

# 无需设定阈值的图像边缘检测

洪留荣\*

(商丘师范学院 计算机与信息技术学院, 河南 商丘 476000)

(\*通信作者电子邮箱 sqhongliurong@126.com)

**摘要:**针对提取图像边缘经常需要设定阈值,而对于光照不均的图像又难以设定合适阈值的问题提出了一种新的边缘检测方法。该方法首先根据对数把图像分解为高频与低频信息,并把对数图像减去其经最大值滤波后的图像提取高频信息,然后根据认知心理学上的 Stevens 定理,把高频信息转换为心理量。经非最小值抑制细化边缘后,应用 Pillar K-means 算法提取图像边缘。该方法不需要设定阈值,且对光照不均的图像边缘提取有较好的效果。实验结果证明了该方法的有效性,也表明把图像亮度转换为心理量可以较好地统一不同亮度下的边缘取值。

**关键词:**边缘检测;Stevens 定理;非最小值抑制;Pillar K-means 算法;最大值滤波

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

## Image edge detection without threshold

HONG Liurong\*

(School of Computer and Information Technology, Shangqiu Normal University, Shangqiu Henan 476000, China)

**Abstract:** Concerning the thresholds often being needed in the image edge detection and it is difficult to set good threshold values for the variant illumination image, a new edge detection method was proposed to solve these problems. Firstly, according to the logarithm, an image was decomposed into high frequency and low frequency, and the high frequency image was extracted by the logarithmic image minus the image by the maximum value filter. Then based on the Stevens theorem from cognitive psychology, the high frequency information was transformed into visual psychological quantity. After the edges were thinned by non-minimum suppression, they were extracted by Pillar K-means algorithm. The proposed method has good effect on the variant illumination image and does not need to set threshold value. The experimental results prove the effectiveness of the proposed method, and also show that the edge value in variant intensity may be agreed by converting the intensity to the psychological value.

**Key words:** edge detection; Stevens theorem; non-minimum suppression; Pillar K-means algorithm; maximum value filtering

## 0 引言

边缘检测是图像抽取特征的重要技术之一,它包含了物体的重要信息,在物体识别、跟踪和图像搜索等方面起着重要的作用。边缘检测的好坏直接影响到图像理解、分析的效果,是图像预处理的重要基础技术。

边缘是一组局部灰度变化显著的点,从频率域的角度来讲,高频分量较多地处于边缘处。传统的边缘检测通常是用梯度值来判定边缘点,如 Roberts 算子<sup>[1]</sup>、Sobel 算子<sup>[1-2]</sup>、Prewitt 算子<sup>[1]</sup>、Canny 算子<sup>[3-5]</sup>以及 LoG 算子<sup>[6]</sup>等。到目前为止,研究人员还提出了许多边缘检测算法<sup>[7-10]</sup>,但总结这些研究,一般存在两个方面的问题:一是需要应用人员设定阈值,二是对于照度不均的图像设置合适的阈值比较困难。本文提出的边缘检测方法主要针对这两个方面的问题。

受认知心理学的启发<sup>[11-12]</sup>,物理量与心理量之间存在一定的关系,其中 Stevens 提出的 Stevens 定理(也称为幂定理)是心理学界公认的接近于人视觉感知的一个定理。这一定理把物理量有效地转变为以人的认知为基础的心理量,应用该定理把图像亮度这一物理量转化为心理量后对图像进行处理,可以更接近于人的视觉感知,利于检测光照不均图像的边缘。

本文经过预处理、对数分解后,把图像进行最大值滤波并提取图像高频信息,再应用 Stevens 定理把高频信息用亮度心理量表示,经过边缘细化后应用修改的 K-means 算法提取边缘。整个过程不应用阈值,得到了较好的效果。

