

基于压缩感知的图像检索方法研究*

周 燕¹ 曾凡智¹ 卢炎生² 周月霞¹
(1. 佛山科学技术学院 计算机系, 广东 佛山 528000
2. 华中科技大学 计算机学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对大尺寸图像的特征提取算法复杂度高、特征信息容易缺失的问题, 利用压缩感知理论中关于少量测量值可以精确重构原始信号的特性, 提出了一种基于压缩感知的图像检索方法。首先对图像进行小波变换、分块预处理; 然后构造分块多项式确定性测量矩阵, 并对分块图像进行压缩感知快速测量, 得到少量的压缩测量值代表图像的特征; 最后采用加权距离方法计算图像测量值特征的相似度, 实现图像的精确检索。仿真结果表明, 该方法在图像检索速度和查准率、查全率等指标上具有更高的性能, 能应用于大量复杂图像的检索。

关键词: 图像检索; 压缩感知; 测量矩阵; 特征提取; 特征匹配

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2014)01-0057-07

An Image Retrieval Method Based on Compressive Sensing

ZHOU Yan¹, ZENG Fanzhi¹, LU Yansheng², ZHOU Yuexia¹

(1. Department of Computer, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For solving the problems of the complexity about feature extraction on large-size image and the loss of feature information, the characteristics of compressive sensing (CS) theory that a small amount of measurements can accurately reconstruct the original signal is used, and a new image retrieval method based on compressive sensing is proposed. First, the wavelet transformation is performed, and the image is divided into blocks. Then, blocked polynomial deterministic measurement matrix and conduct fast CS measurement on blocked image constructed, and very few compressive measurements which represent the image features can be obtained. Finally, we calculate the similarity between the measurement features by weight distance is calculated, so to implement accurate image retrieval. At the same time, it is proved theoretically that the blocked polynomial deterministic measurement matrix is satisfied to the restricted isometric property (RIP). Experimental results show that this method has higher performance on image precision and image recall, and can be applied to massive complex image retrieval.

Key words: image retrieval; compressed sensing; measurement matrix; feature extraction; feature matching

随着互联网的快速发展、各种数字化设备的普及以及大规模存储设备的出现, 多媒体数据尤其是

图像数据急剧增长。如何在海量图像中快速、准确地检索所需的图像, 已经成为人们的迫切需要, 也

* 收稿日期: 2013-07-09

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (S2012010008639, 10152800001000016, 10452800001004185); 广东省教育厅高校优秀青年创新人才培育资助项目 (2012LYM_0132); 佛山市科技发展专项基金资助项目 (2011AA100051, 20121011010070).

作者简介: 周燕 (1979年生), 女; 研究方向: 图像处理; E-mail: zhouyan791266@163.com

是图像检索领域中一个亟待解决的问题。基于内容的图像检索 (Content-based image retrieval, CBIR) 逐渐成为国内外研究的热点^[1-8]。通过研究相关文献发现, 目前很多 CBIR 方法都存在计算复杂度高、特征提取和特征匹配的时间长、特征存储空间大、特征信息容易缺失等问题, 尤其对于大尺寸图像的检索。因此, 通过对现有的图像检索方法进行改进, 或者结合新的理论, 研究新的图像检索方法, 对于解决目前图像检索的难题, 具有非常重要的意义和价值。

近年来, 由 Donoho 等人提出的压缩感知理论^[9-21], 为数据采集技术带来了革命性的突破。由压缩感知理论可知, 在一定条件下, 通过少量的测量值可以准确重构出原始信号, 由此表明少数的测量值能够保持原始信号的结构和足够多信息。利用这一特性, 少量的测量值可以直接用于实现各种图像处理任务, 如图像分类、特征提取、目标检测以及信息融合等, 并且由于测量值数目较少, 信息密度高, 可以大大减少相关算法的时间和存储代价。目前压缩感知理论在图像处理领域已经展开了研究, 如数字水印、图像融合等, 并且取得了初步的成果。这些研究思路可以推广到图像检索领域, 理论上可以证明压缩感知理论能够应用于图像检索。

基于上述背景, 本文在研究压缩感知理论和图像检索技术的基础上, 把压缩感知理论应用于图像检索过程中的特征提取和匹配, 提出一种新的图像检索方法。利用图像在特定变换基下的稀疏性这一特性, 通过压缩感知的线性测量过程, 得到少量的压缩测量值代表图像的特征。采用加权距离方法计算图像的测量值特征的相似度, 实现图像的精确检索。该方法的创新性在于引入压缩感知理论提取图像特征, 采用分块多项式确定性测量矩阵对图像进行分块测量, 在一定程度上解决了传统图像检索方法存在的问题。

