

文章编号: 1001-0920(2006)10-1092-05

彩色地图分色算法的改进及实现

谢建华, 李海燕, 井元伟

(东北大学 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 在加权模糊 c -均值(FCM)聚类算法的基础上, 对分色算法进行了改进。首先进行色彩空间模型转换, 然后对基于样本加权的 FCM 算法进行改进, 对隶属度进行调整, 把二维彩色直方图引入加权系数中。对于模糊 c -均值算法, 当隶属度接近时, 分类会变得模糊, 而且对于不同的样本矢量, 聚类效果有所不同, 本算法兼顾到了这两点。该方法已用 Visual C++ 6.0 编程实现, 效果比较理想。

关键词: 地形图分色; 色彩空间转换; FCM 算法; 加权模糊 c -均值算法

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

Improvement of Color Segmentation Algorithm for Color Maps and Its Implementation

XIE Jian-hua, LI Hai-yan, JING Yuan-wei

(Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: JING Yuan-wei, Email: jingyuanwei@ise.neu.edu.cn)

Abstract: An improved color segmentation algorithm is presented based on weighting fuzzy c -means(FCM) clustering algorithm. The color space of the map image is transformed firstly. Then, it is improved based on weighting of swatch FCM algorithm. The subordinate degree is adjusted and the 2-D color histogram is introduced into the weighting coefficient. Segmentation becomes fuzzy when the subordinate degrees become similar and for different sample vectors the clustering effects are different in fuzzy c -means algorithm. The proposed algorithm combines the two points. The algorithm is implemented by programming on computer with Visual C++ 6.0 and a good result is obtained.

Key words: Topographic map segmentation; Color space transformation; Fuzzy c -means algorithm; Weighting fuzzy c -means algorithm

1 引 言

随着计算机技术的迅猛发展, 人们对地图信息自动处理的需求日益广泛和迫切, 地理信息系统、电子地图导游、电子地图出版等实用系统正在逐步出现和完善。如何将已有纸质地图的信息自动地输入到计算机中已成为当前计算机应用领域的一个重要课题^[1]。

通常的方法是将彩色地图图像按颜色进行分层处理和识别, 因此首先要解决的就是彩色地图图像

的分色问题。目前的研究是直接从彩色地图原图扫描数据中实现各个要素层的自动分离, 以获得与之对应的单版图, 这种方法受到普遍关注^[2,3], 它对实现全自动地图数字化有着极其重要的意义^[4]。

彩色地图的不同要素层是通过不同颜色来表示的。一般彩色全要素地形图用 4 种不同颜色来表示各个不同的要素层, 即棕色表示地貌(等高线、沙滩等), 蓝色表示水系(河流、湖泊等), 绿色表示植被(草地、森林等), 黑色表示地图符号(居民地、公路格

收稿日期: 2005-06-16; 修回日期: 2005-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274099); 国家 863 计划项目(2004AA 412030)。

作者简介: 谢建华(1963—), 男, 沈阳人, 博士生, 从事复杂系统、模式识别等研究; 井元伟(1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、远程通讯网络通信控制等研究。

网、文字注记等)^[5]。

目前, 已经提出多种图像分色算法, 如边缘检测、区域增长、直方图阈值化和聚类等。最常用的是后两种方法, 文献[2]和[5]采用的是阈值分割法, 文献[2]引入门限作为图像分色的分界点。然而在实际图像中, 由于噪声的污染, 使得直方图上的波峰和波谷不明显, 再加上印刷工艺的限制, 地图本身存在着一定的色彩误差, 往往使得阈值分割出的图像效果不佳。Bezdek 提出的 FCM 算法在文献[1, 6~9]中都得到了应用。

本文利用不同的样本矢量对聚类效果的影响, 提出了基于样本加权的 FCM 算法。为了给权系数赋值, 同时把二维直方图引入彩色空间, 这样二维直方图不仅考虑到了像素点的信息, 而且还用到了邻域点的信息, 使得在一维直方图中的重叠地方得以分开。为了增加分类的确定性, 还利用 λ 截集对 u_{ik} 进行调整。

