

# 基于遗传优化谱聚类的图形分割方法

覃晓<sup>1</sup> 梁伟<sup>1,2</sup> 元昌安<sup>1</sup> 唐涛<sup>1</sup>

(广西师范学院计算机与信息工程学院 南宁 530023)<sup>1</sup> (广西崇左市江州区科技情报所 南宁 532202)<sup>2</sup>

**摘要** 传统的谱聚类方法使用 k-means 达到最后的聚类目的。k-means 对初始条件敏感,易陷入局部最优,从而导致传统的谱聚类方法应用到图像分割时效果不太理想。将遗传算法用于优化谱方法的聚类阶段,提出一种以遗传算法优化谱聚类的图像分割方法(Image Segmentation Algorithm of Spectral Clustering Optimization Based on Genetic, ISCOG)。在合成图像与真实图像上的实验表明 ISCOG 算法极大地提高了谱聚类算法的稳定性和聚类质量,证明了 ISCOG 算法的优越性。

**关键词** 图像分割,遗传算法,谱聚类,优化

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.01.019

## Image Segmentation Algorithm of Spectral Clustering Optimized by Genetic

QIN Xiao<sup>1</sup> LIANG Wei<sup>1,2</sup> YUAN Chang-an<sup>1</sup> TANG Tao<sup>1</sup>

(College of Computer and Information Engineering, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530023, China)<sup>1</sup>

(The Institute of Science and Technology Information of Guangxi Jiangzhou District of Chongzuo City, Nanning 532202, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The traditional spectral clustering methods use k-means to achieve the final clustering. But k-means is sensitive to initial conditions and easily plunges into local optimum, which influence the effect of image segmentation with spectral clustering method. This paper proposed an image segmentation algorithm of spectral clustering optimized by genetic algorithm (ISCOG), using the GA instead of k-means in spectral clustering algorithm. The experiments on synthetic images and real images show that ISCOG algorithm greatly improves the stability and clustering quality of the spectral clustering algorithm.

**Keywords** Image segmentation, Genetic algorithm, Spectral clustering, Optimization

## 1 引言

图像分割旨在发现数据集中自然聚集在一起的组成部分,其本质上是一个聚类问题(Forsyth and Ponce, 2002)。由于谱聚类算法能够将数据集从高维空间映射到低维空间进行处理,同时具有对数据集的分布形状不敏感、善于捕获非凸几何形状等优点,因此谱方法近年来逐渐受到研究人员的关注,并成功应用于图像分割<sup>[1-3]</sup>、模式识别<sup>[4,5]</sup>、大数据处理<sup>[6,7]</sup>等领域。

NJW(Ng-Jordan-Weiss)是谱聚类中的经典算法<sup>[8]</sup>。该算法首先利用原始数据点的相似关系构造拉普拉斯矩阵  $L$ 。通过计算  $L$  的特征值,并以前  $k$  个最大值对应的特征向量构造特征空间,最后通常使用  $k$  均值算法在特征空间中进行聚类。然而由于  $k$  均值算法对初始化敏感、易收敛于局部最优等缺陷,使得将该传统方法应用到图像分割时效果不太理想。

本文将遗传算法(GA)引入谱聚类方法中,提出基于遗传算法优化谱聚类的图像分割方法(Image Segmentation Algorithm of Spectral Clustering Optimization based on Genetic, ISCOG)。在谱聚类方法的最后阶段,以遗传算法取代  $k$  均值算法对  $k$  个特征向量进行聚类,以提高谱聚类的图像分割质量。在合成数据和实际数据上的分割效果证明了 ISCOG 算法的有效性。

## 2 基于谱聚类的图像分割

使用谱聚类方法分割图像时通常把图像建模为一个加权图,得到一个相似矩阵。在加权图中,每一个像素是一个节点,每一个像素对之间通过边连接。而图的划分(这里是图像分割)依赖于图的拉普拉斯矩阵的特征分解。