1 压缩感知理论

1.1 基本原理

设 X 是经传统采样得到的长度为 N 的信号, 通过压缩感知可直接得到长度为 M 的测量系数 Y ($M < N$), 满足:

$$Y = \Phi X \quad (1)$$

其中 Φ 是大小为 $M \times N$ 的测量矩阵。

当 X 为可压缩信号时, 在正交稀疏变换下可由系数 S 表示, 即

$$X = \Psi S \quad (2)$$

其中 Ψ 为正交稀疏变换矩阵, S 为 K -稀疏信号 (只有 K 个非零元素), 因此线性测量过程也可记为:

$$Y = \Theta S \quad (3)$$

其中 $\Theta = \Phi\Psi$ 为 $M \times N$ 矩阵。

从压缩感知的线性测量过程可以看出, 在获取信号的同时对数据进行压缩, 得到的数据量明显减少。由于信号 X 的长度超过测量系数 Y 的长度, 因此无法直接从 Y 重建出 X 。如何从测量系数 Y 重建出原始信号 X 成为压缩感知理论的一个关键问题。

1.2 分块多项式确定性测量矩阵

为了确保信号的线性投影能够保持信号的原始结构, 测量矩阵必须满足限制等容性 (Restricted Isometrics Property, RIP) 条件。文献 [16] 证明了当 Φ 是高斯随机矩阵时, 能以较大概率满足 RIP 条件。高斯测量矩阵的缺点是矩阵元素所需存储空间很大, 并且由于其非结构化的本质导致其计算复杂。为了降低在矩阵的构造、存储甚至传输和计算的代价, 使压缩感知理论能被更加高效地应用, 一些数学家提出利用确定性测量矩阵以及结构化的测量矩阵替代随机矩阵。Ronald A. DeVore 提出了多项式确定性矩阵^[17], 它通过多项式来确定矩阵中每一列非零元素的个数和位置。多项式测量矩阵要求测量数 $M = p^2$ (p 为多项式集合元素的个数)。当 p 较小时, 测量矩阵构造时间较短, 但当 p 的取值越大时, 其矩阵构造时间越长, 这极大地限制了多项式确定性矩阵在大尺寸图像中的应用。为了解决这个问题, 有学者又提出了分块多项式确定性矩阵, 其构造形式如下:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_B & & & \\ & \Phi_B & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Phi_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

以下从理论上证明, 只要 Φ_B 满足 RIP 性质, 则由 Φ_B 构造的矩阵 Φ 依然满足 RIP 性质, 因此该矩阵可用于压缩感知。为此, 先给出 RIP 性质的定义 1, 再给出证明过程。

定义 1 设 Φ_B 是 $M \times N$ 的矩阵, 其限制等容数 δ_k 是指 $\forall x \in R^N$ 且 x 是 k -稀疏向量, 满足不等式:

$$(1 - \delta_k) \|x\|_2^2 \leq \|\Phi_B x\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|x\|_2^2 \quad (6)$$

的最小值。亦称矩阵 Φ_B 满足 RIP 性质。根据文献 [16], δ_k 满足如下不等式:

$$\delta_1 \leq \delta_2 \leq \delta_3 \leq \dots \leq \delta_k \quad (7)$$

设矩阵 Φ 中 Φ_B 的个数为 L , 则 Φ 是 $(M * L) \times (N * L)$ 的矩阵, 下面的定理 1 表明若 Φ_B 满足 RIP 性质, 则 Φ 同样满足 RIP 性质。

定理 1 若 δ_k 是 Φ_B 由定义 1 给出的限制等容数, 则矩阵 Φ 的限制等容数 δ_k' 满足: $\delta_k' \leq \delta_k$ 。

证明 1) 设 $\forall x \in R^{N * L}$, 且 x 是 k -稀疏向量, 其稀疏下标集为 $T, |T| \leq k$, 则: $T \subset \bigcup_{i=1}^L D_i$ 。其中

$$D_i = \{(i-1) * N + 1, (i-1) * N + 2, \dots, i * N\} \quad (8)$$

记 $T_i = T \cap D_i, l_i = |T_i| (i=1, 2, \dots, L)$ 。

x_i 表示 k -稀疏向量在下标集合 T_i 与 x 取值一致, 其余分量为 0, 且 $x_i \in R^{N * L}$ 。 $\bar{x}_i \in R^N$ 为 x_i 在集合 D_i 上截取后组成的 N 维向量。