2 自动分色空间的选取

颜色空间的选择没有绝对的准则, 而是针对具体问题而定。目前常用的颜色模型有 RGB 颜色模型、Lab 颜色模型、HIS 颜色模型、YIQ 颜色模型、CMY 颜色模型和 CMYK 颜色模型。RGB 模型是最常用的一种, 计算机屏幕的显示便是采用该模型。该模型的 3 个基本色, 即通常所说的三原色为 R、G 和 B, 其他颜色都是通过三原色合成得到。BMP 格式图像无论是 8 位、16 位, 还是 24 位的位深度, 均采用 RGB 模型。但作为地图分色空间, 存在人眼不能直接感受 RGB 颜色比例的缺陷。由于 RGB 颜色空间在表述颜色时的线性相关性, 使得利用该空间进行彩色图像色彩纠正时, 往往受到不同程度的制约。在颜色感觉空间进行地图分色具有明显的优越性^[2], 主要表现在具有独立性, 能独立感知各颜色分量的变化, 在该空间中可感知的颜色差是与颜色分量的相应样值上的欧氏距离成比例的。因此选取颜色感觉空间中的 HIS (H 为色调, S 为色饱和度, I 为亮度) 模型作为自动分色空间, 它非常适合于人眼对彩色图像的感知, H 分量对图像的彩色信息独立, I 和 S 分量与人眼对事物颜色的感知方式有密切的联系。

扫描获取的彩色地图是 RGB 空间的彩色图像, RGB 颜色空间与 HIS 颜色空间可以通过下面的公式进行转换^[3]:

$$H = \frac{1}{360} [90 - \arctan(F/\sqrt{3}) + \{0, G > B; 180, G < B\}],$$

$$I = \frac{R + G + B}{3},$$

$$S = 1 - \frac{\min(R, G, B)}{I}, \quad (1)$$

其中

$$F = \frac{2R - G - B}{G - B}.$$

3 彩色地图的分色算法

FCM 聚类算法是由 Bezdek 提出的一种模糊聚类法, 它与 K-means (HCM) 聚类算法的不同之处在于, 它并不是将模式分成明子集, 而是求出每个模式属于各模类 (cluster) 模糊隶属度^[10]。基于该算法, 出现了各种改进算法。本文在加权模糊 c 均值聚类算法的基础上进行了改进, 在此过程中引入了彩色二维直方图。

3.1 FCM 算法

定义 1 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset R^s$ 是特征空间 R^s 中的一个具有 n 个样本的有限数据集, C 是需要划分的类数, 令 $2 < C < n, M_{cn} \subset R^{c \times n}$, 则 X 的一个非退化模糊 C -划分是指, 一个 $c \times n$ 矩阵 $U =$

$$[u_{ik}]_{c \times n} \text{ 满足条件 } \sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, \text{ 其中: } 0 \leq u_{ik} \leq 1, 1 \leq k \leq n, 1 \leq i \leq c.$$

定义 2 定义目标函数 $J_m(U, V)$ 为

$$J_m(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2, \quad (2)$$

$k = 1, \dots, n; i = 1, \dots, C.$

其中: $V = [v_i] (i = 1, \dots, C)$ 为聚类原型矩阵, m 是一个大于 1 的权重因子, $\|\cdot\|$ 为空间 R^s 由内积引导出的范数, u_{ik} 为第 k 个样本对第 i 个类别的隶属度。

Bezdek 通过优化目标函数^[8], 给出函数具有极小点的必要条件为

$$u_{ik} = \frac{(1/d_{ik})^{1/(m-1)}}{\sum_{j=1}^c (1/d_{jk})^{1/(m-1)}}, \quad (3)$$

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^m}, \quad (4)$$

其中 $d_{ik} = \|x_k - v_i\|^2$ 。

3.2 FCM 算法的改进

不同的样本矢量对聚类效果的影响是不同的, 文献[6]基于这一点提出了基于样本加权的 FCM 算法。为了给权系数赋值, 本文将二维直方图引入到彩色空间; 同时, 为了增加分类的确定性, 对 u_{ik} 进行了调整。