### 2.1 构造相似矩阵

谱聚类方法将图像中的每个像素点看作是无向图的顶点集合,像素点之间的相似性作为无向图的边。通过边上的权值构造相似性矩阵  $W$ 。像素点之间的相似性通常采用高斯核函数来度量,如式(1)所示:

$$W_{ij} = \begin{cases} \exp(-\|s_i - s_j\|^2 / 2\sigma^2), & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $s_i$  和  $s_j$  分别表示图像中两个像素点  $i, j$  的特征向量。 $\|\cdot\|$  代表 Euclidean 范式,  $\sigma$  是高斯核参数,  $\sigma$  取值的不同对图像的分割效果会有明显影响。

### 2.2 构造图像的 Laplace 矩阵

常见的 Laplace 矩阵构造方法大致分为 3 种:1)构造无向图的非规范化 Laplace 矩阵  $L$ ;2)构造规范化 Laplace 矩阵  $L_m, L_m$  的构造与随机游走理论关系密切;3)构造规范化 Laplace 矩阵  $L_{sym}$ 。本文采用第三种方法构造 Laplace 矩阵,其构造公式如下:

到稿日期:2015-09-01 返修日期:2015-11-19 本文受国家自然科学基金(61363037),广西自然科学基金(2016GXNSFAA380209)资助。

覃晓(1973-),女,硕士,副教授,主要研究方向为计算机图像处理,E-mail:7670172@qq.com;梁伟(1976-),男,硕士生,主要研究方向为计算机图像处理;元昌安(1964-),男,博士,教授,主要研究方向为计算机图像处理,E-mail:yca@gxnc.edu.cn(通信作者);唐涛(1979-),男,硕士生,主要研究方向为计算机图像处理。

$$L_{sym} = D^{-\frac{1}{2}} W D^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中,  $W$  为图像的相似矩阵,  $D$  为无向图的度矩阵,  $D^{-\frac{1}{2}}$  为度矩阵中的每个元素开平方根后的结果。可见,  $L_{sym}$  是一个对称矩阵。

对于一个具有  $n$  个像素点的图像而言, 利用其相似矩阵  $W$  构造出相应的 Laplace 矩阵后, 利用谱聚类方法计算  $L_{sym}$  的特征值, 并将前  $k$  个最大特征值对应的特征向量组成一个  $n$  行  $k$  列的特征矩阵  $U_{n \times k}$ , 最后对矩阵  $U$  的每一行数据进行聚类操作。

NJW 算法在最后的聚类阶段采用 k-means 算法。众所周知, k-means 具有对初始种子点敏感的缺陷, 难以保证得到最优的聚类结果。为弥补以上不足, 本文将遗传算法 (GA) 引入 NJW 算法中, 利用 GA 对全局最优的搜索不依赖于初始条件的优秀特质, 克服基于 k-means 聚类的 NJW 算法的缺点。

### 3 遗传优化谱聚类图像分割算法

ISCOG 算法的主要思想是: 在利用谱方法将数据集从相似矩阵  $W$  映射到特征矩阵  $u$  后, 将传统的 k 均值算法取代并用遗传算法对  $k$  个特征向量进行聚类。为此, 需要对遗传算法种群初始化、适应度函数、遗传操作等重要步骤进行设计。

#### 3.1 初始化种群

首先定义本文所用遗传算法的基因、染色体等概念。

**定义 1 (ISCOG 的基因  $g$ )** 设像素点  $p_{i,j}$  是待分割的图像  $I_{M \times N}$  中的一个聚类中心 ( $i \times j \leq M \times N$ ), 则定义对应的 ISCOG 的基因为  $g = \{(s_1 s_2 \dots s_t) \mid s_i \in N_{16} \text{ 且 } t = 2 \log_{16}(\max(M, N))\}$ , 其中,  $N_{16}$  表示 16 进制数,  $t$  为基因编码的长度。

例如: 对于图像  $I_{1024 \times 1024}$ , 若像素  $p_{680, 840}$  是  $I$  的一个聚类中心点, 则  $p$  对应的 ISCOG 基因长度为 6, 编码为 08B740。