根据 x_i 分块性, 有

$$\|x\|_2^2 = \sum_{i=1}^L \|x_i\|_2^2 = \sum_{i=1}^L \|\bar{x}_i\|_2^2 \quad (9)$$

记 $\Phi_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_B \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$ 表示第 i 个分块为 Φ_B , 其余为 0 的分块矩阵。由 Φ 的分块特性, 有

$$\|\Phi x\|_2^2 = \sum_{i=1}^L \|\Phi_i x_i\|_2^2 = \sum_{i=1}^L \|\Phi_B \bar{x}_i\|_2^2 \quad (10)$$

2) 向量 $\bar{x}_i \in R^N$ 且 l_i 是稀疏的, 根据定义 1, 有

$$(1 - \delta_{l_i}) \|\bar{x}_i\|_2^2 \leq \|\Phi_B \bar{x}_i\|_2^2 \leq (1 + \delta_{l_i}) \|\bar{x}_i\|_2^2 \quad (11)$$

($i=1, 2, \dots, L$)

由于 $l_i \leq k$, 根据式 (7), 有: $\delta_{l_i} \leq \delta_k$ 。

因此, 根据式 (9)、(10)、(11), 可以得到:

$$(1 - \delta_k) \|x\|_2^2 = (1 - \delta_k) \sum_{i=1}^L \|\bar{x}_i\|_2^2 \leq \|\Phi x\|_2^2 \leq \sum_{i=1}^L (1 + \delta_k) \|\bar{x}_i\|_2^2 = (1 + \delta_k) \sum_{i=1}^L \|\bar{x}_i\|_2^2 = (1 + \delta_k) \|x\|_2^2 \quad (12)$$

由定义 1 可知, δ_k' 是满足公式 (12) 的最小数, 可得: $\delta_k' \leq \delta_k$ 。

定理 1 表明只要 Φ_B 构造适当, Φ 同样可以作为测量矩阵, 这表明对一个高维的问题, 可以采用分块处理的方式, 降低问题的维度, 这点在图像处理中具有重要的指导意义。

2 基于压缩感知的图像检索

对于一幅自然图像, 通过小波变换可以得到低频分量、水平分量、垂直分量和对角分量, 如图 1 所示。对各个分量图像进行放大缩小处理, 以便分量图像能够分成大小相同的多个图像块。图 2 是本文的图像检索流程图。

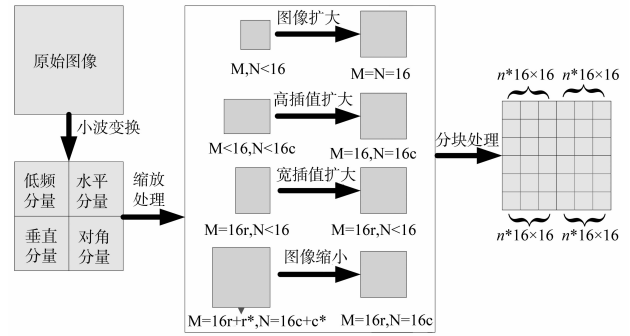


图 1 图像分块示意图

Fig. 1 The schematic diagram of image block

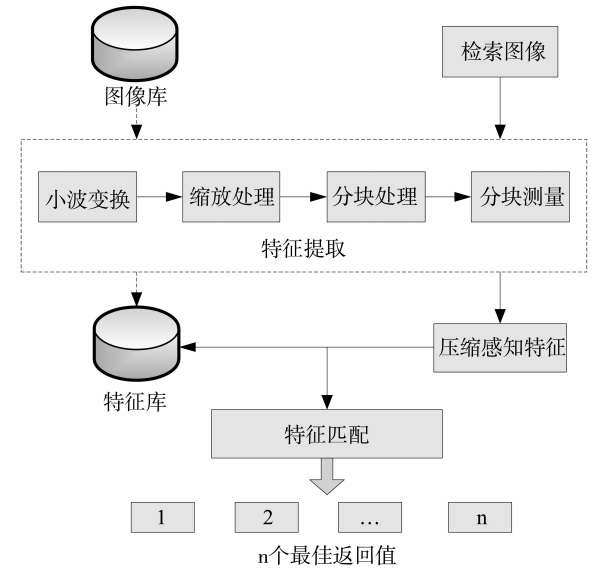


图 2 基于压缩感知的图像检索流程图

Fig. 2 The flowchart of image retrieval based on CS

2.1 压缩感知特征提取

在利用压缩感知提取图像特征时, 需要进行一系列的图像预处理, 包括图像转换、小波分解等。其处理过程描述如下:

