

基于双密度小波变换的纹理图像检索

尚赵伟¹, 张明新^{1,2}, 沈钧毅¹, 相明¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 兰州工业高等专科学校计算机工程系, 730050, 兰州)

摘要: 为了进一步提高纹理图像的检索性能, 提出了一种基于双密度小波变换算法. 该算法根据双密度小波分解变换的特点, 从系数角度出发首先对子带进行组合, 然后提取一阶和二阶统计矩并将结果作为纹理的特征用于图像检索. 由于组合双密度小波变换采用了过采样, 具有时移不变性, 所以据此生成的算法具有特征数少、检索精度高等特点. 对比实验结果表明, 该算法的检索精度比单小波和双密度小波变换分别提高了 10% 和 7%, 性能最好的是一阶和二阶统计矩组合的方法.

关键词: 双密度小波变换; 图像检索; 纹理图像

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 0253 987X(2005)10 1081 04

Texture Image Retrieval Based on Double Density Wavelet Transform

Shang Zhaowei¹, Zhang Mingxin^{1,2}, Shen Junyi¹, Xiang Ming¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China;

2. Department of Computer Engineering, Lanzhou Polytechnic College, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to enhance the performance of the texture image retrieval, a new algorithm based on the double density wavelet transform (DDWT) was presented, which was obtained by interleaving double density wavelet transforms (IDDWT) using the characteristics of the double density wavelet decomposition and computing the first-order and the second-order statistical parameters of IDDWT as the texture feature for image retrieval. In comparison with the traditional wavelet, the pyramid discrete wavelet decomposition transforms (PDWT) utilizes the oversampled framework and has time shift invariant. This algorithm is better than those of PDWT and DDWT under the same feature extraction method and the same similarity measure. In the contrast experiment, the result shows that the retrieval efficiency of this algorithm is increased by 10% and 7%, respectively, for image retrieval. The best performance is achieved with combinatorial method of the first and second order statistical moments.

Keywords: double density wavelet transform; image retrieval; texture image

纹理是图像的基本视觉特性之一, 纹理特征的提取近来主要采用小波理论并已经取得了一定的成绩. 最常用的小波变换是基于 Mallat 的金字塔算法, 虽然优点突出, 但它的时移敏感性影响了其应用. 该时移敏感性是由下采样造成的, 为了克服这个缺点, 人们提出了不同的解决方案^[1], 如在小波变换的实现过程中不进行下采样, 虽然这种小波变换克服了时移敏感性, 但在小波系数中包含了大量的冗

余信息.

2001 年 Selesnick 提出的双密度小波理论^[2]具有时移不敏感性, 本文根据双密度小波变换的特点, 首先对纹理图像进行分解, 得到双密度小波分解变换矩, 然后对该矩阵进行组合得到类似于传统小波变换的系数矩. 在此基础上, 计算一阶和二阶统计矩, 以此作为纹理的特征进行图像检索.

1 双密度小波变换

1.1 一般双密度小波变换

一般的双密度小波变换是在实数域上定义的, 并有2个尺度函数, 而传统小波变换只有1个尺度函数. 在实现变换时, 双密度小波变换采用了过采样, 与传统小波变换比较, 可降低时移敏感性. 其双尺度方程为

$$h(t) = 2^{t/2} \sum_n h_0(n) (2t - n) \quad (1)$$

$$h_i(t) = 2^{t/2} \sum_n h_i(n) (2t - n), \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

在双密度小波分解变换中, 对2D信号也采用可分离的滤波器分别对行和列进行滤波. 若 h^0 表示低频滤波器, h^1 、 h^2 表示高频滤波器, 则对lena图像进行一次分解可以得到9个子带(见图1), 其数学表达式为 $h_x^i h_y^j$, $i, j \in \{0, 1, 2\}$, 其中 x, y 分别表示行和列, 0、1和2分别表示 h^0 、 h^1 和 h^2 滤波器.