3.2.1 加权模糊 c 均值聚类算法

给每个样本赋以权系数 β_k , 样本集 X 的加权模

糊 c 均值聚类问题的数学规划问题描述如下:

$$J_m(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \beta_k u_{ik}^m x_k - v_i^2, \quad (5)$$

求此函数的极小值属于 Kuhn-Tucker 问题

为了保证不等式 $0 \leq u_{ik} \leq 1$ 的成立, 可令 $u_{ik} = w_{ik}^2$ 此时, 只剩下等式约束 $\sum_{i=1}^c w_{ik}^2 = 1$, 记拉格朗日

乘子为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_c)$, 构造拉格朗日函数

$$\Phi(W, \alpha) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \beta_k w_{ik}^{2m} d_{ik} + \sum_{k=1}^n \alpha_k \left(\sum_{i=1}^c w_{ik}^2 - 1 \right). \quad (6)$$

在 (W^*, α^*) 处取得极小值的必要条件为

$$\frac{\partial \Phi(W^*, \alpha^*)}{\partial \alpha_i} = \sum_{i=1}^c (w_{ik}^*)^2 - 1 = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Phi(W^*, \alpha^*)}{\partial w_{lp}} = 2m \beta_p (w_{lp}^*)^{2m-1} d_{lp} + 2(w_{lp}^*) \alpha_p^* = 0 \quad (8)$$

由式(8)得

$$(w_{lp}^*)^2 = \left(\frac{-\alpha_p^*}{m \beta_p d_{lp}} \right)^{1/(m-1)}. \quad (9)$$

将式(9)两边对 l 求和, 得

$$\sum_{l=1}^c (w_{lp}^*)^2 = \sum_{l=1}^c \left(\frac{-\alpha_p^*}{m \beta_p d_{lp}} \right)^{1/(m-1)}. \quad (10)$$

将 $\sum_{i=1}^c w_{ik}^2 = 1$ 代入式(10), 得

$$\left(-\alpha_p^* \right)^{1/(m-1)} = \frac{1}{\sum_{l=1}^c \left(\frac{1}{m \beta_p d_{lp}} \right)^{1/(m-1)}}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(9), 得

$$(w_{lp}^*)^2 = u_{lp}^* = \frac{(1/d_{lp})^{1/(m-1)}}{\sum_{l=1}^c (1/d_{lp})^{1/(m-1)}}, \quad (12)$$

即

$$u_{ik} = \frac{(1/d_{ik})^{1/(m-1)}}{\sum_{j=1}^c (1/d_{jk})^{1/(m-1)}}. \quad (13)$$

下面证明式(13)的充分性

求 $\Phi(W, \alpha)$ 的二阶偏导数, 由式(8)得

$$\frac{\partial}{\partial v_{st}} \left(\frac{\partial \Phi(W^*, \alpha^*)}{\partial v_{lp}} \right) = 2m(m-1)\beta_p d_{lp} (w_{lp}^*)^{2(m-1)} + 2\alpha_p^*. \quad (14)$$

将式(9)和(11)代入式(14)中, 可进一步得

$$\frac{\partial}{\partial v_{st}} \left(\frac{\partial \Phi(W^*, \alpha^*)}{\partial v_{lp}} \right) = 2m(m-1)\beta_p d_{lp} \left\{ \frac{(1/d_{lp})^{1/(m-1)}}{\sum_{l=1}^c (1/d_{lp})^{1/(m-1)}} \right\}^{m-1} -$$

$$2 \left\{ \frac{1}{\sum_{l=1}^c \left(\frac{1}{m \beta_p d_{lp}} \right)^{1/(m-1)}} \right\}^{m-1} =$$

$$4m(m-1)\beta_p \left(\sum_{l=1}^c (d_{lp})^{1/(m-1)} \right)^{1-m} > 0 \quad (15)$$

由前面的设定条件 $m > 1, d_{lp} > 0, \beta_p > 0$, 可以推出上式大于零, 也就证明了 $\Phi(W, \alpha)$ 的二阶偏导是正定的, 因此式(13)是充分条件

