个基函数作为模型拟合所需的基函数。

将式(4)代入式(2),得:

$$\{\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_M^*\} = \arg \min_{\alpha_i, i=1,2,\dots,M} \|f(x, y) - \sum_{i=1}^M \alpha_i B_i(x, y)\|_a \quad (5)$$

通过求解式(5),即可得到所需的背景模型。

为便于求解,将式(5)转换为一维形式,表示为:

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} \|F - B\alpha\|_a \quad (6)$$

其中,矩阵 F 和 B 的维数分别为 N^2 和 $N^2 \times M$ 。具体地, $f(x, y)$ 对应于 F 的第 $(x \times N + y)$ 个元素, B 的第 i 列对应于二维形式的 $B_i(x, y)$ 。

针对式(2)涉及的第2个问题,需要选择一个合理的距离测度。常用的距离测度有绝对值距离、欧氏距离、明氏距离和切氏距离^[14],对于向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 和 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$,两者的距离定义如下:

1)绝对值距离

$$d(x, y) = \|x - y\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (7)$$

2)欧氏距离

$$d(x, y) = \|x - y\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

3)明氏距离

$$d(x, y) = \|x - y\|_m = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

4)切氏距离

$$d(x, y) = \|x - y\|_{\max} = \max_i |x_i - y_i| \quad (10)$$

本文选用绝对值距离作为距离测度。因为绝对值距离计算简单,易于求解。

为便于说明,引入辅助变量 $Z = F - B\alpha$,则式(6)可以转换为如下形式:

$$\begin{aligned} \alpha^* &= \arg \min_{\alpha} \|F - B\alpha\|_1 = \arg \min_{\alpha} \|Z\|_1 \\ &= \arg \min_{\alpha} \left(\sum_{i=1}^{N^2} |z_i| \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, z_i 为 Z 的第 i 个元素。

2.2 背景模型求解

式(11)的求解是一个优化问题,优化数学模型为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \|Z\| \\ \text{s. t. } \quad & Z = F - B\alpha \end{aligned} \quad (12)$$

上述模型可以采用迭代算法求解^[15],在每一迭代过程中,采用如下的更新方式:

$$\begin{cases} \alpha^{k+1} = (B^T B)^{-1} B^T (F + Z^k - U^k) \\ Z^{k+1} = O(B\alpha^{k+1} - F + U^k) \\ U^{k+1} = U^k + B\alpha^{k+1} - Z^{k+1} - F \end{cases} \quad (13)$$

其中, U 为迭代过程引入的双向变量, $O(x)$ 为阈值函数,定义为:

$$O(x) = \text{sign}(x) \max(|x| - \frac{1}{\rho}, 0) \quad (14)$$

其中, ρ 为增广拉格朗日参数。

迭代过程的收敛准则有两个:迭代次数大于阈值 ϵ_1 ;迭代前后 Z 的绝对偏差小于阈值 ϵ_2 。

满足收敛准则时,停止迭代过程,得到最优模型参数 $\alpha^* = [\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_M^*]^T$ 。由该参数可以构建图像块 f 的背景模型为:

$$Q(x, y, \alpha^*) = \sum_{i=1}^M \alpha_i^* * B_i(x, y) \quad (15)$$

2.3 图像分割

对于图像块 f ,构建背景模型,然后计算图像块中每一个像素的值与背景模型中每一个像素的值之间的绝对偏差,记为:

$$f_d(x, y) = |f(x, y) - Q(x, y, \alpha^*)| \quad (16)$$

接着进行阈值分割,表示为

$$f_b(x, y) = \begin{cases} 0, & f_d(x, y) < T_f \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $f_b(x, y)$ 表示分割后图像中像素点 (x, y) 的值,0表示背景,1表示前景。 T_f 为分割阈值,由图像块 f 的绝对偏差图像自适应求取,具体为:

$$T_f = \frac{1}{N^2} \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N f_d(x, y) \quad (18)$$

