

用于图像检索的三种分类器方法及其性能评价^{*}

王卫伟¹, 刘 伟^{1*}, 徐伟栋¹, 张 娟², 邵国良²

(1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江省肿瘤医院 放射科, 浙江 杭州 310022)

摘要: 为了研究基于不同分类器的基于内容图像检索(CBIR)方法检索结果之间的关系, 针对 3 种基于不同分类器的 CBIR 方法——基于解析特征相似性的 k 近邻方法、基于学习特征相似性的 BP 神经网络方法和基于信息论的互信息方法, 分析研究了它们各自的检索性能以及它们之间检索结果的相关度和权重相关度(相关度描述不同 CBIR 方法检索到相同 ROI 占返回 ROI 总数中的比例信息, 权重相关度则描述这些相同的 ROI 在各自检索结果中的不同排序位置信息)。实验结果表明, K-NN, BP-ANN 和 MI 之间检索结果相关度较差, 当返回 15 个 ROI 时, 平均查准率分别为 72.6%, 70.7% 和 68.9%, K-NN 与 MI, K-NN 与 BP-ANN 以及 MI 与 BP-ANN 之间检索结果相关度分别为 7.09%, 9.60% 和 14.37%, 权重相关度分别为 0.011, 0.023 和 0.039。这表明, 由于基于不同分类器, 不同 CBIR 方法可能会检索到视觉上 and 排列顺序上非常“不同的”相似图像。

关键词: 基于内容图像检索; 分类器; 性能评估; 相关度; 权重相关度

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)07-0047-06

Three classifiers and their performance evaluation for image retrieval

WANG Wei-wei¹, LIU Wei¹, XU Wei-dong¹, ZHANG Juan², SHAO Guo-liang²

(1. School of automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Department of Radiology, Zhejiang Cancer Hospital, Hangzhou 310022, China)

Abstract: Aiming at studying the retrieval results relation of different classifiers based content-based image retrieval(CBIR) methods, a preliminary analysis study of the retrieval performance, the association degree and the weight association degree of three CBIR methods (namely analytical feature similarity based K-NN method, learning feature similarity based BP-ANN method and information theoretic similarity based mutual information method) based on different classifiers for CBIR were presented. The association degree described the proportion of the same ROIs in retrieved ROIs for different CBIR methods, while the weight association degree showed the different sort position information for these ROIs in their retrieval results. The experimental results demonstrate that that association degree of retrieval is poor. The average precision of K-NN, BP-ANN and MI are 72.6%, 70.7% and 68.9% respectively, the association degree for K-NN vs MI, K-NN vs BP-ANN and MI vs BP-ANN are 7.09%, 9.60% and 14.37% respectively and the weight association degree for them are 0.011, 0.023 and 0.039 respectively when top 15 most similar ROIs are selected. The study indicates that different CBIR methods can retrieve quite different visually “similar” and order ROIs due to the difference in classifiers.

Key words: content-based image retrieval(CBIR); classifier; performance evaluation; association degree; weight association degree

0 引 言

在基于内容的图像检索(CBIR)中, 相似性度量是

一个重要的环节, 它通过描述图像内容的特征向量来度量两个图像之间的相似性。由于传统基于文本的图像检索在内容标注时存在着个人主观性, CBIR 通过计

收稿日期: 2009-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60705016); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1080740); 浙江省重大科技攻关国际合作资助项目(2006C14026)

作者简介: 王卫伟(1984-), 男, 浙江台州人, 主要从事基于内容的图像检索方面的研究. E-mail: wangww631@163.com

通信联系人: 刘 伟, 男, 副教授. E-mail: bme_liuwei@hdu.edu.cn

算图像的底层特征(如颜色、纹理和形状等)能较好地克服这个缺点,成为近年来计算机应用方面一个新的热点研究领域,并在多个领域开展研究。

在乳腺钼靶图像基于内容图像检索研究方面,近年来,研究者们做了大量的工作^[1-7]。依据不同的相似性度量标准,可以分为以下 3 大类:①基于解析特征相似性的 CBIR 方法;②基于学习特征相似性的 CBIR 方法;③基于信息论的 CBIR 方法。但是,当前 CBIR 研究大多集中于新 CBIR 方法研究或是其实际应用等方面^[8-11]。迄今虽然在 CBIR 方法研究上已有较多的报道,但是针对不同 CBIR 方法之间检索结果的相关一致性(相关度)和权重相关度鲜有研究,而这是 CBIR 在辅助诊断中取得成功应用所需要考虑的一个重要因素。

为此,本研究首次提出对上述 3 类 CBIR 系统的 3 种不同的基于内容检索方法展开研究,首先,分析和评估它们各自的检索性能;其次,对它们之间检索结果的相关一致性进行分析研究;最后,研究它们检索到相同的 ROI 在各自检索结果中的不同排列位置信息。

