

基于位平面分布熵的图像检索算法

赵 珊 崔江涛 周利华
(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

摘 要: 该文针对利用颜色直方图检索时存在的问题, 提出了一种基于位平面分布熵的图像检索算法。首先将图像分解为 8 个位平面, 然后采用对表征图像结构特征有意义的 4 个位平面的信息熵组成的熵矢量来多层次地对图像特征进行描述。为了避免图像中像素灰度值的微小变化对位平面的影响, 又提出了采用位平面的灰度码表示方法。同时, 考虑到位平面间的相关性, 设计了相关权值矩阵, 并采用马氏距离进行相似性度量。实验结果表明, 该算法具有较高的检索率。

关键词: 基于内容的图像检索; 位平面; 灰度编码; 信息熵

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0795-05

Image Retrieval Based on Bit-plane Distribution Entropy

Zhao Shan Cui Jiang-tao Zhou Li-hua
(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, 710071 China)

Abstract: The content-based image retrieval on histogram is analyzed and a novel image retrieval algorithm is proposed based on bit-plane distribution entropy. Firstly, the image is divided into eight bit-planes by the image bit-plane-code. Then, an entropy vector is constructed by computing the entropy of the four significant planes which contain most of the structural information of the image. Meantime, the gray-code of bit-planes is used to avoid the effect of changes in the image intensity values on bit-planes. Finally the Mahalanobis distance is adopted to measure the similarity because of the correlation between the concerned vectors after designing the correlation-weighted matrix. Experimental results show that the proposed method has sound retrieval performance.

Key words: Content-based image retrieval; Bit-planes; Gray-code; Information entropy

1 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^[1], 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)对于图像颜色的量化处理, 很容易造成误检现象; (3)特征维数过高。尤其对于大型图像数据库的检索, 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时存在的问题, John Zachary^[2]提出采用信息熵描述图像的颜色特征, Huang^[3]提出采用颜色相关图的方法来描述不同颜色的像素按照空间距离在图像空间的分布特征, 文献^[4]提出采用单元熵来提取图像的空间信息, 另外还有CCV^[5]方法、局部直方图法^[6,7]方法等。这些方法虽然在一定程度上有效地提取了图像颜色的空间分布信息, 但仍然存在颜色量化的问题, 没有从根本上解决利用直方图进行检索时存在的问题。而且也没有考虑图像中像素间的冗余信息对检索复杂度的影响, 因此不利于对图像特征的多方位描述。

基于上述思想, 受文献^[8]的启发, 本文提出了一种基于位平面分布熵的图像检索算法。首先利用位平面分解的方法, 将图像分成 8 个位平面, 然后提取出对表征原图像特征有意义的 4 个位平面来计算图像的分布熵。同时, 为了避免图像中像素灰度值的微小变化对位平面复杂度的影响, 提出采用位平面的灰度码表示方法。最后设计了相关矩阵, 采用马氏距离进行相似性度量。该算法利用图像的位平面来提取图像的空间分布特征, 不但解决了颜色量化的问题, 而且提取的特征矢量维数也较小。这在一定程度上解决了颜色直方图检索时存在的问题, 在提高检索精度的同时也加快了检索速度。实验结果表明该算法是有效的。

2 图像的特征描述

2.1 图像的信息熵

将图像的像素灰度值(取值为[0,255])表示为集合 \mathbf{A} , 对于自然图像, 具有不同灰度的像素在图像中出现是随机的, 出现的概率是相互独立的。假设具有灰度 m 的像素点在图像中出现的概率为 p_m , 该灰度的信息熵可定义为:

$$H(p_m) = -p_m \log(p_m) \quad (1)$$

其中 $0 \leq m \leq 255$ 。若将不同灰度的熵的累加和定义为图像的信息熵, 则对于灰度图像, 图像的信息熵可定义为:

$$E = \sum_{m=0}^k H(p_m) = -\sum_{m=0}^k p_m \log(p_m) \quad (2)$$

其中 $k = 255$, p_m 表示整幅图像中灰度为 m 的像素出现的概率。

由图像信息熵的定义可知, 图像的信息熵体现了图像全局的统计特性, 只与图像中各灰度出现的概率有关。具有相同信息熵的图像可能在视觉上是完全不同的, 所以图像的全局信息熵不足以反映出图像间的差异。为此, 本文引入位平面分布熵的概念, 采用位平面分解的方法将图像分解为多个位平面, 提取每个位平面图像的熵来组成的一个矢量。利用位平面的概念来引入了图像的空间分布信息, 故可以很好地区分熵相同而空间分布不同的图像。

