

# 基于图像信息熵与空间分布熵的彩色图像检索方法

孙君顶, 丁振国, 周利华

(西安电子科技大学 多媒体研究所, 陕西 西安 710071)

**摘要:**在分析基于颜色直方图及信息熵进行图像检索的基础上,提出了一种改进的基于信息熵的图像检索算法,该方法同以往的基于信息熵的图像检索算法相比具有更强的鲁棒性.同时,文中又提出利用空间分布熵描述图像颜色的空间分布信息,并给出了一种基于图像信息熵与空间分布熵的彩色图像检索算法.试验结果表明,该方法效果良好,大大提高了图像检索的速度.

**关键词:**信息熵;空间颜色直方图;空间分布熵;图像检索

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A

## IMAGE RETRIEVAL BASED ON IMAGE ENTROPY AND SPATIAL DISTRIBUTION ENTROPY

SUN Jun-Ding, DING Zhen-Guo, ZHOU Li-Hua

(Research Inst. Of Multimeadia, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A new image retrieval algorithm based on image entropy and spatial distribution entropy was presented. At first a more robust method, which can remove the influence of the symmetry of entropy, was proposed to extract the global color feature. Then color spatial distribution entropy vector for each color channel was also introduced to represent the spatial color information. After that, the moments were adopted to reduce the dimension of color spatial distribution entropy. In the end, a low dimensional vector which includes the global and spatial information was used as index for color image retrieval. The experiment results show that the new method gives better performance than color histogram.

**Key words:** information entropy; spatial color histogram; spatial distribution entropy; image retrieval

### 引言

颜色直方图作为一种重要的基于颜色特征进行图像检索的方法<sup>[1]</sup>,具有特征提取和相似度计算简便,并且随图像尺度、旋转等变化不敏感的特点.但直方图方法也存在许多缺点:(1)完全丢失了图像颜色的空间分布信息;(2)存在特征维数过高的问题;(3)对于对图像颜色的量化处理,可能将视觉不同的颜色量化到同一区间,也可能将视觉相同的颜色量化到不同的区间,容易造成误检现象.尤其对于大型图像数据库的检索来说,采用该方法不但存在误检、漏检现象,还会加大检索时间.

为了解决利用直方图进行检索存在的问题,John Zachary<sup>[2]</sup>提出采用信息熵描述图像的颜色特征,用于克服直方图维数过高问题.但该方法仍完全

丢失了图像颜色的空间分布信息,并且没有考虑熵的数学特性(主要是对称性问题)对图像检索效果带来的影响及颜色量化所带来的一系列问题,因而该方法非常容易造成误检现象.以往的提取图像颜色的空间分布信息方法主要包括:CCV<sup>[3]</sup>方法、局部直方图法<sup>[4,5]</sup>方法、color correlograms<sup>[6]</sup>方法,等等.这些方法虽然在一定程度上有效的提取了图像颜色的空间分布信息,但仍然存在颜色的量化问题及所提取特征维数过高问题,上述提取图像颜色的空间分布信息方法还在一定程度上增加了图像特征的维数.文献[7,8]通过图像聚类或分割的方法得到图像中的主要物体,然后提取每个物体的颜色和空间信息,但由于准确的图像分割比较困难,同时当图像中并无明显的物体存在时,聚类的方法也将有较大的偏差,因此试验效果有时不够理想.

基于上述思想,本文提出了一种新的结合图像信息熵与空间分布熵的彩色图像检索方法. 本文首先讨论了文献[2]方法所存在的问题,并提出了一种改进的方法来消除熵的对称性对图像检索效果带来的影响. 同时,针对图像颜色的空间分布信息,文中又提出了一种新的基于信息熵的表示方法,该方法既保证有效的提取图像的空间信息又不会造成空间特征的维数增大. 同时,由于在对彩色图像进行特征提取时,分别针对彩色图像的3个颜色通道,因此避免了由于对颜色量化所带来的误检现象.

## 1 图像的信息熵

### 1.1 John Zachary<sup>[2]</sup>方法

设矢量  $\nu = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 假定  $x_i \in \nu$  的概率  $p_i = P(x_i)$ , 则  $\nu$  的信息熵可定义如下:

$$E(\nu) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i). \quad (1)$$

信息熵最初由香农给出,它表示为随机变量的概率分布函数.