步骤 1 如果是 RGB 图像, 则转换为灰度图像, 同时对图像进行二维小波分解。采用小波基 bior3.7 (双正交样条小波滤波器) 提取低频分量、水平分量、垂直分量和对角分量, 利用 MATLAB 函数可表示为:

$$[Lf, Hf, Vf, Gf] = \text{DWT2}(f, 'bior3.7') \quad (13)$$

其中, Lf, Hf, Vf, Gf 分别表示低频分量、水平分量、垂直分量和对角分量, 各分量图像的长度和宽度是原始图像的 $1/2$ 。

步骤 2 假设各分量图像的大小为 $M \times N$, 根据 M, N 的大小对分量图像进行缩放处理, 按公式 (14) 和 (15) 对 M, N 进行取整运算:

$$r = \text{fix}(M, 16) \quad (14)$$

$$c = \text{fix}(N, 16) \quad (15)$$

如果 $r=0, c=0$, 则表明 $M < 16, N < 16$, 采用邻近插值法, 对图像进行扩大, 使图像的大小为 16×16 。如果 $r=0, c \neq 0$, 则表明 $M < 16, N > 16$, 同样采用邻近插值法, 扩充图像的宽度, 使图像的大小为 $16 \times 16c$ 。如果 $r \neq 0, c=0$, 则表明 $M > 16, N < 16$, 扩充图像的高度, 使图像的大小为 $16r \times 16$ 。如果 $r \neq 0, c \neq 0$, 则表明 $M > 16, N > 16$, 对图像进行缩小, 使图像的大小为 $16r \times 16c$ 。

步骤 3 对各分量图像进行分块, 每个图像块的大小为 16×16 , 得到总数为 $r \times c$ 个 16×16 的图像块, 其中 $r = \text{fix}(M, 16), c = \text{fix}(N, 16)$ 。

步骤 4 构建分块多项式确定性矩阵 Φ , 定义 $L = r \times c$,

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_B^{(1)} & & & \\ & \Phi_B^{(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Phi_B^{(L)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 $\Phi_B^{(i)}$ 的大小为 49×256 ($i=1, 2, \dots, L$), Φ 为 $M \times N$ 的矩阵, $M = 49 \times L, N = 256 \times L$ 。 $\Phi_B^{(i)}$ 是从 Φ_0 中选取 49 行, 随机挑选 256 列组成的分块构成, Φ_0 是选取 $p=7, r=2$ 所生成的 49×343 矩阵。

步骤 5 把图像按照从左到右, 从上到下进行编号, 即 $i=1, 2, \dots, L$, 其中 $L = r \times c$ 。对 i 块的 16×16 图像以行优先次序扫描, 得到 256×1 的列向量 X_i , 按照公式 (17) 计算该图像块的测量系数:

$$Y_i = \Phi_B^{(i)} X_i \quad (17)$$

由于图像经过小波变换后的水平、垂直和对角分量

满足信号稀疏条件, 按照公式 (17) 可以直接进行压缩采样, 得到 49×1 的列向量 H_i^Y, V_i^Y, G_i^Y ($i=1, 2, \dots, L$)。

步骤 6 根据公式 (18)、公式 (19) 分别计算第 i 块图像的水平、垂直、对角分量测量系数的平均值 HM_i, VM_i, GM_i , 以及对称点偏移差值总和 HS_i, VS_i, GS_i ($i=1, 2, \dots, L$):

$$M(i) = \frac{1}{49} \sum_{i=1}^{49} Y(i) \quad (18)$$

$$S(i) = \sum_{i=1}^{24} \text{abs}(Y(i+25) - Y(i)) + \text{abs}(Y(49) - Y(25)) \quad (19)$$

