

模糊颜色直方图在基于内容的图像检索中的应用研究^①

Application of Fuzzy Color Histogram in Content-Based Image Retrieval

解洪胜 (中华女子学院山东分院 计算机系 山东 济南 250300)

王连国 (中国矿业大学 理学院 江苏 徐州 221008)

孙玉芳 (山东旅游职业学院 计算机网络中心 山东 济南 250200)

摘要: 本文提出一种子模糊颜色直方图构造方法,采用模糊 C 均值聚类算法对彩色图像进行颜色聚类,利用模糊理论的隶属函数,通过计算每个像素对颜色聚类中心的隶属度构造颜色直方图,将得到的模糊颜色直方图作为表示彩色图像的特征向量进行基于内容的图像检索实验,实验结果表明本文提出的方法具有较高的检索准确率和研究价值。

关键词: 模糊颜色直方图 模糊 C 均值聚类 基于内容的图像检索 模糊理论

1 引言

颜色是图像的一种重要视觉特征,具有旋转不变性、平移不变性等优点,在基于内容的图像检索(CBIR)中应用广泛、性能显著。对此,人们提出了多种颜色特征提取及表示方法。其中,Swain 等人^[1]提出的颜色直方图在商用及实验系统中都得到了广泛应用。另一方面,为解决颜色直方图不能表征图像空间关系的缺陷,颜色聚合向量^[2]、颜色相关图^[3]等相关方法陆续提出并得到一定程度的应用。

CBIR 旨在通过度量图像间特征进行相似性匹配,而相似性本身是一个模糊概念,颜色直方图是对像素颜色在不同颜色区段分布的全局统计,对图像内容的反映能力一定程度上依赖具体的量化方法以及颜色种类的数目,因此不可避免地存在一些缺点,如:对图像亮度变化、量化误差等操作比较敏感,高维特征向量带来的高存储量和计算开销等。另外,人对颜色的感知也是个模糊概念,颜色在颜色空间的分布具有连续性和相似性的特点。颜色直方图传统的硬划分量化方法,导致在量化边界两侧,感知上相似的颜色可能被量化到不同的量化区域;在同一量化区域内,感知上不相似的颜色可能被量

化到同一量化区域内^[4]。

Zadeh 提出的模糊集合理论,通过隶属函数的概念和方法描述来具有模糊性的过渡过程,那么将模糊集合理论及其衍生方法应用于 CBIR 具有较强的实用性^[5,6]。因此,本文将利用模糊 C 均值聚类算法(Fuzzy C-Means Algorithm, FCM),对图像色彩在 RGB 空间中进行模糊聚类,通过计算每个像素对聚类中心(即代表性颜色)的隶属度值来构造模糊颜色直方图,从而实现彩色图像的分类检索。

2 模糊理论简介

美国加利福尼亚大学控制论专家查德(L.A.Zadeh)在 1965 年发表了模糊集(Fuzzy Sets)的著名论文,标志着模糊数学的诞生^[7]。模糊数学不是让数学变成模糊的东西,而是用定量的方法去研究和处理模糊现象,本质是让模糊的东西变得清晰化。下面简要介绍一下模糊集的基本知识。

设 A 为论域上 X 的一个普通子集, $\forall x, x \in X$, 传统集合概念上的 x 与 A 的关系只有两种情况,即 $x \in A$ 或 $x \notin A$, 从而确定了一个从 X 到 {0,1} 的映射 χ_A , 即

^① 基金项目:国家自然科学基金重大项目(50490270);国家杰出青年科学基金资助项目(50225414)

收稿时间:2008-10-20

$$\chi_A: X \rightarrow \{0,1\}$$

$$\chi_A = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

其中, χ_A 称为集合 A 特征函数。由于 χ_A 仅取两个值, 在表达概念方面只能表达“非此即彼”的现象, 而不能表达在现实生活中大量存在的“亦此亦彼”的模糊现象。