接下来推导 v_i 令 $y \in R^s, y \geq \theta, t \in R$, 对于 $\forall i$, 定义函数

$$h_i(t) = \mathcal{Q}(v_i^* + ty) = \sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m x_k - (v_i^* + ty)^2, \quad (16)$$

即

$$h_i(t) = \mathcal{Q}(v_i^* + ty) = \sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m (x_k - (v_i^* + ty))^T,$$

于是

$$\frac{dh_i(t)}{dt} = -2 \sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m (x_k - v_i^* - ty) y^T. \quad (17)$$

取 $t = 0$, 由式(17)得

$$\frac{dh_i(0)}{dt} = -2 \sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m (x_k - v_i^*) y^T = 0 \quad (18)$$

对于任意 i , 式(18)都成立, 而对于任意 $i, y \geq \theta$, 所以只能是 $\sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m (x_k - v_i^*)$ 为零向量, 从而可得

$$\sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m x_k = \sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m v_i^*,$$

$$v_i^* = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^n \beta_k (u_{ik})^m}. \quad (19)$$

下面证明式(19)的充分性

令 $y = (y_1, y_2, \dots, y_c)$, 对于 $\forall i, y_i \in R^s, t \in R$, 构造函数

$$h(t) = \mathcal{Q}(v^* + ty) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \beta_k (u_{ik})^m x_k - (v_i^* + ty_i)^2, \quad (20)$$

有

$$h(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \beta_k (u_{ik})^m (x_k - v_i^* - ty_i) y_i^T, \quad (21)$$

$$h''(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c 2\beta_k (u_{ik})^m y_i y_i^T =$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c 2\beta_k(u_{ik})^m y_i^{-2} \quad (22)$$

令 $t = 0$, 由式(22) 得

$$h''(0) = 2 \sum_{i=1}^c y_i^{-2} \sum_{k=1}^n \beta_k(u_{ik})^m, \quad (23)$$

对于 $y = 0, h''(0) > 0$, 所以 v_i^* 是严格局部极小点, 从而证明了其充分性

总结上述结论, 可以得到迭代公式为

$$u_{ik} = \frac{(1/d_{ik})^{1/(m-1)}}{\sum_{j=1}^n (1/d_{jk})^{1/(m-1)}},$$

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k(u_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^n \beta_k(u_{ik})^m}. \quad (24)$$

从 u_{ik} 的迭代公式可以看出, 它与经典的 FCM 算法没有区别, 权系数 β_k 的主要作用是对聚类中心进行调整. 若模式对某一类的隶属度 u_{ik} 远大于其他类的隶属度时, 可以得到满意的结果. 然而, 当 u_{ik} ($i = 1, 2, \dots, c$) 较接近时, 分类往往是不确定的或模糊的, 这就需要对 u_{ik} 进行适当的调整

3.2.2 u_{ik} 的调整

1) 利用 λ 截集, 对 u_{ik} 进行调整

为保证至多只有一个 $u_{ik} \geq \lambda$, 考虑到 $\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, 1 \leq k \leq n$, 可以令 $\lambda \in [0.5, 1]$, 有如下两种情况:

对于给定的 $k, i = 1, 2, \dots, c$, 如果不存在 $u_{ik} \geq \lambda$, 则 u_{ik} 保持原值不变;

对于给定的 k , 当存在 $i, i \in [1, c]$, 使 $u_{ik} \geq \lambda$ 时, 则利用下式进行调整:

$$\begin{cases} u_{ik} = 1, \\ u_{jk} = 0, j \neq i \end{cases}$$

2) λ 的选取

由 u_{ik} 的迭代公式可知, 当 c 增加时, u_{ik} 将减小, 为确保不等式 $u_{ik} \geq \lambda$ 成立, λ 也要相应减小, 考虑到这一点, 可取 $\lambda = 0.5 + k/c$, 其中 k 为一比例系数

3.2.3 β_k 的选择

二维直方图不仅考虑到了像素点的信息, 而且还用到了邻域点的信息^[7], 使得在一维直方图中的重叠部分得以分开.