**定义 2 (ISCOG 的染色体  $M$ )** ISCOG 的染色体  $M$  为一个二元组  $(G, L)$ , 其中  $L$  为染色体长度,  $G$  为  $L$  个基因构成的基因串。

由于本文遗传算法的基因为图像的像素点坐标, 因此不宜采用传统的随机生成染色体初始化种群的方法。本文采用基于像素密度的种群初始化方法 (The Population Initialization Algorithm Based on Pixel Density, PIPD)。

#### 算法 1 PIPD

输入: 图像,  $\Delta t, k, L // \Delta t$  为选取个体的灰度值间隔参数,  $k$  为种群大小;  $L$  为染色体长度  
输出: ISCOG 的初始种群  $P$   
begin

```

I' = gray(I); // 求图像 G 的灰度矩阵
M = max(I'(:)); // M 为 G 的最大灰度值
for i = 0 to M do // 统计灰度值为 i 的像素个数
while(j ≤ M) do // 求在间隔 Δt 中, 灰度 i 的最大像素密度
{for i = j to j + Δt do
a_i = max(n_i);
j = j + Δt;}
for j = 1 to k do
{依次选取 {a_1, a_2, ..., a_n} 中前 L 个最大值对应像素点的坐标, 构成一个染色体 g_j;
// 规定当 i ≠ j 时, 选取不同的像素点坐标
P[j] = g_j;
};
end // PIPD

```

#### 3.2 适应度函数

对于每一个染色体  $G$ , 其内含的每一个基因片是一个假

定的聚类中心。聚类的目标是将图像中相似的像素划分到某一聚类中心对应的簇中。本文采用像素点间的距离作为像素相似度量, 如式 (3) 所示:

$$sim(p_i, p_j) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_k - y_k)^2} \quad (3)$$

其中,  $(x_1, x_2, \dots, x_k), (y_1, y_2, \dots, y_k)$  分别是像素点  $p_i, p_j$  的特征向量, 值越小, 越相似。显然, 图像中像素点与  $G$  中各个基因越相似, 聚类效果越好。由此得到适应度函数的定义。

**定义 3 (ISCOG 的适应度函数)** ISCOG 的适应度函数  $f$  定义为:

$$f = \frac{1}{s} \quad (4)$$

其中,  $s = \sum_{i=1}^L \sum_{p \in I_{M \times N}} sim(p, g_i)$

#### 3.3 遗传算子

ISCOG 的遗传算子包括选择、复制、交叉和变异算子, 其过程与传统遗传算法的遗传算子一致。

至此, 介绍了 ISCOG 算法的全部过程, 以下给出 ISCOG 的算法描述。

#### 算法 2 ISCOG

输入: 原始图像  $I$

输出: 分割结果

begin

```

step1 利用式 (1) 构造 I 的相似矩阵 W;
step2 利用式 (2) 求出 I 的 Laplace 矩阵 L_sym;
step3 计算 L_sym 的特征值, 取前 k 个最大特征值对应的特征向量组成一个 n 行 k 列的特征矩阵 U_{n \times k}, 将 U_{n \times k} 中的每一行看作一个数据点, 进行遗传算法聚类;
step4 调用 PIPD 算法进行种群初始化;
step5 根据式 (4) 计算染色体适应度值;
step6 调用遗传算子对种群进行选择、复制、交叉、变异操作, 得到新一代种群;
step7 重复执行 step5 - step7, 直到最优染色体适应度值不再变化或到达最大迭代次数时为止;
step8 根据最优染色体对图像进行分割, 输出分割结果。
end

```

### 4 实验分析

利用合成图像、真实图像对 NJW 和本文提出的 ISCOG 算法做了两组对比实验。实验硬件环境为 Win7 操作系统, 酷睿 Q9500 CPU, 4GB 内存; 编译环境为 matlab 2012a。

#### 4.1 合成图像分割实验

人工制作一张分为 3 个区域的合成图像 (见图 1), 分别使用 NJW 算法和 ISCOG 算法对图 1 进行分割。图 2 是分别将两种算法连续进行 8 次实验的效果图。其中, 图 2(a1) - 图 2(a8) 为 NJW 算法的实验结果, 图 2(b1) - 图 2(b8) 为 ISCOG 算法的实验结果。图 2 对比结果显示, 在 NJW 分割效果中, 图 2(a3) - 图 2(a5) 和图 2(a8) 没有得到正确的分割结果, 实验成功率为 50%, 而 ISCOG 算法在 8 次实验中均能正确识别出图像的 3 个区域, 成功率为 100%。实验效果证明, ISCOG 算法比 NJW 算法具有更好的鲁棒性。