为了避免图像分块尺寸太大造成的欠分割问题,本文统计图像块分割后背景像素点的数量。如果该值大于阈值 ϵ_3 ,则认为图像分块尺寸过大,需要将当前块进行四等分,然后对4个图像子块再构建背景模型和进行分割。如果图像子块分割后背景像素点数量仍大于阈值 ϵ_3 ,则继续四等分,直至达到最小图像块尺寸 N_{\min} 。

图像中背景区域和目标区域内部经常存在大面积的平滑图像块,这些图像块可以依据周围图像块的属性来确定其本身属性,从而可以减少背景建模所耗费的时间。因此,对于每一个图像块,本文首先统计图像块中像素最大灰度值与最小灰度值的绝对偏差,如果该值小于阈值 ϵ_4 ,则认为该图像块是平滑图像块,将其作为属性待定块,不需要构建背景模型和进行分割。待图像中所有块处理完毕后,再比较该图像块中灰度均值与其8邻域相邻块中背景模型中均值的绝对偏差,如果存在一个绝对偏差小于阈值 ϵ_5 ,那么就认为该图像块中所有像素点为背景,否则为目标。

3 实验与分析

为评价本文方法的分割性能,设计了两组实验。第一组

实验是与目前通用的经典图像分割方法(模糊C均值法^[6]和OTSU法^[7])进行对比,验证本文方法在普适性方面的性能。第二组实验是与目前掌纹图像分割领域性能好的分割算法(迭代线跟踪法^[10]和模糊粗糙集法^[16])进行对比,验证本文方法在掌纹图像分割应用领域的实用价值。本文实验所用的计算机平台性能为CPU: Intel i5 3, 20GHz;内存: DDR3 4GB;操作系统: 64位 Windows 7;软件平台: Visual Studio 2010, OpenCV 2.4.6。

3.1 普适性实验

实验选用机械和医学领域中工程应用常用的图像,图2(a1)所示为机械器件瑕疵图像,图2(a2)为线材图像,图2(a3)为血液中细胞图像,图2(a4)为眼底血管图像。所选图像都是灰度图像,尺寸均为 256×256 。图2中(b1)~(b4)是采用OpenCV自带的模糊C均值法的分割效果,参数选择默认参数;(c1)~(c4)是采用依据文献^[7]设计的OTSU方法的分割效果;(d1)~(d4)是采用本文方法的分割效果。所用的参数取值如表1所列(取值源于大量实验确定的经验值)。

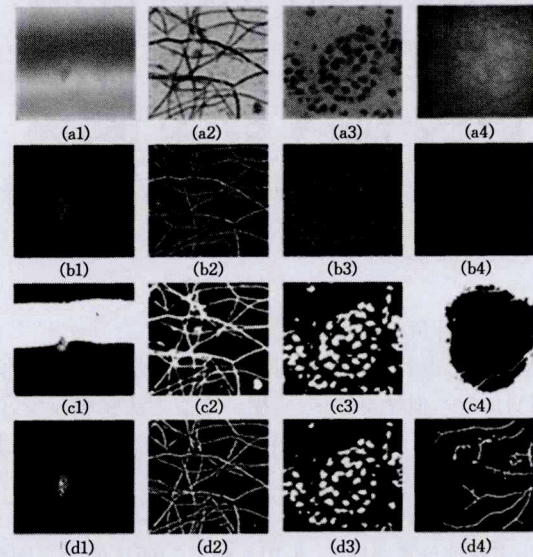


图2 通用图像分割效果

表1 本文方法参数取值

M	N	N_{\min}	ρ	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5
10	32	8	1	0.1	300	0.7	5	5

从图2可以看出,图2(b3)和图2(b4)存在明显的欠分割现象,而图2(c1)和图2(c4)存在明显的过分割现象。从主观上评价,本文方法的总体分割效果要优于其他两种方法。尤其是对于存在亮度不均匀问题的图2(a1)和图2(a4)以及存在对比度低的图2(a3)和图2(a4),本文方法的分割误差明显小于其他方法。但是本文方法的运算效率低于其他两种方法,如表2所列。