2.2 位平面和位平面分解

一幅灰度图像可以表示为一个介于 $[0, 255]$ 的整数组成



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

图1 图1(a)及其分解得到的8个位平面

的 $N \times M$ 矩阵, 其中每个元素表征了图像中相应位置像素的灰度值。如果用一个 8 位的二进制向量 $(b_7, b_6, b_5, b_4, b_3, b_2, b_1, b_0)$ 来表示每个像素的灰度值 ($b_i (i = 0, 1, \dots, 7)$ 为 0 或 1), 一幅灰度图像就可以被看作是 8 个位平面的叠加, 每个位平面被看作是一幅二值图像, 用一个大小为 $N \times M$ 的二进制矩阵表示。借助图像的位面表示形式可以采取对图像特定位面的操作来达到对图像特征描述的目的。如图 1 所示, 图 1(a) 是一幅 8bit 灰度级的图像, 图 1(b) 到图 1(i) 是它的 8 个位平面 (从高位面到低位面)。从图中可以看出, 每个位平面都能够反映图像的频率和方向在局部范围内的变化强度, 而且低位面图比高位面图复杂, 包括的细节多, 也更随机。

采用这种方法来分解位平面存在一个缺点, 即像素点灰度值的微小变化会对位平面的复杂度产生较明显的影响。例如, 当空间相邻的 2 个像素的灰度值分别为 127 (01111111_2) 和 128 (10000000_2) 时, 图像的每个位平面上在这个位置处都会有从 0 到 1 (或从 1 到 0) 的过渡。为减小这种影响, 算法中采用灰度码的方法来表示位平面。 m bit 图像的灰度码可由下式计算:

$$g_i = \begin{cases} a_i \oplus a_{i+1}, & 0 \leq i \leq m-2 \\ a_i, & i = m-1 \end{cases} \quad (3)$$

其中 \oplus 代表异或操作。 a_i 表示位平面分解得到的第 i 个位平面, g_i 指位面 a_i 的灰度码表示。这种码的独特性质是相连的码字只有 1 个比特位的区别, 这样, 像素点灰度值的小变化就不会影响所有的位平面。仍考虑上述空间相邻的 2 个像素的灰度值分别为 127 和 128 的例子, 如用式 (3) 的灰度码来表示的话, 这里只有位平面 7 有从 0 到 1 的一个过渡, 其它位平面没有变化。此时对应 127 和 128 的灰度码分别是 01000000_2 和 11000000_2 。图 2 给出了图 1 中 (a) 图灰度码表示的位平面图 (从高位到低位)。可以看出, 用灰度码表示的位面图复杂度较低, 但具有视觉意义信息的位面图数量更多。

众所周知, 仅仅使用一幅图像的高位部分就可以表示整幅图像的内容, 但是, 图像在不同的位平面有着不同的分布特性, 如果只选择其中的一个位平面, 可能对图像不能进行很好的描述。从图 1 和图 2 可以看出, 只有最高的几个位面包含了视觉可见的有意义信息, 体现了明显的图像结构特征, 其它低位面的信息随机性很强, 只增加图像的亮度信息。因此在算法中, 只使用图像高位的 4 个平面来提取图像特征。由于位平面是一系列二值图像, 对原始图像灰度值的变化非常敏感, 噪声对其有较大的影响, 因此在进行特征提取之前, 需要采用中值滤波器对图像进行平滑处理。