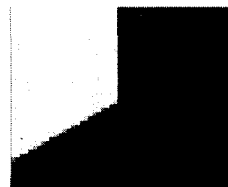


图 1

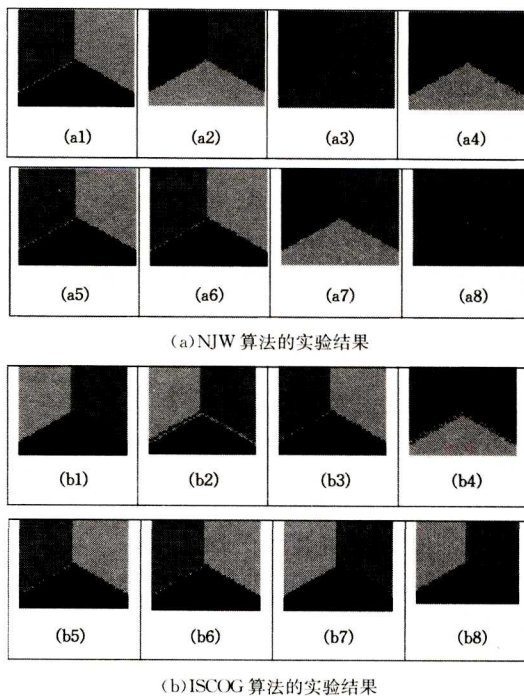


图2 两种算法的实验结果对比图

#### 4.2 真实图像分割实验

本实验旨在测试两种算法在真实图像(见图3)上不同的聚类簇数下得到的实验结果。分别取聚类簇数  $k=3, 4, 5$ , 两种算法的实验分割效果如图4所示。



图3



图4 不同聚类数条件下两种算法的分割效果图

图4从直观上反映了两种算法在不同聚类数条件下的分割效果,其中NJW算法在  $k=3$  时效果最好,当聚类数逐渐增大时,其分割性能逐渐下降, $k=5$  时其效果最差。而ISCOG则表现出良好的稳定性,随着聚类数目的增加,其分割效果越来越好。

为度量本组实验中两种算法的性能,定义信息误差率作为评价指标。

**定义3(信息误差率)** 信息误差率  $E$  为数据集  $D$  聚类到数据集  $D'$  后其信息变化量与原数据集  $D$  的总信息量之比。

$$E = \frac{\|I(D') - I(D)\|}{I(D)} \times 100\% = \frac{\sum_{d' \in D', d \in D} \|I(d') - I(d)\|}{\sum_{d \in D} I(d)} \times 100\% \quad (5)$$

其中,  $I(x)$  表示数据  $x$  的信息量,  $\|\cdot\|$  表示欧几里得距离,  $d$  为数据集  $D$  中的元素。  $E$  值越小,表示图像分割质量越好。

本文以图像像素的灰度值作为信息量计算  $E$ 。表1列出了本组实验的结果。

表1 不同聚类要求下两种算法的信息误差率(%)

E \ K	K		
	k=3	k=4	k=5
NJW	45.77	40.45	61.23
ISCOG	43.34	33.56	32.47

表1的数据表明,对图像进行分割是对图像的一种有信息损失的处理,当聚类数比较少时,信息量损失较大。当  $k=3$  时,两种算法的信息误差率相差不是很大,这是因为分割后所能得到的原图的细节部分不多,两种算法表现比较一致。但随着聚类数的增多,ISCOG算法的分割结果能表现出原图中越来越多的细节,其信息误差率也越来越小;而NJW表现得就差强人意,特别是当  $k=5$  时,其信息误差率超过50%,其中很大的原因在于  $k$ -means 的初始种子点的选择不够理想。实验数据进一步表明,ISCOG算法不论是在鲁棒性还是在图像分割的质量上都优于NJW算法。