表2 分割耗时对比

	模糊C均值法	OTSU法	本文方法
耗时(ms)	13	9	51

3.2 掌纹图像分割应用实验

实验图像选用香港理工大学的掌纹图像库^[17],其中共有6000幅灰度图像,尺寸均为 128×128 。为定量评价算法性能,人工标定图像中的掌纹目标作为标准分割结果。图像分割效果如图3中所示(限于篇幅,仅列举4幅图像的分割效果

及对应的人工标定结果)。其中,图3中(a1)~(a4)为原始图像;(b1)~(b4)是人工标定的掌纹目标;(c1)~(c4)是采用文献[10]所述的迭代线跟踪方法的分割效果;(d1)~(d4)是采用文献[16]所述的模糊粗糙集法的分割效果;(e1)~(e4)是采用本文方法的分割效果。

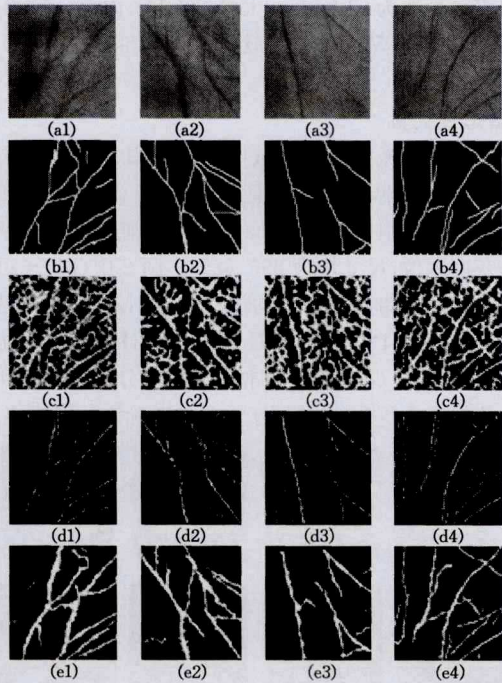


图3 掌纹图像分割效果

(1)定性评价

从图3可以看出,主观上评价,迭代线跟踪方法尽管漏分割的目标较少,但噪声较多;模糊 τ 均值方法噪声较少,但目标存在丢失现象;而本文方法错误分割的像素明显少于其他两种方法。

(2)定量评价

为定量评价算法性能,采用文献[10]所述的3个图像分割评价指标(错误率、信噪比和平均处理时间)。

1)错误率(Error Rate, ER)

用于表示分割错误的像素数(包括错判为目标的像素数 N_f 和错判为背景的像素数 N_m)占图像中总像素数 N_t 的比例,即

$$ER = \frac{N_f + N_m}{N_t} \times 100\% \quad (19)$$

2)信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)

用于表示正确分割的像素数与错误分割像素数的比例。为便于观测,采用对数形式,具体为

$$SNR = 10 \times \log \frac{N_t - N_f}{N_f} \quad (20)$$

3)处理时间(Running Time, RT)

用于表示图像分割过程所耗费的时间。

将3种图像分割方法得到的分割结果与人工标定结果进行比较,可以得到ER和SNR指标。表3给出了3种方法的性能指标对比,3个指标都是取所有图像分割指标的平均值。从表3中可以明显看出,本文方法的错误率、信噪比、处理时间3个指标都优于其他两种方法,尤其是错误率和信噪比优势明显。

表3 分割性能对比

	ER(%)	SNR(%)	耗时(ms)
迭代线跟踪方法	68.6	0.17	39
模糊粗糙集法	71.9	4.03	43
本文方法	47.3	5.31	28

最后,将所提的改进的图像分割算法应用在人脸识别上。在实验中,采用ORL人脸图像库。该库包含40个个体,每个个体拥有10幅人脸图像,共计400幅人脸图像。每一个体的人脸图像包含光照、姿态、表情和饰物的变化。部分样本如图4所示。