信息熵主要具有下列特性:对称性、非负性、确定性、扩展性、可加性及极值性等. 在这些性质中,对图像检索造成影响的主要是熵的对称性问题,因此这里我们仅仅讨论熵的对称性. 熵的对称性可表述为:矢量各分量的次序任意改变时,熵值不变,熵函数的取值只与概率分布有关.

John Zachary<sup>[2]</sup>中,图像的颜色直方图被看成概率密度函数,假设  $h_i$  表示被量化颜色  $i$  的像素在整幅图像中所占的百分比,从而图像的信息熵可表示为

$$E(H) = -\sum_{i=1}^n h_i \log_2(h_i). \quad (2)$$

从而,图像的直方图特征由  $n$  维降到一维. 在取得图像的信息熵后,John Zachary 即利用该特征及  $L_1$ -norm 距离来进行图像间的相似性度量,图像间的距离描述为

$$D_{L_1\text{-norm}}(p, q) = |E(p) - E(q)|. \quad (3)$$

其中,  $p, q$  表示任意两幅图像.

### 1.2 改进方法

考虑到熵的对称特性,对于完全不同的颜色直方图,如果它们具有相同的概率分布,则它们就具有相同的信息熵. 文献[2]完全没有考虑熵的对称性对图像检索造成的影响,这里,我们提出采用加权熵来解决这个问题.

设  $H$  表示某幅图像的颜色直方图,我们采用某种排序方法(如冒泡排序)将直方图  $H$  由小到大(或从大到小进行排序,假设排序后的颜色直方图为  $H'$ ,在排序过程中元素的移动次数记为  $m$ . 由熵

的对称性可知,直方图  $H$  和  $H'$  具有相同的信息熵,因此这种排序不会造成图像信息熵的改变. 为了消除熵的对称性对检索图像时造成的影响,我们引入了加权函数  $f(x)$ , 加权函数的定义如下:

$$f(x) = 1 + \frac{m_x}{m_{\max}}. \quad (4)$$

其中,  $x$  表示任意一幅图像,  $m_x$  表示图像  $x$  的颜色直方图经过排序后,直方图元素所移动的次数,  $m_{\max}$  表示排序时,直方图元素需要移动的最大次数,即对逆序直方图进行排序时所需要移动直方图元素的次数.

采用加权函数后,我们定义图像信息熵间的距离为

$$D_{L_1\text{-norm}}^w(p, q) = \begin{cases} |f(p) \times E(p) - f(q) \times E(q)| & \text{if } |E(p) - E(q)| < \alpha_1 \text{ and } |m_p - m_q| > \alpha_2 \\ |E(p) - E(q)| & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

其中上标  $w$  表示图像的全局信息熵. 如果  $|E(p) - E(q)| < \alpha_1$  ( $\alpha_1$  为事先指定的阈值),按照文献[2]的方法,  $p, q$  将被看作相似图像. 本文进一步判断  $|m_p - m_q|$  的取值,若  $|m_p - m_q| > \alpha_2$  ( $\alpha_2$  为事先指定的阈值),表明两幅图像虽然具有近似的信息熵,但两幅图像的颜色直方图却差别很大,因此不能看作相似的图像. 此时采用加权函数用于增大两幅图像间的距离. 在其它情况下,根据熵的唯一性原则,熵不同则直方图的概率分布一定不同,此时采用两幅图像信息熵的差即可进行有效的鉴别.

文献[2]在计算图像的信息熵时,对图像的颜色进行了量化处理,由于颜色量化可能将视觉不同的颜色量化到同一区间,也可能将数视觉相同的颜色量化到不同的区间. 为此,本文对彩色图像的3个颜色通道分别进行上述处理,这样消除了由于颜色量化所带来的负面影响. 最后,我们将图像的颜色特征降为一6维矢量,记为  $E^w$  (其中3个为不同颜色通道的全局信息熵,其余3个为颜色通道直方图排序后元素移动的次数).

## 2 图像的空间分布熵

上文所述的图像信息熵完全不包含图像的空间信息,为了提取图像的空间信息,本节提出了一个新的图像颜色空间分布信息的表示方法.