现实世界中存在着大量内涵和外延都不分明的模糊现象和概念, 因此, 用 Zadeh 创立的模糊集合来描述变得很有必要。模糊集的定义如下:

设 X 给定论域, μ_A 是 X 闭区间 $[0,1]$ 个映射:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

$$\forall x \in X, x \rightarrow \mu_A(x)$$

称此映射确定了一个模糊子集。对于任意的 $x \in X$, 都有一个实数 $\mu_A(x) \in [0,1]$ 与之对应, 称 $\mu_A(x)$ 为 x 对集合的 A 隶属度, 而映射 μ_A 称为关于 A 的隶属函数。

据上述定义, 当的值域变为时, 就蜕化为普通子集的特征函数, 模糊子集也变成一个普通子集, 可见, 普通子集是模糊子集的特例。

3 模糊直方图的概念

颜色直方图可视为某个颜色在图像中出现概率的表示, 反映了图像颜色的总体分布状况。假设有一幅包含 N 个像素的图像 I , 其对应的有 M 个 Color bins 的颜色直方图可表示为 $H(I) = [P_1, P_2, \dots, P_m]$, 通过定义隶属函数 $q_m(x)$ 可以计算标准直方图的 P_i , $q_m(x)$ 是表示特征值是否属于某个 bin 的特征函数:

$$P_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} q_m(x^{(n)}), \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

其中:

$$q_m(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } x \in P_m \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$q_m(x)q_{m'}(x) = 0 \quad \forall x \in I, m \neq m'$$

即对任意点 x' 只存在一个非零的隶属函数。

根据上述 $q_m(x)$ 的定义, 假如图像的两个灰度值分别为 0.49 和 0.51, 虽然仅相差 0.02, 在本质上没有什么区别, 但由于一个小于 0.5, 一个大于 0.5, 就被生硬地划分到两个不同的区间。如此统计, 必然会造成跳跃现象。隶属函数 $q_m(x)$ 的原理可用图 1 加以说明, 从图中可以看出, 隶属函数在边界处不连续, 即由于两个相邻的 bin 之间的跳跃而导致了微小误差 ϵ 。

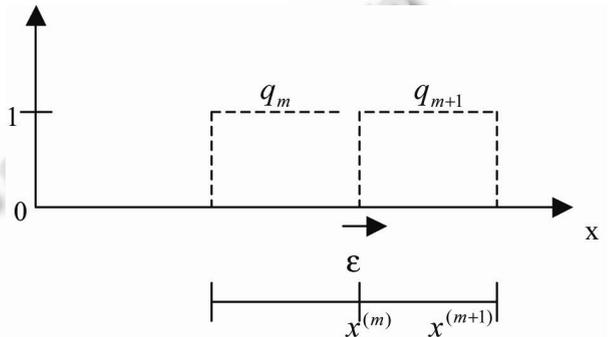


图 1 传统直方图隶属函数

为了解决隶属函数不连续的问题, 将隶属函数 $q_m(x)$ 定义表示为图 2 所示的形式, 从图中可以看出, $q_m(x)$ 值是一个从 0 连续上升至 1、从 1 下降至 0 的连续过程。此外, 相邻的两个隶属函数有重叠区域, 保证它们的总和为 1。根据模糊理论将 $q_m \in \{0,1\}$ 修改为 $q_m \in [0,1]$, 从而得到所谓的连续模糊直方图。连续模糊直方图数学定义同式(3), 其主要不同之处在于:

- ①直方图 bin 的隶属函数 $q_m(x)$ 是连续函数。
- ②所有直方图 bin 的隶属函数 $q_m(x)$ 之和等于 1, 使得每个特征点 $x^{(n)}$ 对直方图具有相同的作用。

$$\sum_{m=0}^{M-1} q_m(x) = 1 \quad \forall x \in \chi \quad (5)$$

- ③隶属函数值非负:

$$q_m(x) \geq 0, \quad \forall x \in \chi, m=0, 1, \dots, M-1 \quad (6)$$

4 模糊颜色直方图的构造

模糊颜色直方图(Fuzzy Color Histogram, FCH)最先是由 Ju Han 等人提出并应用于多媒体领域的^[8,9]。目的是将每一个像素和所有的 Color Bins 进行颜色相似性比较, 根据模糊理论的隶属函数, 将该