步骤 7 对第 i 块图像按照公式 (20)、公式 (21) 计算低频系数的平均值 BM_i 及对称偏差总和 BS_i :

$$M(i) = \frac{1}{256} \sum_{i=1}^{256} Y(i) \quad (20)$$

$$S(i) = \sum_{i=1}^{128} \text{abs}(Y(i+128) - Y(i)) \quad (21)$$

步骤 8 通过步骤 5、步骤 6、步骤 7 得到 3 个 $(49 \times L) \times 1$ 的列向量, 其中 $(\cdot)^T$ 代表转置:

$$H^Y = ((H_1^Y)^T, (H_2^Y)^T, \dots, (H_L^Y)^T)^T$$

$$V^Y = ((V_1^Y)^T, (V_2^Y)^T, \dots, (V_L^Y)^T)^T$$

$$G^Y = ((G_1^Y)^T, (G_2^Y)^T, \dots, (G_L^Y)^T)^T$$

同时得到 8 个 $L \times 1$ 的列向量, 共 11 个向量作为图像采用压缩感知过程提取的特征向量, 存入数据库进行存储。

$$HM = (HM_1, HM_2, \dots, HM_L)^T$$

$$HS = (HS_1, HS_2, \dots, HS_L)^T$$

$$VM = (VM_1, VM_2, \dots, VM_L)^T$$

$$VS = (VS_1, VS_2, \dots, VS_L)^T$$

$$GM = (GM_1, GM_2, \dots, GM_L)^T$$

$$GS = (GS_1, GS_2, \dots, GS_L)^T$$

$$BM = (BM_1, BM_2, \dots, BM_L)^T$$

$$BS = (BS_1, BS_2, \dots, BS_L)^T$$

2.2 压缩感知特征匹配

利用压缩感知获取的图像特征, 与传统的图像特征有很大的区别, 因此在图像检索时, 需要采用特定的特征匹配算法。本文采用加权距离方法计算图像的测量值特征匹配度, 其过程描述如下:

步骤 1 按照压缩感知特征提取算法, 提取待检索图像的压缩感知特征 $H^r, V^r, G^r, HM^r, VM^r, GM^r, BM^r, HS^r, VS^r, GS^r, BS^r$ 。

步骤 2 从数据库中读取一幅图像的特征向量, 利用公式 (22) 计算两幅图像的特征匹配度 w :

$$\begin{aligned}
 w &= w_1 \| BM - BM' \|_2 + \\
 w_2 \| BS - BS' \|_2 &+ w_3 \| HM - HM' \|_2 + \\
 w_4 \| HS - HS' \|_2 &+ w_5 \| VM - VM' \|_2 + \\
 w_6 \| VS - VS' \|_2 &+ \\
 w_7 \| GM - GM' \|_2 &+ w_8 \| GS - GS' \|_2 + \\
 w_9 \| H^Y - H^{Y'} \|_2 &+ \\
 w_{10} \| V^Y - V^{Y'} \|_2 &+ w_{11} \| G^Y - G^{Y'} \|_2 \quad (22)
 \end{aligned}$$

其中 $\|x\|_2 = (\sum_{i=1}^n |x_i|^2)^{1/2}$, w_1, w_2, \dots, w_{11} 为加权系数。本文取 $w_1 = 0.2, w_2 = w_3 = \dots = w_{11} = 0.08$ 进行处理。

步骤 3 若 $w < \varepsilon$ (本文取匹配阈值 $\varepsilon = 0.5$), 从数据库中提取图像作为检索结果输出, 输出的结果按照 w 值从小到大进行排序。

3 仿真实验

为验证算法的有效性, 本文采用 Corel image dataset 图像集, 从中选取 1 000 幅图像进行仿真实验, 分别从检索速度、查准率这两个性能指标进行评价, 同时与其他图像检索算法进行比较。

3.1 实验结果

这里选择花、恐龙、公共汽车作为待检索图像, 如图 3 所示。为了便于比较, 本文对颜色特征和纹理特征算法也作了仿真, 三种算法的图像检索结果如图 4、图 5、图 6 所示。为了方便显示, 每种算法都只返回相似度最高的前 10 幅图像作为图像检索结果。从图中可以看出, 基于压缩感知特征的图像检索性能最好。