### 2.1 图像空间划分

设  $(p_{xy})_{C \times R}$  是大小为  $C \times R$  的一幅图像,这里  $p_{xy}$  表示像素  $(x, y)$  的颜色,设  $U = \{(x, y), 1 \leq x \leq R; 1 \leq y \leq C\}$ . 假设彩色图像某一颜色通道对应的颜色

数为  $N$ ,  $B_1, B_2, \dots, B_N$  为对应的颜色值. 令  $S_q = \{(x, y) | (x, y) \in U, p_{xy} = B_q, 1 \leq q \leq N\}$ , 事实上  $S_q$  即为颜色值为  $B_q$  的像素集合.

设  $C^q = (x^q, y^q)$  为  $S_q$  的质心, 这里  $x^q$  和  $y^q$  定义为

$$x^q = \frac{1}{|S_q|} \sum_{(x,y) \in S_q} x, \quad y^q = \frac{1}{|S_q|} \sum_{(x,y) \in S_q} y. \quad (6)$$

其中,  $|S|$  表示集合  $S$  中元素的个数. 令  $r^q = \max(x, y) \in S_q (\sqrt{(x-x^q)^2 + (y-y^q)^2})$  为  $S_q$  的半径.

在对图像区间的划分上, 文献[9]采用等距划分的方法, 对于给定的一个正整数  $M$ , 把半径分为  $M$  等级, 然后以质心  $C^q$  为圆心, 以  $kr^q/M$  为半径 ( $1 \leq k \leq M$ ) 画圆可得到  $M$  个环. 那么由内至外每个环和  $S_q$  的交点把  $S_q$  分为  $R_{q1}, R_{q2}, \dots, R_{qM}$ . 我们称  $R_{q1}, R_{q2}, \dots, R_{qM}$  为  $S_q$  的一个分割, 如图 1(a) 所示.

一般来说, 具有相同颜色的像素点围绕其质心的分布密度会随着它们同质心间距离的增大而逐渐减小, 也就是说, 离质心的距离越远, 具有相同颜色的像素的分布越稀疏. 因此, 文中对图像区间的划分时采用以质心  $C^q$  为圆心, 以  $d^m$  为半径画圆, 其中  $d = 2, 3, \dots, r^q, m = 1, 2, \dots, \lceil K \rceil$ , 其中,  $K = \log_d r^q$ ,  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整. 这样整个区间被划分为  $\lceil K \rceil$  个环, 设环由内向外计数, 最内的环为 1, 最外的环为  $\lceil K \rceil$ , 如图 1(b) 所示. 这样在不至于影响提取图像空间信息的基础上, 减少所划分环的数目, 降低了计算的复杂度.

设  $|R_{ij}|$  表示  $S_i$  的第  $j$  个圆环中颜色为  $B_i$  像素统计个数,  $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq \lceil K \rceil$ . 由此得到的直方图 ( $|R_{i1}|, |R_{i2}|, \dots, |R_{i\lceil K \rceil}|$ ) 称为颜色  $B_i$  的空间颜色直方图 (当  $d = r^i$  时为传统的直方图). 由于每个直方图子集的质心和环形分割具有平移和旋转不变性, 因此修整后的空间颜色直方图同样具有平移和旋转不变性. 由于图像的空间分布直方图为一个  $N$

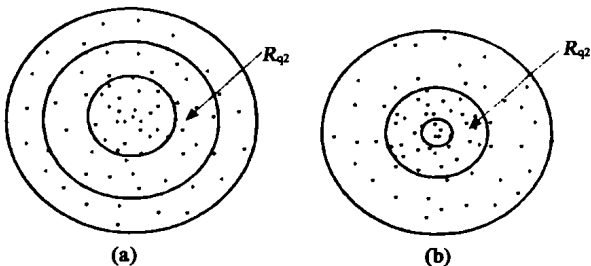


图 1 平面点集环形分割图 (a) 等距分割 (b) 非等距分割

Fig. 1 Annular segmentation of the set points (a) segmentation with equal distance (b) segmentation with unequal distance

$\times \lceil K \rceil$  的矩阵, 因此我们亦可采用上文提出的信息熵对空间特征进行降维处理.