## 1 Stevens 定理

1957 年 Stevens 根据他多年的研究结果,提出了刺激强度和心里量之间关系的幂定理<sup>[13]</sup>:

$$S = b * I^a \quad (1)$$

其中:  $S$  为心理量;  $I$  为刺激强度,即物理量;  $b$  是一个大于 0 的常数;  $a$  是由感觉道与刺激强度决定的指数。

1961 年 Stevens 又给出了不同感觉通道的幂指数数据<sup>[14]</sup>,其中在亮度通道上,  $a = 0.34$ 。

## 2 本文提出的边缘检测方法

本文提出的边缘检测方法由五部分组成:预处理、图像分解、获取高频信息、获取高频心理量和对心理量进行分类获取边缘。预处理步骤中,根据对称最近邻(Systematic Nearest Neighbour, SNN)<sup>[15]</sup>滤波对原图像进行处理;然后获取图像的自然对数图像;再应用最大值滤波获取高频信息;接着利用

Stevens 定理获得高频心理量;最后根据心理量梯度值进行非最小值抑制,以细化边缘,应用简化的 Pillar K-means 算法对高频信息进行分类,提取边缘。图 1 为所本文方法的流程。

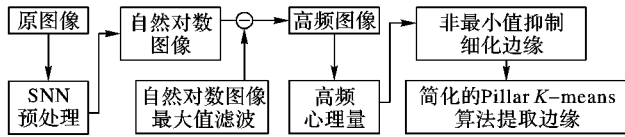


图 1 本文提出方法的流程

### 2.1 预处理

因为图像噪声会影响边缘提取效果,在提取边缘之前要对噪声进行处理,平滑图像虽然可以去除噪声,但同时也弱化了边缘。最好的办法是在保护边缘的同时去除噪声,对称最近邻滤波是这类方法中最优秀的。该方法利用像素邻域的空间信息和灰度值来决定像素的值,在一个  $3 \times 3$  的邻域中,以中心像素对称有 4 对像素,在每对像素中选择与中心像素灰度值最接近的像素,得到 4 个像素值,用这个值的平均值作为中心像素的新值。

### 2.2 自然对数图像及高频图像

根据物体在传感器中的成像关系<sup>[16]</sup>,当一个物体的表面为 Lambertian 表面时,物体图像在某种照度下点  $(x,y)$  处的亮度  $I(x,y)$  可以表示为反射系数  $R(x,y)$  与照度  $L(x,y)$  的乘积。即

$$I(x,y) = R(x,y) * L(x,y) \quad (2)$$

照射分量的频谱落在空间低频区域,反射分量的频谱落在空间高频区域。生理学上的证据表明,皮质层细胞对于亮度的反映大致可用对数函数<sup>[17]</sup>表示,即有式(3)成立:

$$I'(x,y) = \log(I(x,y)) = \log(R(x,y)) + \log(L(x,y)) = R'(x,y) + L'(x,y) \quad (3)$$

$R'(x,y)$  和  $L'(x,y)$  分别是  $(x,y)$  反射系数与照度的对数,以下叙述时省去  $(x,y)$ 。

从频率域的角度来看,边缘含有高频分量,从式(3)中的含义来看,  $R'$  中含有边缘的重要信息,可以作为提取图像边缘的数据。

得到图像的高频部分有两种方法:第一种方法是直接用高通滤波替代  $R'$ ;第二种方法是用原图像减去其经过低通滤波的图像,获取图像高频信息,如式(4)所示。

$$R' = I' - L' \quad (4)$$

### 2.3 应用最大值滤波获取高频信息

作为用于边缘检测的低通滤波不仅是一个好的低通滤波器,而且对边缘具有较好的保护作用,实验结果参见文献[18]。该文献中比较了 17 种高通和 31 种低通线性和非线性二维滤波器的效果,结果表明,应用低通滤波效果较好;而且与其他低通滤波器相比,最大值滤波能较好地满足边缘提取时的两个条件。不仅如此,我们认为在图像上应用最大滤波器所得结果也与人的视觉效果相似,而且只需根据像素邻域值计算最大值,不需要像高斯滤波那样给定阈值。因此本文应用  $I'$  经最大值滤波后的结果作为式(4)中的  $L'$ 。