设原图像 $h(x, y)$ 像素的最大值为 L , 大小为 $N \times N$, 由 $h(x, y)$ 平滑得到的平滑图像为 $g(x, y)$, 其像素最大值和大小也为 L 和 $N \times N$. 由 $h(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 可以构成一个二元组, 每个二元组属于二维平面上的一个点. 这种二维直方图不光像一维直方图那样考虑到了单个点的统计状况, 而且还涉及到了邻域信息. 设二元组 (s, t) 出现的频数为 f_m , 它代

表 $h(x, y)$ 中像素值为 $s, g(x, y)$ 中像素值为 t 这两种情况同时出现的二维点数. 显然有下面的关系式:

$$\sum_{s=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{L-1} f_{st} = N \times N.$$

令 $p(s, t)$ 为对应点 (s, t) 的像素值发生的概率, 有

$$p(s, t) = \frac{f_{st}}{N \times N},$$

此时便可构造出二维直方图. 在 3 维彩色空间中, β_k 是 3 维向量. 本文的颜色空间选取的是 HIS 颜色模型, 对 x_k 的 3 个空间分量 H, I, S 分别求其二维直方图. 在求 H 分量的二维直方图时, 对于某个点 (x, y) , $h(x, y)$ 中像素值为 x_{kH} , $g(x, y)$ 中像素值为 x_{kI} , 从而得到 $\beta_{k1} = p[x_{kH}, x_{kI}]$. 在处理 I, S 分量时, 与 H 分量的道理类似, 进而求出每个 x_k 所对应的 β_k .

3.3 实现步骤

实验证明, 一般 m 的最佳值在 1.5 ~ 3.5 之间^[10], 这里取 $m = 2$

Step 1: 根据经验初始化聚类中心 v_1, v_2, \dots, v_c , 给定停止误差 ϵ , 令循环次数 $N = 1$.

Step 2: 根据式(13) 计算 $u_{ik}^N, 1 \leq i \leq c$. 若对于 $i, u_{ik}^N \geq \lambda$ 则 $u_{ik}^N = 1, u_{jk}^N = 0 (j \neq i)$; 否则, 按式(13) 计算的 u_{ik}^N 保持不变.

Step 3: 利用 u_{ik}^N 和式(19) 计算 v_j^N .

Step 4: 如果 $\|V^N - V^{(N-1)}\|^2 < \epsilon$, 则循环结束; 否则, $N = N + 1$, 转 Step 2.

4 实验结果及分析

本算法是利用 Visual C++ 6.0 实现的, 针对的是 1:5 万比例尺地图, 效果比较理想, 从运行速度上看也是比较理想的. 图 1 为一幅地图图像比较典型的一部分, 扫描分辨率为 300 dpi, 含有水系、植被、等高线等多种信息. 图 2 为提取出的黑色要素, 图 3 为提取出的等高线, 图 4 为绿色要素, 图 5 为蓝色要素.