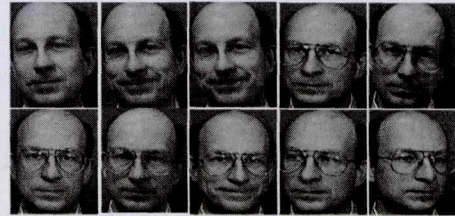


图4 ORL人脸库部分样本

实验时在数据库的每一人脸个体中选择第一幅图像作为注册样本进行训练,其他样本作为测试样本测试本文分割算法的识别性能。同时在性能评价阶段,分别测试3个评价指标,即错误接受率(FAR)、错误拒绝率(FRR)、识别率(ART)。本文算法在分层决策阶段采用了一个固定阈值 T 。一般地,该阈值取值越大,算法的错误接受率越低,但错误拒绝率越高,运算效率也越高。实验分析了 $T=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.05 种情况下的算法性能指标,图5所示为本文算法在ORL人脸库上测试的识别精度指标。

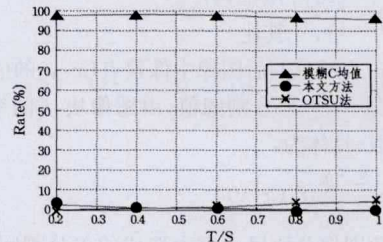


图5 ORL人脸库下的识别性能指标

从图5中可以看出,本文算法应用于人脸识别时具有较高的识别率。

结束语 基于信号分解的思想和背景模型构建、求解的方法,本文提出一种图像分割方法。在普适性方面,与经典的模糊C均值法和OTSU法相比,本文方法分割效果好,尤其是对图像亮度不均匀、对比度低的情况分割误差小,但运算效率还有待提高。在掌纹识别应用领域,与目前性能较好的迭代线跟踪法和模糊粗糙集法相比,本文方法可以提取清晰完整的掌纹纹路,可有效应用于此类图像的分割。

参考文献

[1] Zhang H, Fritts J E, Goldman S A. Image segmentation evaluation: A survey of unsupervised methods[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110(2): 260-280
 [2] Boykov Y, Funka-Lea G. Graph Cuts and Efficient N-D Image Segmentation[J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 70(2): 109-131

- [3] Pal N R, Pal S K. A review on image segmentation techniques [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(93): 1277-1294
- [4] Lin Zheng-chun, Wang Zhi-yan, Zhang Yan-qing. Optimal Evolution Algorithm for Image Thresholding[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22(7): 1201-1206 (in Chinese)
林正春, 王知衍, 张艳青. 最优进化图像阈值分割法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(7): 1201-1206
- [5] Riquelme M T, Barreiro P, Ruiz-Altisent M, et al. Olive classification according to external damage using image analysis[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(3): 371-379
- [6] Rahimi S, Zargham M, Thakre A, et al. A Parallel Fuzzy C-Mean algorithm for Image Segmentation[C]// *Processing Nafips'04*. 2004: 234-237
- [7] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on System Man and Cybernetic*, 1979, 9(1): 62-66
- [8] Li C, 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
- [9] Felzenszwalb P F, Huttenlocher D P. Efficient Graph-Based Image Segmentation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 59(2): 167-181
- [10] Liu T, Xie J B, Yan W, et al. An algorithm for finger-vein segmentation based on modified repeated line tracking[J]. *Imaging Science Journal*, 2013, 61(6): 491-502
- [11] Pham V H, Lee B R. An image segmentation approach for fruit defect detection using k-means clustering and graph-based algorithm[J]. *Vietnam Journal of Computer Science*, 2014, 2(1): 25-33
- [12] Brodi D. Text Line Segmentation With Water Flow Algorithm Based on Power Function[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2015, 66(3): 132-141
- [13] Wang X H, Yi-Gang H E, Zeng Z Z. Optimized Design of the Type-four FIR Filter Based on Neural Networks with Sine Basis Functions[J]. *Journal of Circuits & Systems*, 2003, 8(5): 97-100
- [14] Jia Xu, Sun Fu-ming, Cao Yu-dong, et al. Dorsal Hand Vein Recognition Algorithm Based on Effective Dimensional Feature [J]. *Computer Science*, 2016, 43(1): 315-318 (in Chinese)
贾旭, 孙福明, 曹玉东, 等. 基于有效维度特征的手背静脉识别算法[J]. *计算机科学*, 2016, 43(1): 315-318
- [15] He J H. A New Iteration Method For Solving Algebraic Equations[J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2003, 135(1): 81-84
- [16] Maji P, Roy S. Rough-Fuzzy Clustering and Unsupervised Feature Selection for Wavelet Based MR Image Segmentation[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e123677
- [17] <http://www4.comp.polyu.edu.hk/~biometrics/MultispectralPalmprint/MSP.htm>
- [18] Hou Zhi-xu, Zhang Jian-xun. A method of Color Image Segmentation Used in Obstacle Recognition[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2016, 30(3): 94-111 (in Chinese)
侯之旭, 张建勋. 一种彩色图像分割的障碍物识别方法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2016, 30(3): 94-111