根据心理学理论,图像的物理量转换成心理量更符合人对物体的认知<sup>[13]</sup>。由式(1),对两边取对数有:

$$S' = \log(S) = \log(b) + a \log(I) \quad (5)$$

则根据式(3)和(4)有:

$$S' = \log(b) + a(R' + L') \quad (6)$$

图像边缘部分包含着绝大部分的高频信息,在式(6)中去掉低频信息,则式(6)可以转化为

$$S'' = \log(b) + a * R' \quad (7)$$

根据式(4)有:

$$S''(x,y) = \log(b) + a(I' - L') \quad (8)$$

这里  $S''$  为  $S'$  中含高频信息的对数值。因此,由式(9)很容易得到心理量中含有高频信息的心理量  $HS$ :

$$HS = b * \exp(a * (I' - L')) \quad (9)$$

图 2 为一个实例结果。

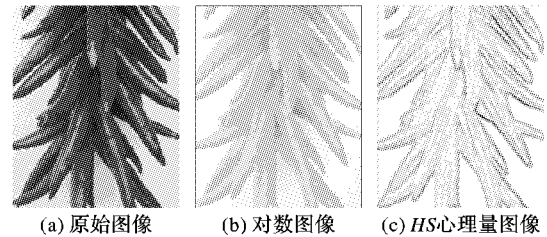


图 2 经过式(2)~(9)处理的实例图像

### 2.4 提取边缘

#### 2.4.1 非最小值抑制

通过对数图像减去其图像最大值滤波图像得到的  $I' - L'$  均为负值,所以如果频率越大,式(9)中的  $HS$  值越小,这部分表示的越有可能是边缘。由于图像边缘邻域处的特征,  $HS$  小的点可能形成一条比较宽的高频带,这类似于 Canny 算法中梯度幅度值较大的带,依照其处理高幅度值带的非最大值抑制方法,本文根据  $HS$  图像的梯度,采用非最小值抑制处理  $HS$  值形成的带,以细化边缘。如果一个像素的  $HS$  值均大于它延梯度方向上两个邻域点的  $HS$  值时,则将它赋成  $HS$  图像上的最大值  $Max_{HS}$ ; 否则其值不变。即

$$HS'(x,y) = \begin{cases} Max_{HS}, & HS(x,y) > HS(x_{NN},y_{NN}) \\ HS(x,y), & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中  $(x_{NN},y_{NN})$  为  $(x,y)$  延梯度方向上的两个邻域点。

对于图 2(a) 中的图像经过非最小抑制后的结果如图 3 所示。

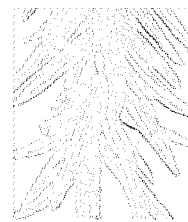


图 3 图 2 图像经非最小值抑制后的结果

#### 2.4.2 提取真实边缘

通过 2.4.1 节的非最小值抑制,对边缘进行了细化,这些边缘明显地包含很多虚假边缘,应加以去除。而且实验发现,经过这一过程的处理,图像的  $HS'$  值明显变得集中。图 4 为一个实例(图中把  $HS'$  值映射到  $[0,1]$  区间)。

经过非最小值抑制后的图像应用心理量表示,应用聚类算法可提取边缘。因为  $K$ -means 算法简单、快速,对于类对象越集中的情况分类效果越好,且不用设定阈值。其时间复杂性为  $O(nkt)$ ,其中:  $n$  为待分类的对象个数,  $k$  为聚类数,  $t$  为迭代次数,所以聚类数目越小,效率越高,很多文献把它用于图像分割<sup>[19]</sup>。基于这些优点,本文应用  $K$ -means 算法对经非最小值抑制后的  $HS'$  值进行分类以获取图像边缘,其相似性测