像素分配到每一个颜色直方图的 Color Bins 里面。为了计算出每一个像素对 Color Bins 的隶属度，利用了模糊 C 均值聚类算法(FCM)。

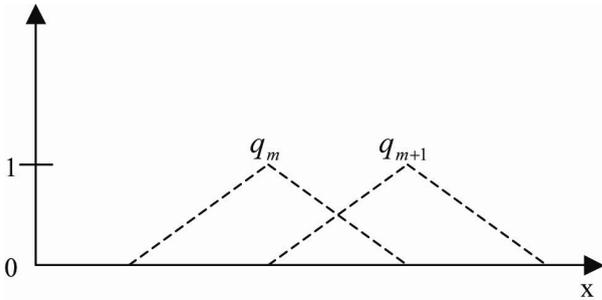


图 2 模糊直方图隶属函数

给定一个包含 n 个颜色索引的颜色空间，图像 I 包含 N 个像素，每一个像素都会依据模糊理论的隶属度函数值，被分配到每一个 Color Bins 里面。假设模糊隶属度值是 $\mu_{ij} \in [0,1]$ ，其表示第 j 个像素被归属到第 i 个 Color Bins 的程度值。图像 I 的模糊颜色直方图的数学定义描述如下：

$$F(I) = [f_1, f_2, \dots, f_n] \quad (7)$$

其中：

$$f_i = \sum_{j=1}^N \mu_{ij} P_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mu_{ij} \quad (8)$$

其中， P_j 表示从图像 I 中任选一像素为 j 的概率，在此 $P_j = 1/N$ 。

设在量化的颜色空间中有 n' 个颜色索引，使用模糊 C 均值聚类算法将其分为 n 类， $n < n'$ 。在聚类过程中会产生一个隶属度矩阵：

$$U = [\mu_{ij}]_{n \times n'} = M = [m_{ij}]_{n \times n'} \quad (9)$$

矩阵中每一个元素 m_{ij} 代表第 j 个颜色索引被重新分配到第 i 个颜色索引的颜色隶属度值，且必须满足下列的条件：

$$\mu_{xk} \in [0,1], \sum_{k=1}^n \mu_{xk} = 1, \sum_{x \in X} \mu_{xk} > 0, 1 \leq k \leq n, x \in X$$

FCH 图像检索系统利用 FCM 聚类算法，将 n' 个精致颜色对应到 n 个比较粗糙的颜色值里。而且同时也计算出两者之间所对应的归属矩阵值，在求得归属矩阵值时，利用目标函数 J_m 来当作停止分类的条件，其公式定义如下：

$$J_m(U, V; X) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^c \mu_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2 \quad (10)$$

其中 $V = [v_1, v_2, \dots, v_c]^T$ 是个未知的分类向量值。 μ_{ik} 代表图像集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的一个样本 x_k ，对应至第 i 个类中心的归属值。 v_i 和 μ_{ik} 的数学定义分别为：

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m}, \quad \text{for } 1 \leq i \leq c \quad (11)$$

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|x_k - v_i\|^2}{\|x_k - v_j\|^2} \right)^{\frac{1}{m-1}}}, \quad \text{for } 1 \leq i \leq c \text{ and } 1 \leq k \leq n \quad (12)$$