## 2.2 空间分布熵

设  $P_{ij} = |R_{ij}|/|R_i|$  表示颜色  $B_i$  在环  $j$  中分布的概率密度, 其中  $|R_i|$  表示  $S_i$  中颜色为  $B_i$  的所有像素的个数. 根据上文熵的定义, 颜色  $i$  的空间分布熵可表示为

$$E_i^s = - \sum_{j=1}^{\lceil K \rceil} P_{ij} \log_2(p_{ij}). \quad (7)$$

其中, 上标  $s$  表示颜色的空间分布熵.

在解决由于熵的对称性对图像检索效果所造成的影响时, 如果采用上文的方法, 对于每一个信息熵就需要保存该信息熵所对应的直方图在排序时元素移动的次数, 由于图像包含多种颜色 (即使对颜色进行了量化), 因此采用上述方法, 图像特征的维数将增为原来的 2 倍. 因此, 文中又提出了一种新的方法, 该方法充分考虑了人类的视觉特性在不增加图像特征维数的前提下, 克服了由于熵的对称性所带来的负面影响.

在人眼看来, 对于具有相同颜色的像素在空间的分布来说, 若该颜色的像素在空间中的分布越集中, 则该种颜色对人的视觉刺激越大; 相反, 若该颜色的像素点在空间中的分布越分散, 则对人眼的视觉影响越小. 对于熵来说, 熵越大表明具有某颜色的像素点在图像空间的分布越分散, 因此对人眼的视觉刺激越小, 熵越小表明具有某颜色的像素点的图像空间的分布越集中, 因此对人眼的视觉刺激越大.

为此, 在计算图像空间分布熵时, 引进权函数  $g(j)$  ( $j$  表示不同的环形区间) 来反映不同环形区间对图像内容 (人眼视觉的刺激程度) 的贡献程度. 结合人类的视觉特征及熵的特性, 权函数的设置满足: 距离质心越近的区间应赋予较小的权值, 距离质心较远的区间应赋予较大的权值. 由于不同的环形区间引入不同的权值, 这样就消除了由于空间分布熵相近而空间分布直方图不同对检索结果带来的影响, 从而有效的解决了熵的对称性所带来的影响. 加权的图像空间分布熵可表示如下

$$E_i^s = - \sum_{j=1}^{\lceil K \rceil} g(j) P_{ij} \log_2(p_{ij}). \quad (8)$$

经过上述处理, 图像的空间分布熵降为  $N$  维矢量, 如果将  $N$  维矢量的每一元素均看为随机分布的, 由概率论可知某矢量的概率分布可唯一的由它的矩来表示. 这里我们采用空间分布熵矢量的一阶矩及二阶中心矩来表示. 则

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i^s, \quad \sigma = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i^s - \mu)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

这样图像的空间分布熵矢量被降为 2 维. 从而采用  $L_1$ -norm 距离, 两幅图像空间分布熵间的距离可表示为

$$D_{L_1\text{-norm}}^i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \omega_1 |\mu_p - \mu_q| + \omega_2 |\sigma_p - \sigma_q| \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{p}, \mathbf{q}$  表示任意两幅图像,  $\omega_1, \omega_2 \in [0, 1], \omega_1 + \omega_2 = 1$ .

同时, 我们也可对彩色图像的 3 个颜色通道分别进行处理, 求出每一通道的颜色空间分布熵矢量, 我们将得到一个 6 维的彩色图像空间分布熵矢量, 记为  $E^c$ .

### 3 相似性度量

在利用图像的信息熵及空间分布熵进行图像检索时, 我们仍采用  $L_1$ -norm 距离进行图像间的相似性度量, 图像间的距离描述为

$$D_{L_1\text{-norm}}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \beta_1 D_{L_1\text{-norm}}^w(\mathbf{p}, \mathbf{q}) + \beta_2 D_{L_1\text{-norm}}^i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \quad (11)$$

其中,  $\beta_1, \beta_2 \in [0, 1], \beta_1 + \beta_2 = 1$ .

### 4 试验结果

为了检验算法性能, 我们分别进行了几组不同的试验. 试验中采用的图像库包含 2270 幅各类不同的彩色图像, 它们包括交通工具、动物、建筑物、自然景观物等类型的图像. 在对彩色图像的三通道色进行处理时, 我们采用 HSV 颜色空间.