度为  $HS'$  值之间欧拉距离。

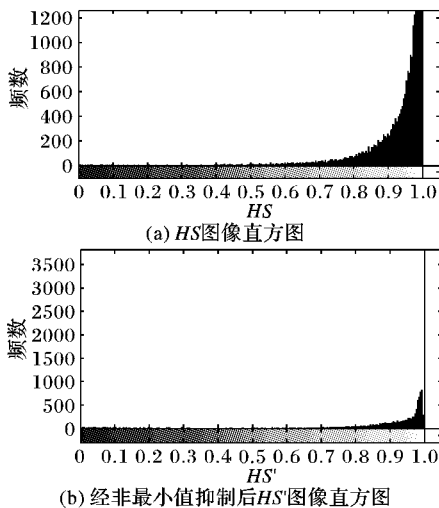


图4 经非最小值抑制的直方图变化情况

本文把  $HS'$  值分为三类  $C(i)$  ( $i = 1, 2, 3$ ), 设  $C(1) < C(2) < C(3)$ , 聚类中心分别为  $c_1, c_2, c_3$ 。 $C(1)$  所在类的像素作为真实边缘, 像素值设置为 1。 $C(3)$  所在类像素为虚假边缘, 像素值设置为 0。 $C(2)$  所在类的像素分为两个部分, 其值低于该类中心值的像素作为真实边缘, 其值设置为 1; 高于该类中心值的像素作为边缘断点处的连接, 以连接断边缘, 它的作用相当于 Canny 算法中用小阈值获取边缘点以用于对高阈值边缘的补充连接。之所以这样划分, 是因为在实验过程中发现, 如果直接分成两类即边缘类  $C$  和非边缘类  $\bar{C}$ , 一些正常边缘被归类为非边缘, 考虑到正常边缘的值比非边缘像素值低, 所以增加一个分类。这样  $C(2)$  就分别包含了  $C$  中  $HS'$  值较高的部分像素以及  $\bar{C}$  中  $HS'$  值较低的一部分像素。其中  $C$  中  $HS'$  值较低的一部分像素有一部分为边缘像素, 另一部分为非边缘像素。这样本文把  $C(2)$  中小于聚类中心  $HS'$  值的像素确定为边缘像素, 把高于聚类中心  $HS'$  值的像素用于边缘的补充连接, 这一方面可以剔除非边缘像素, 另一方面使提取的边缘更加平滑。

$K$ -means 算法虽然有优点, 但有一个明显的不足就是初始聚类中心的设置问题, 初始聚类中心的设置会影响分类结果, 针对这一问题研究者提出了诸多改进方法<sup>[20]</sup>, 本文经过分析结合参考文献[20]的结果认为 Pillar  $K$ -means 是适宜的。该算法依据建筑物压力分布情况来确定支柱的位置原理来确定初始聚类中心, 认为支柱的分布彼此之间尽可能远。但该方法有一点不足就是计算量较大, 考虑到本文处理问题的特殊性就是一个像素点只一个  $HS$  值作为特征值, 所以, 直接应用  $HS'$  图像中最大值、最小值以及两者的平均值作为初始的三个聚类中心值。

具体算法描述如下:

步骤 1  $c_1 \leftarrow \min(HS'), c_3 \leftarrow \max(HS'), c_2 = (c_1 + c_3)/2$ 。

步骤 2 应用  $K$ -means 算法聚类, 得到  $C(1)$ 、 $C(2)$ 、 $C(3)$  以及  $c_1, c_2, c_3$ 。

步骤 3 对于点  $x$ :

1) 如果  $x \in C(1)$  或者  $x \in C(2)$  且  $HS'(x) < c_2$ , 则  $HS'(x) \leftarrow 1$ ;

2) 如果  $x \in C(3)$ , 则  $HS'(x) \leftarrow 0$ ;

3) 如果  $x \in C(2)$  且  $HS'(x) \geq c_2$ , 则  $HS'(x) \leftarrow 0.5$ 。

步骤 4 在图像中把  $HS'(x) = 1$  的点链接成轮廓, 当到

达轮廓的端点时, 在断点的 8 邻域点中寻找满足  $HS'(x) = 0.5$  点, 以使图像边缘平滑。

图 2 中的原始图像经上述算法后得到的最终边缘结果如图 5 所示。



图5 图2经分类后的边缘结果

值得注意的是, 式(9)中的  $b$  值大于 0 且与  $HS$  成正比, 因此, 如果把  $b$  乘上一个正系数  $a$ , 经过式(10)的变换之后,  $HS'$  中每一个点的值也相应地乘以  $a$ , 对于  $K$ -means 算法的目标函数  $f = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in C_i} (x_j - \mu_i)^2$ , 如果每一个点值均乘以一个系数  $a$ , 则目标函数值为原来值的  $a^2$ , 因此, 不影响分类效果。换句话说,  $b$  可在正数范围内取值。

### 3 实验结果及分析

为测试本文方法的效果, 进行了以下实验。

实验 1 针对光照不均的情况进行实验, 并与经典算法 Canny 进行对比。图 6~8 分别为 Yale B 扩展库的人脸图像以及轮胎图像的边缘检测结果对比(括号内为高低阈值)。