图 3 待检索图像

Fig. 3 The image to be retrieved

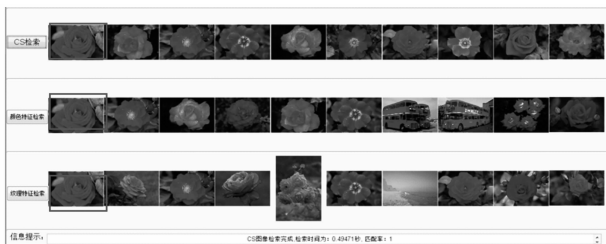


图 4 不同算法的检索结果 - 花

Fig. 4 The retrieval results for different algorithms-flower

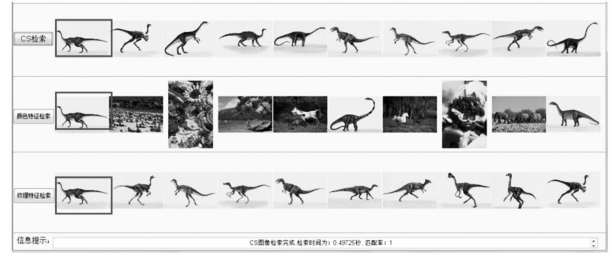


图 5 不同算法的检索结果 - 恐龙

Fig. 5 The retrieval results for different algorithms-dinosaur



图 6 不同算法的检索结果 - 公共汽车

Fig. 6 The retrieval results for different algorithms- bus

3.2 性能分析与评价

为了客观地评价各种算法的图像检索性能, 本文以查准率和查全率作为评价指标, 并与文献 [5]、文献 [6] 的算法进行比较 (注: 文献 [5] 采用的是综合颜色和纹理特征的图像检索算法, 文献 [6] 采用的是基于颜色体积直方图的图像检索算法), 结果如表 1 所示。从表中可以看出, 本文算法的图像查准率和查全率都高于其他两种算法。

表 1 图像查准率/查全率对比

Table 1 The comparison for image precision and recall

	文献 [5] 算法		文献 [6] 算法		本文算法	
	查准率	查全率	查全率	查准率	查准率	查全率
非洲	69.3	52.4	66.7	61.7	77.5	68.5
海滩	59.6	46.3	71.8	53.3	79.2	66.5
建筑	77.8	39.1	63.7	55.4	68.2	76.2
汽车	72.3	51.8	73.3	72.1	87.6	81.4
恐龙	98.4	94.2	82.2	82.7	89.2	86.3
大象	65.7	42.1	61.9	61.2	70.7	75.1
花	80.1	77.8	69.3	72.5	81.4	83.2
食物	88.7	50.9	73.1	55.2	86.3	68.5
马	85.3	75.4	78.3	69.1	81.7	74.3
山	83.2	41.8	80.8	48.2	86.7	69.8
平均	78.04	57.18	72.11	63.14	80.85	74.98

为了直观表示图像检索算法对每一类图像的查准率和查全率, 这里采用 PR 直方图显示本文算法的查准率和查全率, 如图 7 所示。

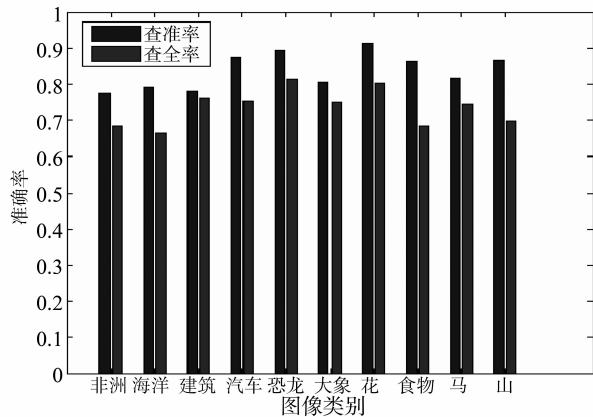


图 7 基于压缩感知的 PR 直方图

Fig. 7 The PR Histogram based on CS

查准率随着检索返回的图像数量的变化而变化, 图 8 给出了文献 [5]、文献 [6] 以及本文算法的平均检索查准率的比较结果。从图中可以看出, 随着检索返回的图像数量的增加, 三种算法的平均检索查准率逐渐下降, 趋于相同, 但本文算法的平均检索查准率仍然略高于其他两种算法。