1 方法和数据

1.1 3 种常用 CBIR 方法

1.1.1 k 近邻

在 CBIR 中, k 近邻是一种典型的相似性度量方法。它利用特征向量之间的差异来度量两图像之间的相似性。当 $k=1$ 时, k 近邻定义等效为:

$$d(q, r) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i(q) - f_i(r))^2} \quad (1)$$

式中 q —查询 ROI; r —数据库中的 ROI 图像; $f_i(q)$ 和 $f_i(r)$ — q 和 r 的第 i 个特征分量。 q 和 r 之间的距离 $d(q, r)$ 越小,表明它们越相似。

1.1.2 BP 神经网络

BP 神经网络由于其良好的自学习功能和自适应性,被广泛应用于模式识别。本研究采用 3 层 BP 神经网络模型,其中输入层、隐藏层和输出层的节点数分别为 14(输入特征向量的维数), $\log_2 p$ (根据文献[12]中的经验公式确定,其中 p 为输入样本个数)和 1。BP 神经网络模型预先经过训练数据训练。

从数据库中随机挑选 30 个 ROI 用作 BP-ANN 训练集(15 个良性,15 个恶性,共 $C_{30}^2=435$ 对)。由 3 位乳腺 X 线图像研究人员依据个人“主观感知”相似性对训练集中任意两个 ROI(称为 ROI 对)从 1~9 打分(1 表示两个 ROI 不相似,9 表示非常相似),利用所打的主观分数来训练 BP-ANN 模型。研究人员按照预先

设定的两个 ROI 之间相似性标准独立打分,平均后作为最终分数。最终分数大于或等于阈值(实验中设置为 4)的视为该 ROI 对“相似”,否则视为“不相似”(无特别说明,本研究中判断检索到的 ROI 与查询病灶图像之间是否“相似”均采用此方法,下同)。

1.1.3 互信息

与上述两种 CBIR 相似性度量方法不同,基于信息论的互信息方法利用图像的全图信息来度量两个图像之间的相似性。如同欧式距离和 K-NN,通过选取互信息最大的前 k 个训练样本,这 k 个训练样本中出现训练样本最多的类别即为最终的测试样本类型,互信息也可以认为是一种分类器应用于 CBIR。Tourassi 等人采用互信息方法来计算两个病灶图像 X 和 Y 之间的相似性(X 为查询 ROI, Y 为数据库中病灶图像)。 X 和 Y 之间的互信息定义为:

$$MI = \sum_x \sum_y P(X, Y) \log_2 \frac{P(X, Y)}{P(X)P(Y)} \quad (2)$$

式中 $P(X, Y)$ — X 和 Y 之间的联合概率密度函数; $P(X)$, $P(Y)$ — X 和 Y 的边缘概率密度函数。

在本研究中,计算查询病灶图像与数据库中所有 ROI 之间的互信息,选择同查询病灶图像互信息值最大的 k 个 ROI 视为与查询病灶图像“相似”,反馈给医生参考。该方法不同于上述两种 CBIR 方法,由于互信息计算基于 ROI 的全图信息,这避免了图像分割、特征提取和特征选择等过程。

1.2 相关度

相关度是笔者提出的一个概念,它是 CBIR 临床应用中所需考虑的一个重要问题。对于同一个查询图像,检索返回相等 ROI 个数时,不同 CBIR 方法之间检索结果相关度(association degree, AD)定义为:AD = 不同 CBIR 方法检索到相同 ROI 的个数/返回 ROI 图像总个数。若 R_A 为 CBIR 方法 A 的检索结果, R_B 为 CBIR 方法 B 的检索结果, $AD_{(A, B)}$ 为 A, B 两种 CBIR 方法之间检索结果的相关度,那么:

$$AD_{(A, B)} = \frac{Num(R_A \cap R_B)}{Num(R_A \cup R_B)} \quad (3)$$

$AD_{(A, B)}$ 值越大,表明 A, B 两种 CBIR 方法之间检索结果相关一致性越好;当 $AD_{(A, B)}=1$ 时,则表明它们之间检索结果相同。

1.3 权重相关度

为了研究不同 CBIR 方法检索到相同 ROI 在各自检索结果中的不同排列位置信息,本研究提出了权重相关度(weight association degree, WAD)来描述这种排列位置信息。权重相关度作为一种新的检索结果评价

指标,是对 CBIR 技术中“查准率”和“权重查准率”的扩展,其定义为:

$$WAD = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S \frac{Sum(d_k)}{k^2}, WAD \in [0,1] \quad (4)$$

式中 S —返回查询图像的前 $S(S > 0)$ 个检索结果; $Sum(d_k)$ —两种不同 CBIR 方法各自检索返回的前 k 幅图像中相同 ROI 在各自检索结果中排列位置差值之和。