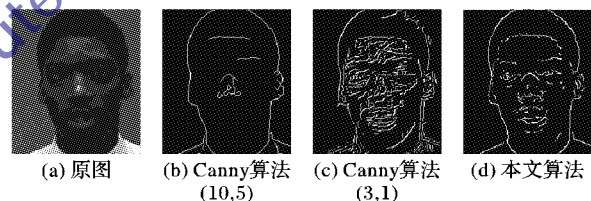


图6 Yale B 扩展库的人脸图像 1 的边缘检测结果对比

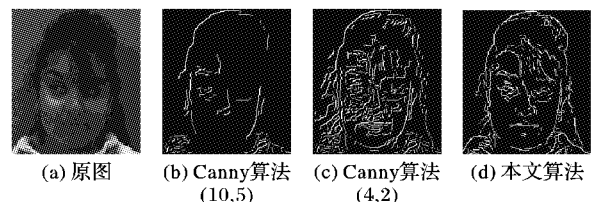


图7 Yale B 扩展库的人脸图像 2 的边缘检测结果对比

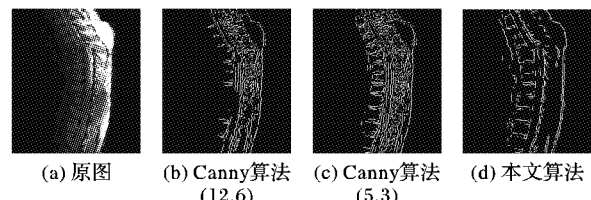


图8 轮胎图像的边缘检测结果对比

从图 6~8 可以看, 由于 Canny 算法的效果完全依赖于设定的阈值, 但阈值设定又没有指导性理论, 所以在实际操作中难以做到最优; 而本文算法不需要设定阈值, 且效果较好。

实验 2

为了验证 Stevens 定理对于边缘提取的作用, 本文仅应用从原始图像减去原始图像的最大值滤波提取高频信息, 通过非最小值抑制以及 Pillar  $K$ -means 分类提取边缘, 得到图 6~8 中图(a)的边缘, 结果如图 9 所示。





图 9 不应用 Stevens 心理量时提取边缘的效果

从这个实验结果中可以看出,不应用 Stevens 定理而直接提取高频信息并进行分类提取边缘的结果丢失了原始图像中暗区域的边缘,而对于明区域边缘较多,有一些明显为虚假边缘。主要原因是暗区域的边缘部分亮度相差较小,而亮区域边缘处亮度相差较大,为提取暗区域边缘不得不设置较小的阈值,但小阈值在亮区域中会纳入虚假边缘。因为应用的是原图像减去其最大值滤波的图像,则暗区域中边缘处的差值较小,边缘高频信息被认为频率较低,因此应用 Pillar  $K$ -means 分类时,暗区域的这些差值很容易被分类为非边缘,从而使暗区域的边缘容易丢失。而 Stevens 定理把明暗区域以心理量统一到人的视觉模式加以处理,能有效处理明暗区域的边缘。

实验 3 为验证本方法对同一对象在不同光照条件下的边缘检测效果,利用数码相机拍摄了多处不同光照条件下的同一场景(图片大小为  $2256 \times 1456$ ),利用本方法进行了实验(实验时图片缩小为原来的  $1/10$ ),并与 Canny 算法作对比。因篇幅所限,本文只给出一处对象的实验结果,如图 10 所示(括号内为高低阈值)。