图1 双密度小波变换经1级分解后的lena图像

1.2 双密度小波变换组合

在双密度复小波变换的实现中^[3], Fernandes提出了系数组合法, 其可应用于纹理的特征提取, 基本思想如下.

由于在双密度小波变换中, 子带 $h_y^2 h_x^2$ 、 $h_y^2 h_x^1$ 、 $h_y^1 h_x^2$ 和 $h_y^1 h_x^1$ 与传统小波分解变换的HH子带具有相同的频域支撑, 其半延迟特性蕴含着相应 $h_y^2 h_x^1$ 子带列的小波系数的空域支撑, 位于 $h_y^2 h_x^2$ 子带列的半整数的右边, 因此可以将子带 $h_y^2 h_x^2$ 、 $h_y^2 h_x^1$ 、 $h_y^1 h_x^2$ 和 $h_y^1 h_x^1$ 的小波系数按公式

$$\left. \begin{aligned} h_y^2 h_x^2 \left(\frac{m}{2}, \frac{n}{2} \right), \quad m, n = 2, 4, 6, \dots \\ h_y^2 h_x^1 \left(\frac{m}{2}, \frac{n-1}{2} \right), \quad m = 2, 4, 6, \dots, \quad n = 1, 3, 5, \dots \\ h_y^1 h_x^2 \left(\frac{m-1}{2}, \frac{n}{2} \right), \quad m = 1, 3, 5, \dots, \quad n = 2, 4, 6, \dots \\ h_y^1 h_x^1 \left(\frac{m-1}{2}, \frac{n-1}{2} \right), \quad m, n = 1, 3, 5, \dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

进行组合, 形成新的子带 HH_{DD} , 该子带具有与传统小波变换HH子带相同的频域支撑, 但其大小是HH子带的4倍. 同样, 可以按照公式

$$\left. \begin{aligned} h_y^0 h_x^2 \left(m, \frac{n}{2} \right), \quad n = 2, 4, 6, \dots \\ h_y^0 h_x^1 \left(m, \frac{n-1}{2} \right), \quad n = 1, 3, 5, \dots \\ h_y^2 h_x^0 \left(\frac{m}{2}, n \right), \quad m = 2, 4, 6, \dots \\ h_y^1 h_x^0 \left(\frac{m-1}{2}, n \right), \quad m = 1, 3, 5, \dots \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

生成子带 HL_{DD} (LH_{DD}), 该子带也具有与传统小波变换HL(LH)子带相同的频域支撑, 但其大小是HL(LH)子带的2倍. 只有子带 $h_y^0 h_x^0$ 的频域支撑与传统小波变换LL子带相同且大小一致, 才可以将子带 $h_y^0 h_x^0$ 表示成 LL_{DD} . 双密度小波变换经组合后的lena图像如图2所示.



图2 双密度小波变换组合后的lena图像

2 特征提取

2.1 一阶统计矩

Manjunath等提出了将小波分解所得的所有高频系数和最低频系数的能量一阶统计矩(均值和标准方差)作为图像的纹理特征进行分类的公式^[4], 即

$$m_1 = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \text{coef}(i, j) \quad (6)$$

$$m_2 = \left(\frac{1}{N^2 - 1} \sum_{i,j=1}^N (\text{coef}(i, j) - m_1)^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

在3级分解的情况下, 传统小波变换方法可用20个特征表征纹理, 而双密度小波变换方法则可用50个特征表征纹理.

2.2 共生矩阵

由于一阶统计矩只考虑了整个小波系数的统计特性, 所以该矩不能区分小波系数的排列情况. 为了避免这一问题, 通常使用二阶统计矩量, 即对小波系数组合的分布统计. 共生矩阵反映了小波系数的方向、相邻间隔、变换幅度的综合信息, 用它可以分析

小波系数矩的局部模式及小波系数排列规则.文献[5]中提出了基于共生矩阵的 14 种描述纹理特征参数,在此只采用了其中的 7 个,以用于描述小波系数的纹理特征(见表 1).共生矩阵的特征与方向信息密切相关,为了获得该特征的旋转不变性,应对不同方向上的特征量求其均值和方差,这样处理就能抑制方向分量,使得到的纹理特征与方向无关.