同时, 我们将本文算法同 John Zachary<sup>[2]</sup>的方法及颜色直方图方法<sup>[1]</sup>进行对比. 在计算图像的信息熵时, 取  $\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = m_{\max}/10$ , 在对图像进行区间划分时, 取  $d = 2$ , 在计算图像的空间分布熵时, 取权函数  $g(j) = j$  在进行图像间的距离度量时, 取  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5, \beta_1 = 0.7, \beta_2 = 0.3$ . 我们选择冒泡排序对图像每一通道的颜色直方图按照由小到大进行排序. 对于参与对比的直方图方法, 试验中采用 RGB 颜色空间, 且图像的颜色被量化为 64 色.

我们在图像库中选取 6 类图像组成检索集来检验核算法的检索效果, 并采用“精确度 (precision)”和“检索率 (recall)”<sup>[10]</sup>作为算法检索效果的评价标准. 其中, 精确度定义为检索结果队列中检索的目标图像数与队列中的图像数之比, 即

$$\text{precision} = R/a \quad (12)$$

检索率定义为检索结果队列中检索的目标图像数与数据库中全部的目标图像数之比, 即

$$\text{recall} = R/b \quad (13)$$

这里  $a$  代表检索结果返回的图像总数,  $R$  代表查询结果中与例子图像相关的目标图像数,  $b$  表示图像库中与例子图像相关的目标图像总数. 对于不同图像检索算法, 在相同的检索率条件下检索的精确度越高则表明该算法的检索效果越好.

我们从每类图像中分别抽取 3 幅图像来进行检索, 总共形成 18 次检索结果, 并取 18 次检索结果精确度和检索率的平均值作为算法的平均检索结果. 图 2 给出了本文算法同其它方法在“精确度”和“检索率”上的对比曲线. 其中,  $W(+)$  表示利用本文改进的求取信息熵的方法进行检索;  $W$  表示文献[2]采用的方法, 但稍有不同, 由于试验中发现, 如果对图像的颜色进行量化, 然后采用图像的信息熵进行检索, 检索效果很不理想, 因此试验中对图像的 3 个颜色通道分别按文献[2]的方法求取其信息熵, 然后进行检索;  $S\&W(+)$  表示结合信息熵与空间分布熵进行图像检索. 由图 2 可以看出采用改进的图像信息熵进行图像检索, 其检索效果明显优于未改进的方法; 同时还可看出, 结合信息熵与图像的空间分布熵进行检索, 其检索效果优于直方图的方法, 而其特征的维数还不足直方图特征维数的 1/5.

为了进一步检验本文算法的性能, 我们采用更客观的方法 ANMRR (average normalized modified retrieval rank)<sup>[10]</sup>进行评测. 设  $T(Q_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, u$ ) 表示图像库中与图像  $Q_i$  相似的所有图像数目, 对于任意的例子图像  $Q$ , 设  $t = \max\{T(Q_1), T(Q_2), \dots, T(Q_u)\}, l = \min\{4T(Q), 2t\}$ , 与例子图像相似的图像在检索结果序列中所处的位置为

$$\text{rank}(k) = \begin{cases} k, & k \leq l \\ l + 1, & k > l \end{cases} \quad (14)$$

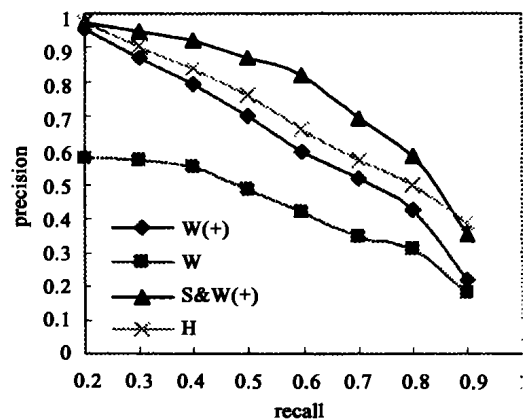


图 2 4 种方法检索率与精确度平均变化曲线  
Fig. 2 Average recall and precision graphs for four methods

表 1 4 种方法 ANMRR 计算结果  
Table 1 Results of ANMRR for the four methods

算法	ANMRR
S&W(+)	0.1979
W(+)	0.3073
W	0.3956
H	0.2335

从而,ANMRR 定义如下,

ANMRR =

$$\frac{1}{u} \sum_{i=1}^u \frac{\sum_{k=1}^{T(Q_i)} \frac{\text{rank}(k)}{T(Q_i)} - 0.5 - 0.5 * T(Q_i)}{l + 0.5 - 0.5 * T(Q_i)}. \quad (15)$$

表 1 给出了不同算法 ANMRR 的计算结果. 由该表亦可看出 W(+ )方法明显由于 W 方法,结合图像信息熵及空间分布熵进行检索,检索效果也优于直方图的方法.

