

基于小波变换的彩色自然 图像数据库自动检索*

刘建峰¹⁾ 李春茂²⁾ N. T. Thao³⁾ 戚飞虎¹⁾

¹⁾美国朗讯科技有限公司贝尔实验室, 上海研究中心, 上海, 200030;

²⁾香港科技大学计算机系, 中国, 香港;

³⁾香港科技大学电子与电机工程系, 中国, 香港;

⁴⁾上海交通大学计算机系, 上海, 200030)

TP311.13

TP391.41

摘要 针对彩色自然图像数据库, 提出了一种新的基于小波帧包变换的自动检索方法。该方法有效结合了纹理信息和颜色信息, 克服了以往方法将低层特征孤立起来的缺陷。同时, 图像检索过程以渐进的方式进行。本文方法无论在检索效率及检索准确率上都能获得好的效果。

关键词 纹理, 颜色, 小波帧包, 渐进检索。

小波变换 彩色自然图像数据库
自动检索

AUTOMATIC RETRIEVAL OF COLORED NATURAL IMAGE DATABASE BASED ON WAVELET*

LIU Jian-Feng¹⁾ John C. M. LEE²⁾ N. T. THAO³⁾ QI Fei-Hu¹⁾

¹⁾Bell Labs China, Lucent Technologies Co. Ltd., Shanghai 200030, China;

²⁾Department of Computer Science, Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong, China;

³⁾Department of Electrical and Electronic Engineering, Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong, China;

⁴⁾Department of Computer Science, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract This paper proposes a novel wavelet frame packet analysis approach for automatic retrieval of images in a colored natural image database. The approach effectively combines both the texture and color information and retrieve images in a progressive way. It can produce good performance in terms of both retrieval efficiency and retrieval effectiveness.

Key words texture, color, wavelet frame packet, progressive retrieval.

引言

基于内容的图像/视频数据库检索与索引近年来越来越受到重视。在彩色自然图像中, 纹理信息是重要的低层特征, 因此纹理分析在彩色自然图像的检索与索引中起着至关重要的作用。

为进行纹理分析, 人们提出了不少方法, 其中时频分析方法是更为有效的一种^[1-3]。在文献[3]中, 我们提出了一种新的基于小波帧包分析的纹理分类方法, 并论证了该方法的优越性。然而, 包括小波帧包分析在内的纹理分析方法中, 都仅仅针对的是灰度级纹理图像。在彩色自然图像中, 还存在另一重要信息: 颜色。

如果检索过程中忽略颜色信息而仅仅考虑纹理信息的话, 检索结果往往会不尽人意。因此, 将纹理信息与颜色信息进行有机结合是提高彩色自然图像数据库检索效果的有效途径。

基于上述思想, 本文提出了一种基于小波变换的彩色自然图像数据库自动检索方法。该方法首先通过正交 Karhunen-Loeve 变换(KLT)将彩色 RGB 空间变换为 K-L 空间, 然后在 K-L 空间将图像进行多分辨率小波帧包分解, 并从分解后的子带图像上提取相应的纹理/颜色特征。最后, 根据这些特征的近似程度, 与样本图像相似的图片被逐一检索出来。由于小波帧包分解以自适应方式对纹理图像进行由粗分辨率到细分

* 朗讯贝尔实验室科研基金和香港科研基金(编号 DAG 98/97, EG26, HKUST 693/95E)资助项目
稿件收到日期 1999-07-14, 修改稿收到日期 1999-09-16

* The project supported by Bell Labs. Research Grant, and Hong Kong Research Grants Council
Received 1999-07-14, revised 1999-09-16

分辨率的分解,绝大多数差别较大的候选图像在粗分辨率上就可以通过排斥法排除在外,因此避免了不必要的进一步小波分解、特征提取及特征匹配,大大提高了检索效率,此外,为进一步提高检索效果,我们还采用了一种简单对称的距离尺度来度量图像的相似性。