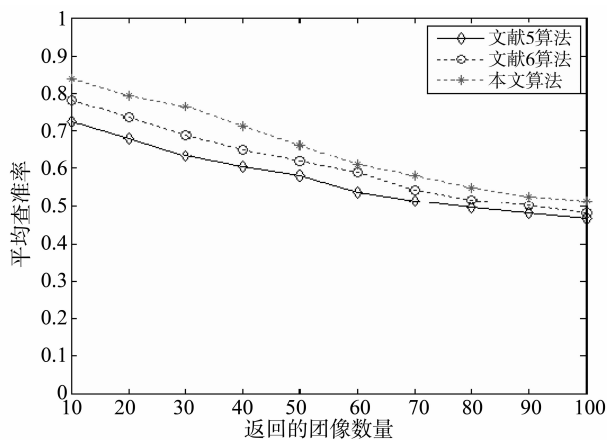


图 8 不同算法的平均检索查准率比较

Fig. 8 The comparison of average retrieval precision for different algorithms

图像检索的时间取决于特征提取和特征匹配的时间, 而压缩感知特征的提取时间主要取决于测量矩阵的构造时间。本文对随机测量矩阵和分块多项式确定性测量矩阵的构造时间、特征提取时间、特征匹配时间进行了比较, 如表 2 所示。其中随机测

量矩阵以高斯测量矩阵和贝努利测量矩阵为代表, 分块多项式确定性测量矩阵分别选用 $p = 3, 5, 7$ 构造的多项式确定性测量矩阵进行合成。从表中可以看出, 分块多项式确定性测量矩阵的构造时间、特征提取时间、特征匹配时间明显少于随机测量矩阵, 并且随着 p 值的变化而变化。

表 2 不同测量矩阵的图像检索时间对比
Table 2 The comparison of image retrieval time for different measurement matrixes

	高斯测量矩阵	贝努利测量矩阵	分块多项式确定性测量矩阵		
			$p = 3$	$p = 5$	$p = 7$
			矩阵构造时间	0.82	1.14
特征提取时间	1.23	1.57	0.51	0.80	0.95
特征匹配时间	0.96	0.82	0.63	0.86	0.98

4 结 论

利用压缩感知的压缩采样特性, 把压缩感知理论应用于图像特征提取, 提出了一种新的基于内容的图像检索方法。为了克服随机测量矩阵的不足, 采用分块多项式确定性测量矩阵对图像进行分块测量, 从而加快测量矩阵的构造, 缩短特征提取和匹配的时间, 提高图像的检索效率。与其他方法相比, 本方法在查准率和查全率等指标上都取得较高的性能。深入研究压缩感知测量矩阵的结构和构造算法, 对进一步提升图像检索的性能具有重要的意义, 也是接下来的重点研究内容。

参考文献:

- [1] 方艳梅, 杨灿, 肖自美, 等. 基于内容图像检索系统的性能改进方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2001, 40(6): 39-43.
- [2] 何云峰, 周玲, 于俊清, 等. 基于局部特征聚合的图像检索方法[J]. 计算机学报, 2011, 34(11): 2224-2233.
- [3] 王向阳, 胡峰丽. 一种基于位平面综合特征的彩色图像检索方案[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(5): 867-872.
- [4] 冯松鹤, 郎丛妍, 须德. 一种融合图学习与区域显著性分析的图像检索算法[J]. 电子学报, 2011, 39(10): 2288-2294.
- [5] 宋琳琳, 王相海. 一种综合颜色和纹理特征的图像检索算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(34): 203-207.