(上接第 294 页)

- [3] Smith S M, Brady J M. Susan—a new approach to low level image processing[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78
- [4] Zhang X, Wang H, Hong M, et al. Robust image corner detection based on scale evolution difference of planar curves[J]. *Pattern Recognit. Lett.*, 2009, 30(1): 449-455
- [5] Luo Xiao-hui, Li Jian-wei. DOG Model-Based Detector of Corner [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003(11): 87-99 (in Chinese)
罗晓晖, 李见为. 双高斯差模型用于角点检测研究[J]. *计算机工程与应用*, 2003(11): 87-99
- [6] Rosten E, Porter R, Drummond T. Faster and better, a machine learning approach to corner detection[J]. *IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intell.*, 2010, 32(1): 105-119
- [7] Dias P G T, Kassim A A, Srinivasan V. A neural network based corner detection method[C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN '95)*. IEEE, 1995: 2116-2120
- [8] Sun Wei, Yang Xuan. Image corner detection using topology learning[J]. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2010, 17(6): 101-105
- [9] Prudent Y, Ennaji A. An Incremental Growing Neural Gas Learns Topologies[C]// *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*. 2005(2): 1211-1216
- [10] Goodfellow I, Le Q, Saxe A, et al. Measuring invariances in deep networks[J]. *Neural Information Processing Systems*, 2009, 22: 646-654
- [11] Wagner R, Thom M, Schweiger R, et al. Learning Convolutional Neural Networks From Few Samples[C]// *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Dallas, Texas, USA, 2013: 1-7
- [12] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. *Neurocomputing; Foundations of Research*, 1988, 323(6088): 696-699
- [13] Olshausen B A, Field D J. Sparse coding of sensory inputs[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2004, 14(4): 481-487
- [14] Mairal J, Bach F, Ponce J, et al. Supervised dictionary learning [C]// *Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. 2009: 1033-1040
- [15] Schmid C, Mohr R, Bauckhage C. Evaluation of interest point detectors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 37(2): 151-172
- [16] Zanchettin C, Ludermir Teresa B, Almeida Leandro M. Hybrid Training Method for MLP: Optimization of Architecture and Training[J]. *IEEE Transactions on Systems Man And Cybernetics Part B-Cybernetics*, 2011, 41(4): 1097-1109
- [17] Sun Jian-ye. Learning algorithm and hidden node selection scheme for local coupled feedforward neural network classifier [J]. *Neurocomputing*, 2012, 79(3): 158-163