1 小波帧包分析及 K-L 变换

1.1 小波帧包分析

小波变换多分辨率分析的思想为理解和处理信息提供了简单的多层框架,然而,小波变换的一个重要缺陷是:由于 2:1 取样,小波变换不具有平移不变特性,这种缺陷对于纹理来说是不希望有的,因为纹理具有平移不变性,为有效分析纹理,我们考虑将小波变换不进行 2:1 抽样,这样便得到平移不变性,我们称这种信号的冗余表达方式为小波帧,小波帧分解的数学描述可参见文献[3],可以证明,纹理经小波帧分解后,仍具有平移不变性。

除平移不变特性外,纹理还具有另一个重要特性,即准周期性,纹理的大部分信息都集中在中频部分,因此,仅在低频段递归地进行塔式分解对特征提取及分类并无太大的帮助,在本文方法中,我们提出将低频段和高频段同时进行分解,从而得到一系列小波包,与小波帧分解相结合,于是得到以下小波帧包分解基函数 $W_{2^n}^i(t)$ (其中 $i=0 \sim \infty, n=0 \sim 2^{i+1}-1$) 为

$$\begin{aligned} W_{2^n}^0(t) &= \sqrt{2} \sum_k h(k) W_n(t-2k), \\ W_{2^n}^i(t) &= \sqrt{2} \sum_k g(k) W_n(t-2k), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $h(k)$ 为低通滤波器系数, $g(k)$ 为满足完全重构条件的高通滤波器系数, $W_n(t)$ 为尺度函数, $W_n^i(t)$ 为母小波, i 为尺度因子, n 为振荡系数。

1.2 Karhunen-Loeve 变换

对多数彩色图像而言,所有颜色信息都表达为 3 维 RGB 空间上的向量,为提取有用的颜色特征,往往需要将 RGB 空间变换成其它颜色空间,虽然 HSV 变换非常适于入眼的视觉特性,然而,这类变换却容易产

生一些难以去除的奇异值,因而不适于进一步的变换及特征提取,为克服 HSV 变换的上述缺点,在本文方法中,我们提出对彩色空间进行以下 Karhunen-Loeve 变换:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.333 & 0.333 & 0.333 \\ 0.500 & 0.000 & -0.500 \\ -0.500 & 1.000 & -0.500 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

以上 K-L 变换将图像空间变换为正交空间,因此产生的 3 个分量在统计特性上是不相关的,变换不会产生奇异值,经 K-L 变换以后,分量 k_1 代表信号的亮度或强度,而 k_2 和 k 分别与色度有关。

2 基于小波帧包分析的彩色自然图像自动检索

已知用户指定的样本图像,如何从图像数据库中自动搜索出与样本相似的图像是一个颇具挑战性的课题,由于本文的目标是检索彩色自然图像,而彩色自然图像中最重要的两大特征是纹理与颜色,因此我们提出采用小波帧包分析的思想进行基于纹理及颜色的彩色自然图像自动检索。

当用户指定好待检索的样本图像后,首先,算法根据式(2)将样本图像及数据库中的图像从 RGB 空间变换到 K-L 空间,接着,在 K-L 空间上,每个分量都经小波帧分解,分别分解为 4 个子带信道,为避免不必要的全域分解,我们将能量 $e^i = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^N |x_{i,j,l} - \text{mean}(x_{i,j,l})|$ (M, N 分别为子带图像的宽与高, $\text{mean}()$ 表示取均值) 作为是否对每一个子带信道需作进一步分解的衡量标准,由于分量 k_1 对应于与纹理有关的亮度信息,因此,我们把 k_1 的能量作为确定小波帧树型分解结构的尺度,令 e_{min,k_1}^i 为 k_1 的 4 个子带信道中能量最大者, T 为预先设定的常量,于是,如果 k_1 的子带信道 i ($i=1 \sim 4$) 的能量 e_{i,k_1}^i 满足 $e_{i,k_1}^i \geq e_{\text{min},k_1}^i$, 则认为信道 i 中含有重要的信息,信道 i 被进一步分解,否则,信道 i 不再被进一步分解。