表 1 基于共生矩阵 C 的纹理特征提取公式

$$\begin{aligned}
 c_1 &= \sum_{i,j=0}^{n-1} C(i,j) \\
 c_2 &= - \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} C(i,j) \lg C(i,j) \\
 c_3 &= \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} (i-j)^2 C(i,j) \\
 c_4 &= \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{C(i,j)}{1+(i-j)^2} \\
 c_5 &= \max_{i,j} C(i,j) \\
 c_6 &= \sum_{i,j=1}^N (i-M_x+j-M_y)^4 C(i,j) \\
 c_7 &= \sum_{i,j=1}^N (i-M_x+j-M_y)^3 C(i,j)
 \end{aligned}$$

注: $M_x = \sum_{i,j=0}^n iC(i,j)$; $M_y = \sum_{i,j=0}^n jC(i,j)$; $C(i,j)$ 为共生矩阵.

3 实验

在实验中,将 Brodatz 图像数据库中的 112 幅图像作为实验数据,其中将每幅大小为 512×512 像素的图像按照 4×4 像素进行不重叠分割,结果有 128×128 像素的 1 792 幅图像组成数据 DB1,并将来自于同一幅原图的小图像视为相互相关的,则每幅图像用于检索的小图都有 15 幅相关的图像.同样,将 Brodatz 图像数据库中的每一幅图像随机分割成大小为 128×128 像素的 8 个子图,这样就生成了 896 幅图像组成的数据 DB2,并将来自于同一幅

原图像的小图视为相互相关的,则每幅图像用于检索的小图都有 7 幅相关的图像.另外,用检索率来评价检索性能,即

$$= \sum_{q=0}^K n_q / \sum_{q=0}^K N_q \quad (8)$$

式中: N_q 表示某个图像在规模为 K 的图像数据库中进行比较所得的相似图像数目; n_q 表示通过计算得到的正确的图像数目.

采用的小波变换是常用的 Daubechies4,双密度小波变换是 K522,图像数据库 DB2 的数据是随机生成的,并在相同的分解级数(分解级数为 3)和在 L1 距离下进行了实验对比,结果见表 2.

4 分析

双密度小波变换是在一种紧致框架结构上构造的,它与 Daubechies 的正交小波变换是等价的,而双密度小波滤波器是建立在过采样框架基础上的,并适用于多项特性的最小长度滤波器.构造双密度小波变换需采用最大平坦有限单位脉冲响应(FIR)滤波器和准酉矩阵扩展方法,在相同频域下,双密度小波变换比传统小波变换的波形要平滑,且尺度函数满足“半延迟”特性,即 $\phi^1(t) = \phi^2(t-0.5)$,其频域响应与传统小波变换具有相似的幅度.由于实现双密度小波变换需采用过采样滤波器,而不是传统小波变换的临界采样,因此在双密度小波分解变换中小波系数是冗余的,并具有近似时移不变性.双密度小波分解变换得到的信息能较好地克服正交小波的马塞克现象,有利于改进图像的边缘信息.对于 2D 信号来讲,每个尺度有 1 个低频和 8 个高频子带,高频子带分别对应着 0° 、 45° 和 90° 空间特征方向上的信息,这与传统小波分解变换是一样的.虽然双密度小波变换的计算量大于传统的小波变换,但在图像处理方面,双密度小波变换更具一定的优势.