**结束语** 本文利用遗传算法的聚类效果对初始条件不敏感的性能,将遗传算法引入谱聚类方法中,提出了基于遗传优化的谱聚类方法(ISCOG)。通过用谱方法中聚类阶段的  $k$ -means 算法取代遗传算法,改善了谱方法的稳定性和聚类质量。将ISCOG算法用于图像分割实验中,并与经典谱聚类算法NJW进行比较,结果显示,ISCOG算法不论是在鲁棒性还是在图像分割的质量上都较NJW算法有很大提升。下一步,将在特征空间、特征值的计算上进一步对谱聚类算法进行优化,以提高谱聚类算法的时间效率。

#### 参考文献

- [1] LIU H Q, JIAO L C, ZHAO F. Non-local spatial spectral clustering for image segmentation[J]. Neurocomputing, 2010, 74(1-3):461-471.
- [2] ZHANG Xiang-rong, QIAN Xiao-xue, JIAO Li-cheng. Immune Spectral Clustering Algorithm for Image Segmentation[J]. Journal of Software, 2010, 21(9):2196-2205.
- [3] ZHOU Lin, PING Xi-jian, XU Sen, et al. Cluster Ensemble Based on Spectral Clustering[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(8):1335-1341. (in Chinese)  
周林, 平西建, 徐森, 等. 基于谱聚类的聚类集成算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(8):1335-1341.
- [4] ZENG S, SANG N, TONG X J. Hand-written numeral recognition based on spectrum clustering[C]// International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition International Society for Optics and Photonics, 2011:510-514.
- [5] JIANG Sheng-yi, YANG Bo-hong, WANG Lian-xi. An Adaptive Dynamic Community Detection Algorithm Based on Incremental Spectral Clustering[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(12):2017-2025. (in Chinese)  
蒋盛益, 杨博泓, 王连喜. 一种基于增量式谱聚类的动态社区自适应发现算法[J]. 自动化学报, 2015, 41(12):2017-2025.
- [6] LIAO Lv-chao, JIANG Xin-hua, ZOU Fu-min, et al. A Spectral Clustering Method for Big Trajectory Data Mining with Latent Semantic Correlation[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(5):956-963. (in Chinese)

了短频繁序列挖掘结果的准确性。针对长频繁序列挖掘需要大量存储空间而无法挖掘的问题,提出改进的候选序列选取方法,将其数量控制为一个常数,大大缩减了存储空间。同时,为了解决这种方法带来的准确率问题,提出更改候选序列选取位置进行多次挖掘的方法,确保了其挖掘结果的准确性。

本文所提方法不仅能挖掘到短频繁序列,还能直接挖掘长频繁序列,在此基础上,在时间和空间允许的情况下,以提高挖掘结果的准确率为主要目标。最后通过实验验证了所提方法的有效性,对后续未知协议格式推断等研究打下了良好基础。