2.3 熵矢量特征的提取

为表征图像的特征, 算法中定义了一个四维的矢量。

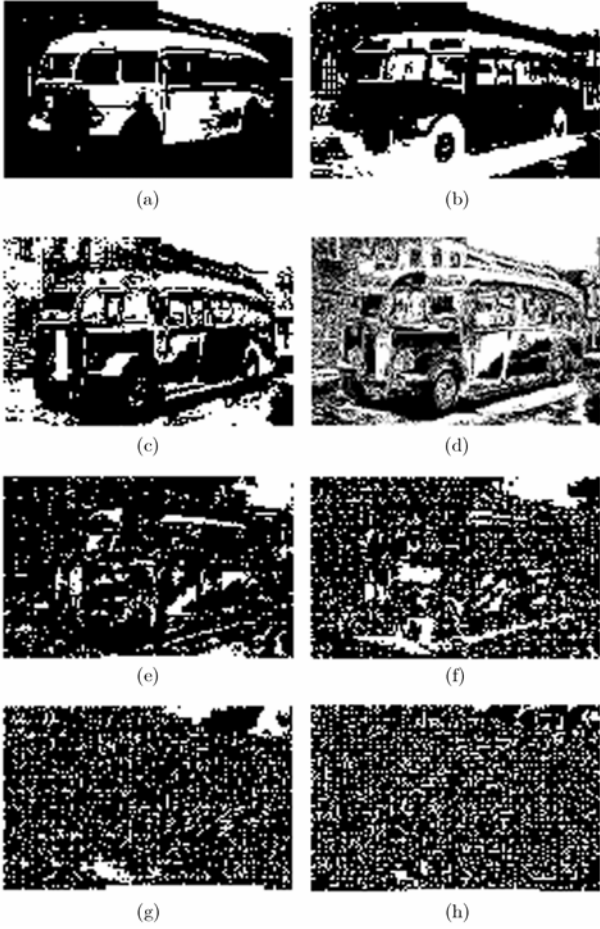


图2 利用灰度码表示的位平面图

通过位平面分解得到图像最高的4个位平面 (a_7, a_6, a_5, a_4) , 并转换成它们对应的灰度码表示的位面 (g_7, g_6, g_5, g_4) , 然后利用式(2), 计算每个位平面的信息熵。由于位平面为二值图像, 所以式(2)可简化为:

$$E = -p_1 \log p_1 - p_0 \log p_0 \quad (4)$$

其中 p_1, p_0 是图像中灰度值为1或0的像素出现的概率, 且 $p_0 + p_1 = 1$ 。

位平面分布熵, 和图像的全局信息熵一样, 具有旋转不变性、尺度不变性和平移不变性, 对图像的几何形变具有很强的鲁棒性。同时, 由于各个位面实际上是提取了原图像中各个像素的灰度值的某一位形成的, 因此, 避免了直方图中颜色量化所带来的问题, 而且也包含了图像像素的空间分布信息, 解决了熵相同而图像不同的问题。而且位平面分布熵的计算复杂度较低且维数较少, 可以满足图像检索中存储容量和检索速度的要求。

3 相似性度量

本文算法中, 由于位平面之间存在很强的相关性, 使得提取的熵矢量也存在较强的相关性, 如果简单地用欧氏距离来求相似度, 相似的图像间特征的距离可能相差很大。因此

这里采用马氏距离(Mahalanobis distance)^[9]来度量图像间的相似性。

在 R^4 空间中, 设两幅图像 P 和 Q 提取的特征向量为 $P = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ 和 $Q = (y_1, y_2, y_3, y_4)$, 则向量间的距离为,

$$D(P, Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 w_{ij}(x_i - y_i)(x_j - y_j)} \quad (5)$$

这里权值 $w_{ij} > 0$, 表征了特征间的相关性。权值的计算可以通过计算一个 4×4 维的正定矩阵 Γ , 使得

$$D(P, Q) = \sqrt{(P - Q)\Gamma(P - Q)} \quad (6)$$

在这里, 定义向量 P 的协方差矩阵为:

$$\Delta(i, j) = \begin{cases} x_i \text{的方差}, & i = j \\ x_i \text{和} x_j \text{的协方差}, & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