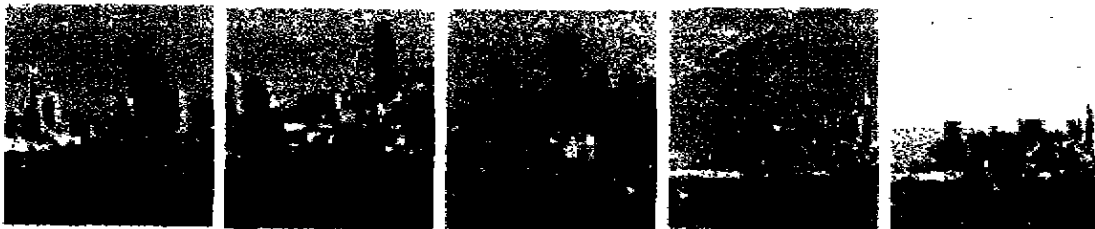


图 1 数据库中实际与城市图像 C1 相似的图像(从左至右: C1~C5)

Fig.1 Images in the database that are similar to city image C1 (from left to right: C1~C5)

对图像进行树型小波帧分解后,接下来便要进行特征提取了.为充分利用纹理与颜色信息,我们在每个子带信道上分别提取纹理信息、颜色信息、纹理与颜色的相关信息.具体地说,在每一次小波帧分解后,令某一分辨率下某个子带的系数为 $\{d_{m,n}^h\}$ ($i=1\sim 3, m\in[1, M], n\in[1, N]$),则对每一个子带信道,我们提取以下特征:

$$C^{hkj} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |(d_{m,n}^h - \text{mean}(d_{m,n}^h)) \cdot (d_{m,n}^h - \text{mean}(d_{m,n}^h))|. \quad (3)$$

从式(3)可以看到,当 $i=j$ 时, C^{hkj} 对应于 $k1$ (纹理)、 $k2$ 、 $k3$ (颜色)的方差,而当 $i\neq j$ 时, C^{hkj} 对应于纹理与颜色的相关性.为去除冗余度,我们对 C^{hkj} 进行如下归一化:

$$C^{hkj} = \begin{cases} C^{hkj}, & i = j \\ \frac{C^{hkj}}{C^{hkj} + C^{hik}}, & i \neq j \end{cases}$$

于是在每个子带信道上我们提取出6个特征值.

在检索过程中,我们采取了迭代分解的渐进检索方式.每当我们把信道分解为4个子带信道后,我们根据新的特征,计算数据库中特定图像与样本图像的距离.如果距离大于预定的门限距离 d_{max} ,则特定图像被视为不可能与样本图像相似,因此,该特定图像不再作进一步的分解或计算.只有那些在粗分辨率下与样本图像相似的图像得以保留下来,并被进一步分解以作更精细的特征比较.通过以下步骤,多数与样本图像差异较大的图像在粗分辨率下即被排除在考虑之外,避免了不必要的分解与计算.因此与进行子带全分解的方法相比,大大减少了计算费用,检索效率有了显著提高.

为度量图像的相似性,我们提出采用以下对称的距离尺度来度量相似性:

$$D_i = \sum_{i=1}^k \left| \frac{f_i}{f_i} + \frac{f_i}{f_i} - 2 \right|, \quad (4)$$

其中, f_i 和 f_i 分别为样本图像和待定图像的第 i 个特征, k 为特征总数, D_i 可以按文献[3]介绍的方法迭代

计算得到.为避免出现奇异值,我们在计算式(4)时对特征加一个很小的正值门限.