### 参 考 文 献

- [1] 爱德华·华兹. 信息战原理与实战[M]. 吴汉平,译. 北京:电子工业出版社,2003:1-20.
- [2] LI Fen, LI Tong, ZHANG Chun-rui, et al. Length identification of unknown data frame[C]// 2012 Eighth International Conference on Computational Intelligence and Security, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, 2012:674-677.
- [3] JIN Ling. Study on bit stream oriented unknown frame head identification[J]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011: 29-39. (in Chinese)  
金陵. 面向比特流的未知帧头识别技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011:29-39.
- [4] WANG He-zhou, XUE Kai-ping, HONG Pei-lin, et al. An unknown link protocol bit stream segmentation algorithm based on frequent statistics and association rules[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(7):554-560. (in Chinese)  
王和洲,薛开平,洪佩琳,等. 基于频繁统计和关联规则的未知链路协议比特流切割算法[J]. 中国科技大学学报, 2013, 43(7): 554-560.
- [5] SONG Jiang. Unknown protocol identification in wireless environment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2013:23-27. (in Chinese)  
宋疆. 无线网络环境下未知协议发现探索研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013:23-27.
- [6] WU Yan-mei. The frame location and protocol feature analysis from the bit-stream in the wireless network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2014: 10-11. (in Chinese)  
吴艳梅. 无线环境下比特流协议帧定位与特征分析[D]. 成都:电子科技大学, 2014:10-11.
- [7] AHO A V, CORASICK M J. Efficient String Matching: An Aid to Bibliographic Search[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(6):330-340.
- [8] TAO Shu-song, CHEN Xing-shu, YIN Xue-yuan. Identification of Unknown Frame Structure Based on Data Mining[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46 (suppl):155-159. (in Chinese)  
陶术松,陈兴蜀,尹学渊. 基于数据挖掘的未知帧结果识别[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(增刊):155-159.
- [9] WANG Yong, WU Yan-mei, LI Fen, et al. Protocol identification association analysis in mobile network environment[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(1):243-248. (in Chinese)  
王勇,吴艳梅,李芬,等. 面向比特流数据的未知协议关联分析与识别[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(1):243-248.
- [10] JU Yu-jian, XIE Shao-bin, ZHANG Wei. Research and simulation of optimization process for network protocol frame segmentation[J]. Computer Simulation, 2015, 32(1):318-321. (in Chinese)  
琚家建,谢绍斌,张薇. 基于自适应权值的数据报指纹特征识别与发现[J]. 计算机仿真, 2015, 32(1):318-321.
- [11] 韩家伟,裴健. 数据挖掘概念与技术[M]. 范明,孟小峰,译. 北京:机械工业出版社, 2012:157-169.
- [12] ZHENG Q. An improved multiple patterns matching algorithm for intrusion detection[C]// International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Xiamen, China: IEEE Press, 2010:124-127.
- [13] BOYER R S, MOORE J S. A fast string searching algorithm [J]. Communications of the Association for Computing Machinery, 1977, 20(10):762-772.
- [14] FAN Jang-jong, SU K. An efficient algorithm for matching multiple patterns[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1993, 5(2):339-351.
- [15] COIT C J, STANIFORD S, MCALERNY J. Towards Faster String Matching for Intrusion Detection or Exceeding the Speed of Snort[C]// Proc 2nd DARPA Information Survivability Conference & Exposition II, IEEE CS, 2001:367-373.
- [16] SONG Hua, DAI Yi-qi. A new fast string matching algorithm for content filtering and detection[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(6):940-945. (in Chinese)  
宋华,戴一奇. 一种用于内容过滤和检测的快速多关键字识别算法[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(6):940-945.
- [17] SOURDIS I, PNEVMATIKATOS D. Pre-decoded CAMs for efficient and high-speed NIDS pattern matching[C]// Field-Programmable Custom Computing Machines. 2004:258-267.
- [18] KNUTH D. The Art of Computer Programming Volume 3: Sorting and Searching(2th ed)[M]. Boston: Addison-Wesley Press, 1997:492.
- [19] Tanenbaum A S, Wetherall D J. 计算机网络(5版)[M]. 严伟,潘爱民,译. 北京:清华大学出版社, 2012:151-161.

(上接第 102 页)

- 廖律超,蒋新华,邹复民,等. 一种支持轨迹大数据潜在语义相关性挖掘的谱聚类方法[J]. 电子学报, 2015, 43(5):956-963.
- [7] DING S F, JIA H J, SHI Z Z. Spectral clustering algorithm based on adaptive Nyström sampling for big data analysis[J]. Journal of Software, 2014, 25(9):2037-2049 (in Chinese).
- [8] NG A Y, JORDAN M I, WEISS Y. On spectral clustering: Analysis and an algorithm[C]// Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems, 2002, 14:849-856.
- [9] ZHANG Yan, HUAN Fei. Colour image segmentation method

- using genetic algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2011, 38(3):237-240. (in Chinese)
- 张艳,宦飞. 一种应用遗传算法的彩色图像分割方法[J]. 计算机应用与软件, 2011, 38(3):237-240.
- [10] WANG Li-guo, WEI Fang-jie. Band selection for hyperspectral imagery based on combination of genetic algorithm and ant colony algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(2): 235-242. (in Chinese)  
王立国,魏芳洁. 结合遗传算法和蚁群算法的高光谱图像波段选择[J]. 中国图像图形学报, 2013, 18(2):235-242.