从表 2 来看,对于类似 DB2 中的图像,双密度小波变换和组合后的双密度小波变换的性能要高于

表 2 不同方法检索精度比较

	检索精度					
	一阶统计矩		二阶统计矩		一阶、二阶统计矩组合	
	DB1	DB2	DB1	DB2	DB1	DB2
金字塔小波分解变换	72.642 3	74.854 9	71.819 2	79.909 2	72.384 2	80.045 2
双密度小波变换	71.323 9	77.896 2	74.285 0	81.780 1	74.581 5	81.900 7
组合后双密度小波变换	73.252 7	80.796 6	81.044 2	87.053 6	81.396 5	87.811 4

注:DB2 下的实验数据是 10 次实验结果的平均值.

传统的小波变换,这是因为双密度小波变换具有近似时移不变性,其二阶统计矩的检索性能优于一阶统计矩.双密度小波变换的冗余度为2.67,与传统小波变换比较,更适用于用二阶统计矩提取图像的纹理特征.从实验结果来看,在相同的情况下,组合后的双密度小波变换的性能高于传统的、双密度的小波变换,这是因为组合后的双密度小波变换不但具有传统小波变换的一般特性,而且还具有双密度小波变换的时移不变性,它将相同频域支撑的子带组合在一起,较好地描述了边缘信息,以利于提取图像的特征.用组合后的双密度小波变换提取特征,就相当于对频域上所有具有相同频域支撑(空域上具有相同方向的信息)的子带信息进行操作.另外,组合后的双密度小波变换的特征数与传统小波变换一样,但少于双密度小波变换;在计算量上,组合后的双密度小波变换等同于传统小波变换,但低于双密度小波变换.从实验结果得知,一阶、二阶统计矩组合用于纹理图像检索的性能最好.

5 结 论

本文提出了一种新的基于双密度小波统计特性的纹理特征提取方法,理论分析和实验结果均表明,其性能优于传统的小波变换和双密度小波变换,特别是在纹理特征提取上,最好联合使用一阶、二阶统

计矩.虽然双密度小波变换的平均检索率高于传统小波变换,但仍有一些纹理采用传统的小波变换比较好.双密度小波变换已应用到合成孔径雷达(SAR)图像去噪方面,但目前仍处在发展阶段,构造性能更好的、比较适合图像处理的双密度小波变换依然是今后研究的热点问题.

参考文献:

- [1] allat S G . A wavelet tour of signal processing [M] . San Diego, USA: Academic Press, 1998 .
- [2] Selesnick I W . Wavelets in signal and image analysis: from theory to practice [M] . Berlin: Kluwer Academic Publisher, 2001 .
- [3] Fernandes F C A . Directional, shift-insensitive, complex wavelet transforms with controllable redundancy [D] . Houston, USA: Department of Computer Science, Rice University, 2002 .
- [4] Manjunath B S, Ma W Y . Texture features for browsing and retrieval of image data [J] . IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1996, 18(8): 837-842 .
- [5] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I . Texture features for image classification [J] . IEEE Trans System Man Cybernetics, 1973, 8(6): 610-621 .

(编辑 苗 凌)

卢天健教授担任首席科学家的“973计划”项目获准立项

由我校卢天健教授为首席科学家的国家重点基础研究发展计划(“973计划”)项目“超轻多孔材料和结构创新构型的多功能化基础研究”近日获得立项批准.该项目在未来五年内将获得总额为2800万元的专项资助.

该项目涉及材料、能源和环境等领域的多学科综合交叉,拟以国家重大需求为牵引,以材料制备的基础理论为基础,以研究多样化性能及创新构型优化设计方法为手段,结合材料、力学、计算数学、物理学、热学、声学等学科和汽车、航空航天、机械、建筑、能源等领域,针对多孔金属材料的宏微观性能表征及其尺度效应,解决超轻多孔金属材料与结构的制备机理、力学/热学/声学/电磁学等性能表征理论体系、微细观组织与结构的优化设计新理论、纤维增强泡沫金属夹芯复合材料结构的多功能一体化构建理论等方面的关键科学问题.

该项目中我校为依托单位,东南大学、中科院声学研究所、大连理工大学、哈尔滨工业大学等合作单位将参加项目的研究.

(科技处 赵 炎)