实验中同时从特征提取时间复杂度和图像检索时间复杂度 2 个方面将本文算法与直方图方法的计算复杂度进行了比较. (1) 特征提取时间复杂度: 试验中在图像库中任意取 100 幅图像,提取图像信息熵及空间分布熵所需的平均时间为 123.69 s,提取图像直方图特征所需的时间为 12.98 s. (2) 图像检索时间复杂度: 实验采用从 1000 幅图像中检索出与例子图像相似的前 20 幅图像并显示,其中图像的索引特征已保存的不同的文件中. 本文算法的平均检索时间为 3.687 s,直方图方法的平均检索时间为 4.765 s. 从实验结果可以看出本文算法特征提取的时间复杂度的确大于直方图方法特征提取的复杂度,但图像检索的时间复杂度却小于直方图方法的图像检索复杂度. 由于在实际应用中,特征提取和图像检索往往是分开进行的,即事先提取图像的索引特征并保存到相应的数据中,图像检索是根据图像特征库来进行的. 因此,虽然本文算法在特征提取上具有较高的时间复杂度,但对图像的检索速度不会造成影响.

## 5 结语

本文提出了一种新的基于图像颜色及信息熵的

检索方法. 通过对熵的特性分析,提出了一种更为鲁棒的基于信息熵的图像检索的方法. 同时,结合信息熵及图像的划分方法,提出采用空间分布熵来表示图像颜色的空间分布信息,并提出一种新的改进方法来消除由于熵的对称特性对图像检索所造成的负面影响. 本文的方法不但提取了图像的颜色特征及空间分布特征,而且所提取的特征矢量具有较低的维数,减少了存储图像特征所需要的存储空间,同时加快了图像检索的速度. 试验结果表明本文方法在进行图像检索时是十分有效的.

## REFERENCES

- [1] Swain M J, Ballard D H. Color indexing[J]. *Int. J. on Computer Vision*, 1991,7(1):11—32.
- [2] John Z M. An information theoretic approach to content based image retrieval[D]. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Phd. Thesis, 2000, 45—62.
- [3] Pass G, Zabin R, Miller J. Comparing images using color coherence vectors[C]. In ACM International Conference on Multimedia. Boston:MA, 1996,65—73.
- [4] Hus W, Chua T S, Pung, H K. An integrated color-spatial approach to content-based image retrieval[C]. In Proc. 1995 ACM Multimedia Conf., San Francisco: United States 305—313.
- [5] Stehling R O, Nascimento M A, Falcao A X. On 'shapes' of colors for content-based image retrieval[C]. In the ACM Multimedia Conference, Los Angeles:2000,171—174.
- [6] Huang J. Image indexing using color correlograms[C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Juan;1997.762—768.
- [7] WANG Tao, HU Shi-Min, SUN Jia-Guang. Image retrieval based on color-spatial feature[J]. *Journal of Software* (王涛,胡事民,孙家广. 基于颜色—空间特征的图像检索. *软件学报*),2002,13(10):2031—2036.
- [8] Fauqueur J, Boujemaa N. Region-based image retrieval: Fast coarse segmentation and fine color description[J]. *Journal of Visual Languages and Computing (JVLC), Special Issue on Visual Information Systems*. 2004,15(1):69—95.
- [9] Rao A B, Srihari R K, Zhang Z F. Spatil color histogram for content-based retrieval[C]. Tools with artificial intelligence. *Proceedings of 11<sup>th</sup> IEEE International Conference*. Washington, DC:United States, 1999, 183—186.
- [10] Lee H Y, Lee H K, Ha Y H. Spatial color descriptor for image retrieval and video segmentation[J]. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2003,5(3),358—367.