综上所述,我们的渐进搜索算法可概括为以下步骤:(1)在第一级小波帧分解后,计算样本图像与扫描到的待定图像的特征及其距离.若距离超过最大门限 d_{max} ,则将待定图像从待定图像表中删除.重复上述步骤,直到数据库中所有图像都被扫描到为止;(2)在下一个分解级,对所有保留在待定图像表中的图像重复上述步骤;(3)当分解到预定的最大分解级或所返回的相似图像数达到预先设定的最大值时,结束上述过程.将检索到的图像按图像相似度大小进行排列,并返回用户.

3 实验结果

我们在MIT研究室提供的VisTex彩色自然图像数据库上测试了本文的自动检索方法.在此,我们将检索准确率定义为:检索到的与样本图像相似的图像数与数据库中实际与样本图像相似的图像数的比值.同时,我们将检索效率定义为渐进检索过程中在每个图像上提取的特征数的平均值.实验中,我们将最大分解级数设为4,常量 T 设为0.06,返回的最多图像数设为20, d_{max} 的初值设为20,同时使 d_{max} 随分解次数的增加成正比地增加.

实验中,我们假定了用户指定的各种不同的待检索的样本图像,并在VisTex数据库上运行了我们的算法.图1、2及表1分别给出了我们的算法对图像数据库中城市及树皮进行自动检索的检索结果.图1中,待检索的样本图像为C1(图1中的第一幅图像,城市),而数据库中实际与C1相似的图像为5幅(如图1示).表1列出了运行我们的检索算法后以相似度递减顺序返回的检索图像.从表1可以看到,在返回的20幅图像中,所有5幅实际与C1相似的图像被列为与C1最相似的首5幅图像之列,检索准确率为100%,所需的平均特征数为24.图2中,待检索的样本图像为B1(图2中第一幅图像,树皮),数据库中实际与B1相似的图像



图2 数据库中实际与树皮图像B1相似的图像(从左至右:B1~B5)

Fig. 2 Images in the database that are similar to bark image B1 (from left to right, B1~B5)

表 1 采用本文方法后依相似度递减次序所返回的图像检索结果

Table 1 Retrieval results of the proposed algorithm in terms of returned images in decreasing order of similarity

Query Image	C1	B1
1st	C1	B1
2nd	C2	B2
3rd	C3	B3
4th	C4	B4
5th	C5	B5
...
20th	•	•

也是 5 幅(如图 2),由表 1 可知,与示例 1 类似,所有 5 幅实际与 B1 相似的图像被列为与 B1 最相似的首 5 幅图像之列,检索准确率同样也是 100%,需要的平均特征数为 27. 同样,对其它样本图像的测试结果表明,我们的自动检索算法检索准确率为 92% 以上(绝大部分接近 100%),所需的平均特征数普遍少于 30.

4 结论

本文提出了一种新的基于小波帧包分析的彩色自

然图像自动检索方法. 通过将彩色自然图像变换到 K-L 空间,对纹理和颜色信道分别进行树型小波帧分解,并在分解的子带信道上分别提取相应的纹理特征、颜色特征及纹理与颜色的相关特性,我们提取出的特征比单纯的纹理特征或颜色特征更具有代表性. 同时,在这些特征的基础上,我们还提出采用简单对称的特征相似度度量方法以及渐进检索步骤,因此,本文方法获得了好的检索效果及高的检索效率. 我们认为,将纹理与颜色信息有效结合并采用自适应多分辨率小波帧包分解方法是本文方法获得成功的主要原因.

REFERENCES

- [1] Smith J R, Chang S F. Transform features for texture classification and discrimination in large image database. *ICIP*, 1994, 3: 307-411
- [2] Unser M. Texture classification and segmentation using wavelet frames. *IEEE Trans. Image Processing*, 1995, 4 (11): 1549-1560
- [3] Liu J F, M Lee J C. An efficient and effective texture classification approach using a new notion in wavelet theory. *ICPR*, 1996, 2: 820-824