- [2] SHAO W L, WANG H, HE S, et al. Photophysical properties and singlet oxygen generation of three sets of halogenated corroles[J]. *J Phys Chem B*, 2012, 116 (49): 14228 – 14234.
- [3] 邵文莉, 林永锋, 林枫灿, 等. 中心金属 Ga 原子对 Corrole 三重态动力学及单线态氧产生的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61 (20): 480 – 487.
- [4] 张燕伟, 史蕾, 沈涵, 等. 一种用于光动力治疗的新型 Corrole 化合物发光特性研究[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(5): 67 – 70.
- [5] SIMKHOVICH L, GALILI N, SALTSMAN I, et al. Coordination chemistry of the novel 5, 10, 15 – tris (pentafluorophenyl) corrole; synthesis, spectroscopy, and structural characterization of its cobalt (III), rhodium (III), and iron (IV) complexes[J]. *Inorganic chemistry*, 2000, 39(13): 2704 – 2705.
- [6] NIGEL-ETINGER I, GOLDBERG I, Gross Z. 5d early-transition-metal corroles: a trioxo-bridged binuclear tungsten (VI) derivative [J]. *Inorganic chemistry*, 2012, 51(4): 1983 – 1985.
- [7] 彭开美, 邵文莉, 汪华华, 等. 溶剂对镓 Corrole 光谱性质的影响[J]. *物理化学学报*, 2011, 27 (1): 199 – 206.
- [8] SHI L, LIU H Y, PENG K M, et al. Synthesis of phenothiazine-corrole dyads: the enhanced DNA photocleavage properties [J]. *Tetrahedron Letters*, 2010, 51: 3439 – 3442.
- [9] KOWALSKA D, LIU X, TRIPATHY U, et al. Ground-and excited-state dynamics of aluminum and gallium corroles [J]. *Inorganic chemistry*, 2009, 48(6): 2670 – 2676.
- [10] LIU X, MAHAMMED A, UMAKANTA T, et al. Photophysics of Soret-excited tetrapyrroles in solution. III. Porphyrin analogues: Aluminum and gallium corroles [J]. *Chemical Physics Letters*, 2008, 459: 113 – 118.
- [11] 何霜, 陈欢, 张松金, 等. 铝镓卟啉配合物的发光性质, 堆积效应与轴向配位作用[J]. *无机化学学报*, 2013, 29(1): 15 – 23.
- [12] LIU X, TRIPATHY U, SHESHANATH V, et al. Photophysics of soret-excited tetrapyrroles in solution. II. Effects of perdeuteration, substituent nature and position, and macrocycle structure and conformation in zinc (II) porphyrins [J]. *J Phys Chem A*, 2008, 112: 8986 – 8998.
- [13] MATAGA N, SHIBATA Y, CHOSROWJAN H. Internal conversion and vibronic relaxation from higher excited electronic state of porphyrins; Femtosecond fluorescence dynamics studies [J]. *J Phys Chem B*, 2000, 104(17): 4001 – 4004.
- [14] TRIPATHY U, KOWALSKA D, LIU X, et al. Photophysics of soret-excited tetrapyrroles in solution. I. Metalloporphyrins: MgTPP, ZnTPP, and CdTPP [J]. *J Phys Chem A*, 2008, 112: 5824 – 5833.

(上接第 62 页)

- [6] 刘广海, 吴璟莉. 基于颜色体积直方图的图像检索 [J]. *计算机科学*, 2012, 39(1): 273 – 275.
- [7] 贺广南, 杨育彬, 阮佳彬, 等. 基于视觉一致性的图像检索 [J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(4): 503 – 509.
- [8] 傅启明, 刘全, 王晓燕, 等. 遗传反馈的多特征图像检索 [J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16 (10): 1858 – 1865.
- [9] DONOHO D. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289 – 1306.
- [10] ROMBERG J. Imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 14 – 20.
- [11] CANDÈS E, WAKIN M. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21 – 30.
- [12] JOEL G, KEITH F, BENJAMIN M. Efficient reconstruction of block – sparse signals [J]. *IEEE Statistical Signal Processing Workshop*, 2011: 629 – 632.
- [13] TANER I, ARIF N, NURDAL W. Nonconvex compressed sensing with partially known signal support [J]. *Signal Processing*, 2013, 93(1): 338 – 344.
- [14] LIU H X, SONG B, QIN H, et al. An Adaptive – ADMM Algorithm With Support and Signal Value Detection for Compressed Sensing [J]. *IEEE Trans on Signal Processing Letters*, 2013, 20(4): 315 – 318.
- [15] PATEL V, MALEH R, GILBERT A, et al. Gradient – based image recovery methods from incomplete Fourier measurements [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(1): 94 – 105.
- [16] CANDÈS E. The restricted isometric property and its implications for compressed sensing [J]. *Comptes Rendus Mathematique*, 2008, 346(9/10): 589 – 592.
- [17] RONALD A. Deterministic constructions of compressed sensing matrices [J]. *J of Complexity*, 2007, 23: 918 – 925.
- [18] 李志林, 陈后金, 李居朋, 等. 一种有效的压缩感知图像重建算法 [J]. *电子学报*, 2011, 39(12): 2796 – 2800.
- [19] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 压缩感知回顾与展望 [J]. *电子学报*, 2011, 39(7): 1651 – 1662.
- [20] 戴琼海, 付长军, 季向阳. 压缩传感研究 [J]. *计算机学报*, 2011, 34(3): 425 – 434.
- [21] 谢志鹏, 陈松灿. CSMP: 基于约束等距的压缩感知匹配追踪 [J]. *计算机研究与发展*, 2012, 49(3): 579 – 588.