该矩阵可以很好地体现特征向量间的相关性及其分布特征, 因此在这里我们取 $\Gamma = \Delta^{-1}$ 作为权值矩阵来计算向量间的相似性, 则两个向量间的距离为:

$$D(P, Q) = \sqrt{(P - Q)\Delta^{-1}(P - Q)} \quad (8)$$

4 实验结果及分析

为验证本文算法的有效性, 本文分别进行了几组不同的实验。实验中采用的图像库包含3000幅从国际上通用的Corel图像库中抽取的30类不同的彩色图像, 它们包括人物、交通工具、动物、建筑物、自然景物、花卉等类型的图像。在利用本文算法对彩色图像处理时首先采式(9)将其转化为灰度图像, 然后再进行检索实验。

$$I = 0.3R + 0.59G + 0.11B \quad (9)$$

文中采用“精确度(precision)”和“检索率(recall)”^[10]作为相似检索的评价准则。对于不同的图像检索算法, 在相同的检索条件下检索的精确度越高表明该算法的检索效果越好。

首先, 为确定最佳的四个位平面来计算分布熵, 分别对采用最高4个位平面 $g_7 - g_4$ 、最低4个位平面 $g_3 - g_0$ 和8个位平面中任选的4个位平面 $g_5 - g_2$ 三种情况的检索效率进行了实验。为了使实验的统计结果具有一般性, 选取的图像种类应足够多, 且具有多样性。因此, 实验中从每类图像中均选取5幅作为示例图像, 共组成150次查询, 取这150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3给出了3种方法在“精确度”和“检索率”上的对比曲线, 其中P7-P4表示采用 $g_7 - g_4$ 四个位平面的检索效果, P5-P2和P3-P0分别表示采用 $g_5 - g_2$ 和 $g_3 - g_0$ 两种方法取得的实验结果。可以看出, 由于最高的几个位面包含了视觉可见的有意义信息, 体现了明显的图像结构特征, 而低位面的信息随机性很强, 只增加图像的亮度信息, 因此在利用最高的几个位面时检索效果要比采用其它几个位面的情况好。

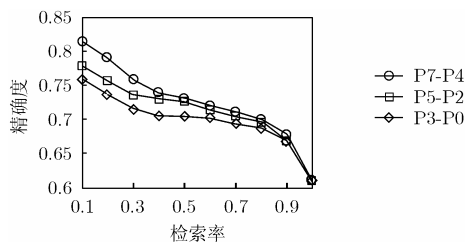


图 3 3 组不同的位平面选择方法的实验结果

同时,为验证马氏距离的有效性,在实验中对最后的相似性度量方法也进行了对比实验。图 4 给出了采用本文算法提取特征后分别利用欧氏距离和马氏距离来进行相似性度量实验其中的一次检索结果,其中最左边的一幅为示例图像兼检索结果,随后为检索结果图像队列,从左到右相似度由大到小排列。由实验结果可以看出,和欧氏距离相比,由于马氏距离考虑了特征矢量之间的相关性,虽然计算量有些偏大,但最后的检索效果却优于欧氏距离,检索结果更符合人的视觉特性。因此在算法中采用马氏距离也具有合理性。

最后,为验证本文所提算法整体的有效性,在实验中还将本文算法同颜色直方图算法及颜色自相关图算法进行了对比,图像的颜色均匀量化为 64 色,同时,采用直方图相交法作为相似性度量准则,颜色相关图方法中取 $d = 4$ 。我们从图像库中任意取出 5 类,每类图像中选取 8 幅图像作为

示例图像,共组成 40 次查询,取这 40 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 5 给出了本文算法同其它两种算法的 P-R 对比曲线,其中, BDE 表示本文算法, CC 表示颜色相关图方法, H 表示直方图方法。由实验结果可以看出由于算法中考虑了颜色的空间分布信息,效率明显优于直方图算法,同颜色自相关图方法相比,由于去除了像素间冗余信息的影响,效果也较好。同时,由于本次实验中采用的图像种类较少,造成的误检情况会降低,因此利用本文算法的检索效率要比图 4 中 P7-P4 要好一些。