通过 λ 截集对 u_{ik} 进行调整, 达到了既突出主要因素, 又抑制次要因素的目的. 采用了具有模糊约束的颜色聚类, 对于那些在地图直方图中占有较小比



图 1 扫描后的地图原图



图2 分色后得到的黑版图



图3 分色后得到的等高线图

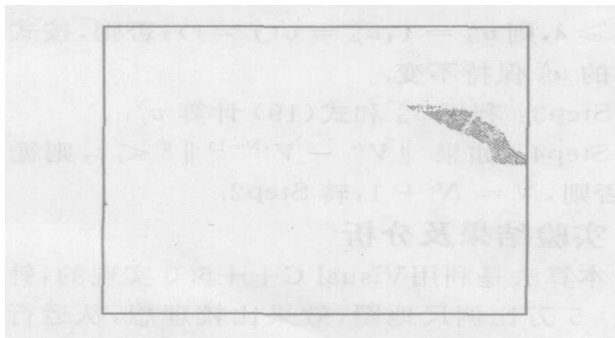


图4 分色后得到的植被图

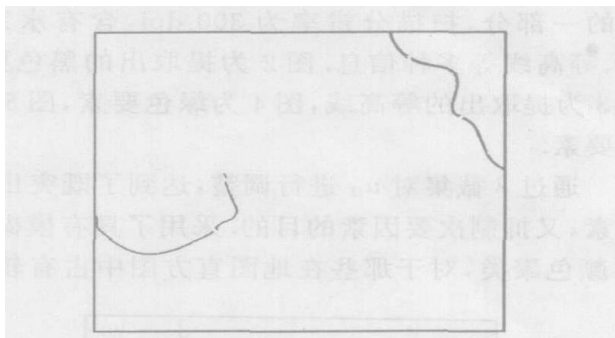


图5 分色后得到的水系图

例的颜色,该算法也能正确地进行分层,自适应性较强,而且一般很快就能找到聚类中心。实验结果表明,本文算法具有噪声小、分层清晰的特点。

参考文献(References)

- [1] 郑华利,周献中,王建宇. 彩色扫描地图的自动分色算法研究及实现[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(1): 29-33
(Zheng H L, Zhou X Z, Wang J Y. Research and Im-

plementation of Automatic Color Segmentation Algorithm for Scanned Color Maps [J]. *J of Computer-aided Design and Computer Graphics*, 2003, 15(1): 29-33)

- [2] 程起敏,杨崇俊,邵振峰. 彩色扫描地形图的自动分色与处理[J]. *测绘信息与工程*, 2003, 25(5): 4-6
(Cheng Q M, Yang C J, Shao Z F. Automatic Color Segmentation and Treatment for Scanned Color Maps [J]. *J of Geomatics*, 2003, 25(5): 4-6)
- [3] 黄伟,谭鹤良,彭晓燕,等. VC++ 中一种快速图像处理方法[J]. *湖南大学学报*, 2000, 27(6): 31-37.
(Huang W, Tan H L, Peng X Y, et al. A Method of Fast Image Processing in VC++ [J]. *J of Hu'nan University*, 2000, 27(6): 31-37.)
- [4] Alioto M, Bernardi S, Fort A. An Efficient Implementation of PRNGs Based on the Digital Sawtooth Map [J]. *Int J of Circuit Theory and Applications*, 2004, 32(6): 15-27.
- [5] 王建宇,滕树钦,周献中. 地图等高线的自动提取[J]. *计算机工程*, 2002, 28(10): 132-134
(Wang J Y, Teng S Q, Zhou X Z. Automatic Pick-up for Contour Line in Map [J]. *Computer Engineering*, 2002, 28(10): 132-134)
- [6] 高新波,李洁,姬红兵. 基于加权模糊c均值聚类与统计检验指导的多阈值图像自动分割算法[J]. *电子学报*, 2004, 32(4): 661-664
(Gao X B, Li J, Ji H B. A Multi-threshold Image Segmentation Algorithm Based on Weighting Fuzzy c-means Clustering and Statistical Test [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(4): 661-664)
- [7] 甄文智,范九伦,谢维信. 基于二维直方图的图像模糊聚类分割新方法[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(15): 86-88
(Zhen W Z, Fan J L, Xie W X. A New Fuzzy Clustering Algorithm for Image Segmentation Based on Two-dimensional Histogram [J]. *Computer Engineering and Application*, 2003, 39(15): 86-88)
- [8] Bezdek J C. A Convergence Theorem for the Fuzzy ISODATA Clustering Algorithms [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, 2(1): 1-8
- [9] 樊治平,于春海,尤天慧. 一种基于三角模糊数多指标信息的FCM聚类算法[J]. *控制与决策*, 2004, 19(12): 1407-1411.
(Fan Z P, Yu C H, You T H. An FCM Clustering Algorithm for Multiple Attribute Information with Triangular Fuzzy Numbers [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(12): 1407-1411.)
- [10] Pal N T, Bezdek J C. On Cluster Validity for the Fuzzy Cmeans Model [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1995, 3(3): 370-379.