式(10)中的 m 代表调整模糊理论种的模糊程度参数。

FCM 聚类算法具体步骤如下：

- ①输入分类数目 $c = 16$ 、模糊程度指数 $m = 2.0$ 、误差容忍值 $\varepsilon = 0.0001$ ，及随机产生的初始矩阵值 $U(0)$ 。
- ②初始设定每聚类中心值 v_i ，其中 $1 \leq i \leq c$ 。
- ③输入欲聚类的图像数据 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。
- ④据公式(11)，计算出第 l 次 c 个类中心值 $\{v_i^{(l)}\}$ 。
- ⑤依公式(12)，更新第 l 次的归属矩阵值 $U(l)$ 。
- ⑥当 $\|U^{(l)} - U^{(l-1)}\| > \varepsilon$ ， $l = l + 1$ 并回到步骤④，否则停止并完成聚类过程。

5 实验及结果分析

实验中的测试图像来自 SIMPLIcity 网站[10]，根据实验要求从中选取了公交车、恐龙、马、自然风景、花卉、大象、轿车 7 大类图像，每类包括 40 幅 384×256 的 JPG 格式的彩色图像。因本文目的是为了验证算法的有效性，所以只对前 5 类图像进行了检索实验，样例图像如图 3 所示。实验步骤是首先利用 FCM 算法对所有图像在 RGB 颜色空间进行颜色聚类，聚类数目、模糊程度指数、误差容忍值；然后计算每幅图像的 FCH，每个 FCH 包含 16 个 Color Bins，所有图像组成一个包含 280 条记录的特征库，并将该特征库与对应图像文件名建立关联。

本文实验系统是基于 Matlab7 的 GUIDE 环境开发实现，检索公交车的界面如图 4 所示。对于前 5 类图像，每类随机选择 10 幅图像分别进行检索实验，假定返回图像与查询样例来自同一类就认为是相关图像，图像间的度量方式是通过计算与查询图像的欧式距离来判断其相似性，按距离从小到大的排序返回检

索结果,最终以 10 次检索的前 20 幅图像的平均查准率(Average Precision)作为系统衡量标准。图 5 是随机选择的 4 匹马和 4 朵花各自生成的模糊颜色直方图;图 6 是本文选择的 5 类图像 10 次检索结果的查准率。