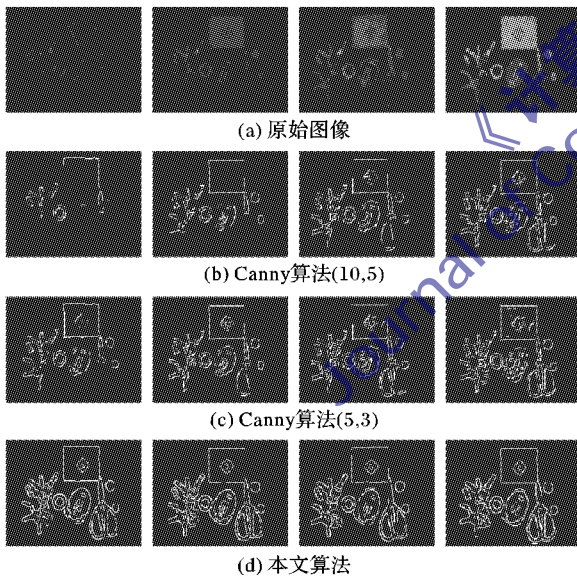


图 10 同一对象在不同光照下边缘检测对比

从图 10 的实验可以看出, Canny 算法检测到边缘随着光照增加而增多,而本文方法在不同光照条件下结果基本一致,且边缘较清晰。这也更进一步说明了把亮度这一物理量转化为心理量可以统一区分边缘的值。

#### 4 结语

本文应用物体在传感器中的成像关系,利用对数和最大值滤波提取图像的高频信息,并利用 Stevens 定理把图像的这些高频信息转换为心理量,经过非最小值抑制和 Pillar  $K$ -means 算法提取边缘。这一方法不需要设定阈值,且能较好地提取光照不均图像的边缘,实验结果也表明 Stevens 定理可以较好地仿真人类视觉感知,从而较好地避免了图像高亮度

区和低亮度区的边缘在亮度跃升幅度上的差异。

#### 参考文献:

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 2008: 703 - 728.
- [2] SHIH F Y. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010: 53 - 58.
- [3] JOHN C. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679 - 698.
- [4] ZHANG Y, ROCKETT P I. The Bayesian operating point of the Canny edge detector [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3409 - 3416.
- [5] MCILHAGGA W. The Canny edge detector revisited [J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 91(3): 251 - 261.
- [6] TORRE V, POGGIO T A. On edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(2): 147 - 163.
- [7] GAO J, LIU N. An improved adaptive threshold Canny edge detection algorithm [C]// ICCSEE 2012: Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. Nanning, China: Institute of Physics. Piscataway: IEEE, 2012: 164 - 168.
- [8] LAKSHMI S, ANKA EANA EYANAN V S. A study of edge detection techniques for segmentation computing approaches [J]. Computer Aided Soft Computing Techniques for Imaging and Biomedical Applications, 2010, 21(4): 35 - 41.
- [9] THAKARE P. A study of image segmentation and edge detection techniques [J]. International Journal on Computer Science and Engineering, 2011, 3(2): 899 - 904.
- [10] SHARIFI M, FATHY M, TAYEFEH MAHMOUDI M. A classified and comparative study of edge detection algorithms [C]// ITCC'02: Proceedings of the 2002 International Conference on Information Technology: Coding and Computing. Piscataway: IEEE, 2002: 117 - 120.
- [11] JAIN K. Fundamentals of digital image processing [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1989: 51.
- [12] CHEN J, HE C. WLD: a robust local image descriptor [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(9): 1705 - 1719.
- [13] STEVENS S S. On the psychophysical law [J]. Physical Review, 1957, 64(8): 153 - 181.
- [14] STEVENS S S. The psychophysics of sensory function [M]// Sensory Communication. Cambridge: MIT Press, 1961: 1 - 32.
- [15] SURI P R. Image segmentation with modified  $K$ -means clustering method [J]. International Journal of Recent Technology and Engineering, 2012, 1(2): 176 - 180.
- [16] HORN B K P. Robot vision [M]. Cambridge: MIT Press, 1986: 112 - 115.
- [17] ADINI Y, MOSES Y, ULLMAN S. Face recognition: the problem of compensating for changes in illumination direction [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(4): 721 - 732.
- [18] NABATCHIAN A. Human face recognition [D]. Ontario: University of Windsor, 2011.
- [19] SIDDQUI F U, MAT ISA N A. Optimized  $K$ -means (OKM) clustering algorithm for image segmentation [J]. Opto-Electronics Review, 2012, 20(3): 216 - 225.
- [20] BARAKBAH A R, KIYOKI Y. A pillar algorithm for  $K$ -means optimization by distance maximization for initial centroid designation [C]// CIDM '09: Proceedings of the 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining. Piscataway: IEEE, 2009: 61 - 68.