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)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, $t = \max\{T(Q_1), T(Q_2), \dots, T(Q_u)\}$, $l = \min\{4T(Q_i), 2t\}$, 设与例子图像相似的图像在检索结果序列中所处位置为:

$$\text{rank}(k) = \begin{cases} k, & k \leq l \\ l + 1, & k > l \end{cases} \quad (10)$$

从而, ANMRR 定义如下

$$\text{ANMRR} = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u \frac{\sum_{k=1}^{T(Q_i)} \frac{\text{rank}(k)}{T(Q_i)} - 0.5 - 0.5T(Q_i)}{l + 0.5 - 0.5T(Q_i)} \quad (11)$$



(a) 马氏距离的实验结果



(b) 欧氏距离的实验结果

图 4 两种不同的相似性度量方法的实验结果

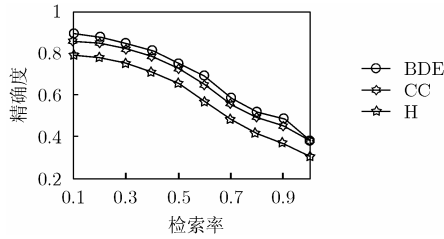


图 5 3 种算法“检索率”和“精确率”对比曲线

表 1 给出了不同算法 ANMRR 的计算结果。由该表也可以看出本文方法优于其它两种方法。

表 1 3 种方法 ANMRR 计算结果

算法	ANMRR
本文算法	0.1877
颜色相关图算法	0.2019
直方图算法	0.3375

5 结束语

本文提出了一种基于位平面信息分布熵的图像检索算法, 利用位平面分布熵对图像进行多层次的描述。同时采用位平面的灰度码表示来避免像素灰度值的微小变化对位平面复杂度的影响。利用位平面分解, 不仅可以提取图像的空间分布信息, 而且通过将图像灰度值分布到几个位面的方式, 降低了图像像素间的冗余度, 也避免了颜色量化时存在的问题。利用位平面分布熵来描述图像特征, 降低了图像特征提取算法的复杂度以及图像特征的维数, 同时对各种几何形变也具有很强的鲁棒性。实验表明该算法具有较好的检索效果, 且易于实现。

参 考 文 献

[1] Swain M J and Ballard D H. Color indexing. *Int.J. on Computer Vision*, 1991, 7(1):11-32.

[2] John Z M. An information theoretic approach to content-based image retrieval[PHD]. Louisiana State University and

Agricultural and Mechanical College, 2000: 45-62.

[3] Huang J. Image indexing using color correlograms. *IEEE Computer Society Conference on Computer Visoion and Pattern Recognition*. San Juan:1997,762-768.

[4] 孙君顶, 毋小省, 周利华. 基于信息熵的图像检索. *西安电子科技大学学报*, 2004, 31(2): 223-228.

[5] Pass G, Zabin R, and Miller J. Comparing images using color coherence vector. In *ACM International Conference on Multimedia*, Boston: MA, 1996: 65-73.

[6] Hus W, Chua T S, and Pung H K. An integrated color-spatial approach to content-based image retrieval. In *Proc. of 1995 ACM Multimedia Conf*, San Francisco, United States, 1995: 305-313.

[7] Stehling R O, Nascimento M A, and Falcao A X. On 'shapes' of colors for content-based image retrieval. In the *ACM Multimedia Conference*, Los Angles, 2000: 171-174.

[8] Arijit Bishmu, Bhargab B. Bhattacharya, and Malay K.Kundu, *et al.* Euler vector for search and retrieval of gray-tone images. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-part B: Cybernetics*, 2005, 35(4): 801-812.

[9] Anderson T W. *An Introduction to Multivariate Statistical Analysiys*. New York: Wiley, 2003, chapter3.

[10] Smeulders A W, Santini S, and Worring M, *et al.* Content based image retrieval at the end of the early years. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(12): 1349-1380.

赵 珊: 女, 1975 年生, 博士生, 研究方向为基于内容的图像检索、网络多媒体、多媒体应用。

崔江涛: 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 研究方向为基于内容的图像检索、高维索引。

周利华: 男, 1942 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为分布式多媒体系统、网络多媒体、信息安全等。