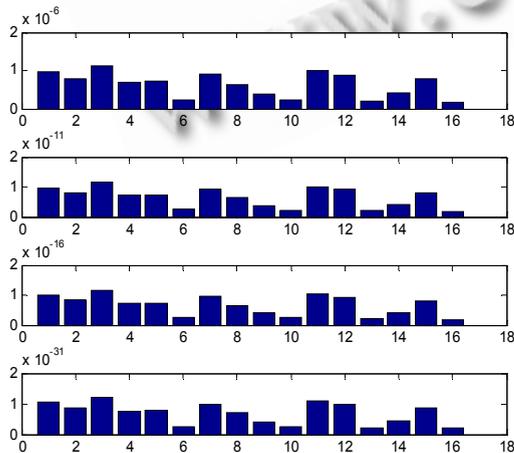


图 3 实验中所用样例图像

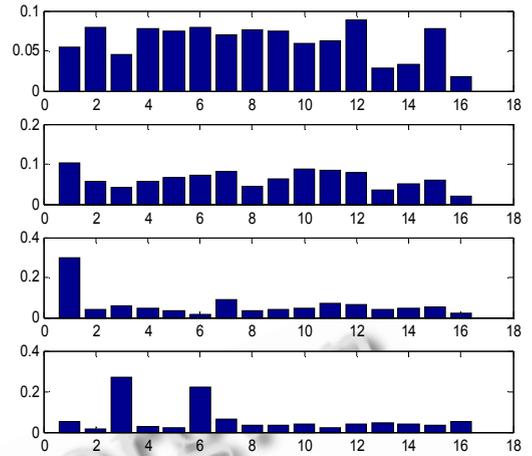


图 4 检索公交车返回前 20 幅相似图像的系统界面

注:左上角显示选择的查询图像,右侧根据相似性按从左到右、从上到下的顺序显示前 20 幅图像检索结果,图像下方信息是图像间欧式距离及对应文件名。



(a)随机选择的 4 匹马的模糊颜色直方图



(b)随机选择的 4 朵花的模糊颜色直方图

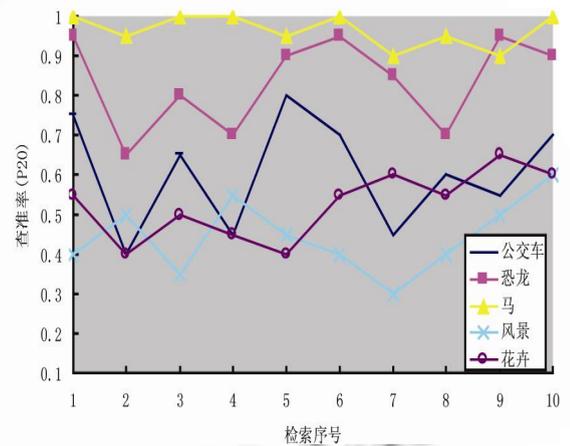


图 6 五类图像每次检索的查准率

从实验结果来看,马和恐龙的查准率比较高,花卉和自然风景图像的查准率相对要低,公交车的检索结果适中。在实验过程中发现马的检索结果相对于恐龙更为稳定,公交车和自然风景的检索结果有明显震荡。从图 5 所示由花和马计算生成的 FCH 可看出,虽然是随机选择的 4 幅图像,但 4 匹马的 FCH 相似性要明显好于花,主要原因是草地上的马的图像背景比较单一、颜色相对均匀,像素对于生成的 16 种主要颜色的隶属度差异不是很明显,恐龙的情况与此类似;花和自然风景的 FCH 间存在明显差异,本文实验采用欧式距离度量图像间的相似性,因此,马和恐龙的查准率高于其他图像也就不足为奇了。

6 结论

本文提出结合 FCM 方法,对图像色彩像素进行模

糊聚类得到 16 个聚类中心,即代表性颜色,通过计算每个像素对这些主要颜色的隶属度构造了 FCH。实验表明,运用 FCH 方法,能有效地提高色彩特征比对时检索结果的正确率。但本文实验采用的图像库中记录数相对较少,检索验证的图像也只有 5 类,取得的实验结果有必要在规模较大的图像库中、对多类图像进行进一步的验证和分析。

下一步的研究工作将在 CBIR 中引入相关反馈检索机制,并进一步测试和比较其实验效果及其经典实现方法。

参考文献

- 1 Swain MJ, Ballard DH. Color indexing. Int.J.Comput. Vis. 1991,7(1):11 – 32.
- 2 Pass G, Zabih R, et al. Comparing images using color coherence vectors. Proceedings of ACM Multimedia, Boston, Massachusetts, 1996:65 – 73.
- 3 Huang J. Image indexing using color correlograms. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997:762 – 768.
- 4 张卫红,张前进.一种基于模糊量化直方图的图像检索方法.佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2005, 23(3):32 – 35.
- 5 王炜, Mrichael RL,武德峰.基于模糊分类的图像颜色直方图研究.模糊系统与数学, 2003,17(4):94 – 98.
- 6 何恒,余英林.一种用于图象检索的综合模糊直方图方法.中国图象图形学报, 2001,6(7):694 – 698.
- 7 Zadeh LA. Fuzzy Sets. Information and Control, 1965, (8):338 – 353.
- 8 Ju H, Kai-Kuang Ma. Fuzzy color histogram: an efficient color feature for image indexing and retrieval. Proceedings of Acoustics, Speech and Signal Processing, 2000. ICA- SSP apos: 00. 2000,6(4):201 – 204.
- 9 Ju H, Ma KK. Fuzzy Color Histogram and Its Use in Color Image Retrieval. IEEE Transactions on Image Processing, 2002,11(8):944 – 952.
- 10 Jia L, Wang JZ. Automatic linguistic indexing of pictures by a statistical modeling approach. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003,25(9):1075 – 1088.