该方法确保两种 CBIR 方法检索结果中相同 ROI 之间排列位置差异较大的可以得到较大的权重相关系数。 WAD 越小则表明同一 ROI 在各自检索结果中的排列位置越接近。

1.4 实验数据

在本研究中,实验采用南佛罗里达大学 DDSM (Digital Database for Screening Mammography) 公共数据库^[13],从数据库中共选取 365 个肿块病灶图像用于本研究实验,其中,良性 146 个,恶性 219 个。图像灰度为 12 位,大小均为 512×512 pixels,肿块 ROI 的边缘轮廓均经过临床医生标注。其中部分实例如图 1 所示(所有 ROI 边缘轮廓均经过临床医生标注)。

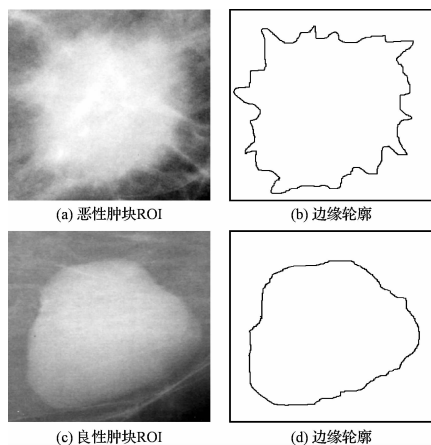


图1 部分实例图

实验数据分为 3 部分,先从 365 个 ROI 样本中随机选取 80 个作为查询 ROI(良性 40 个,恶性 40 个);再从剩余数据中随机挑选 30 个 ROI 用于 BP-ANN 的训练(良性 15 个,恶性 15 个);最后将余下的 255 个 ROI 作为历史病例数据库。

1.5 特征提取和归一化

选取适当的图像特征对基于特征 CBIR 方法的性能具有直接的影响。由于乳腺 X 线图像的特殊性,本研究中笔者计算每个病灶图像的 14 个纹理和病灶边缘轮廓的形状特征,其中包括病灶区像素平均灰度值、边缘轮廓的矩特征、紧凑度和偏心率等。特征的详细描述详见文献[14]的工作,特征向量数据 V 按下列方

法归一化到 0~1:

$$V = \begin{cases} \frac{V-m}{3 \times s}, & s > 0 \\ V-m, & s \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$V = \begin{cases} 1, & \text{if } V > 1 \\ -1, & \text{if } V < -1 \end{cases} \quad (6)$$

$$V = \frac{V+1}{2} \quad (7)$$

式中 m — V 的期望估计值; s — V 的方差。

2 实验结果及分析

实验在如下环境中进行:AMD X2 4000 + 处理器,主频 2.1 GHz,内存为 1.5 GB,操作系统为 Windows XP;采用的实验平台为 Matlab 7.6.0。

从数据中随机选择 80 个病灶图像作为查询 ROI(良、恶性 ROI 各 40 个)。分别对 K-NN, BP-ANN 和 MI 各自的检索性能以及它们之间检索结果的相关一致性和权重相关度进行分析研究。

2.1 检索性能分析和评价

平均查准率是评价乳腺 X 线图像 CBIR 性能的一个重要指标^[15],其定义为:

$$\text{查准率} = \frac{\text{返回与查询 ROI 相似的病灶图像数量}}{\text{返回 ROI 图像总数}} \quad (8)$$

返回 15 个 ROI 时,上述 3 种 CBIR 方法的平均查准率比较(这里两个病灶图像之间的相似性阈值设置为 $T=4$)如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,上述 3 种不同类别 CBIR 方法的检索性能差别较大。BP-ANN 与 MI 的平均查准率较低并较为接近,当返回 15 个 ROI 时,分别为 70.7% 和 68.9%。而基于解析特征相似性的 K-NN 方法获得 72.6% 的检索性能,远高于 BP-ANN 和 MI,其原因可能在于如下两个方面:①DDSM 数据库中 ROI 图像病灶背景区域较暗,噪声较多,而 ROI 中病灶背景区域面积所占的比例较高(如图 1 所示),使得不同 ROI 图像整体差异不明显。由于 MI 基于 ROI 的全图信息,对图像噪声较为敏感,这使得基于互信息的 CBIR 方法难以获得较优的检索性能;②虽然 BP-ANN 方法基于 ROI 图像的特征,与 ROI 的全图像素灰度值分布信息无关,但 BP-ANN 需要经过预先训练来调整权重值,建立模型。训练数据库的大小,打分后训练数据不同分数阈值 T (本研究选取 $T=4$)的选取以及不同的参数选择等均会影响 BP-ANN 性能,影响其泛化能力。使得 BP-ANN 方法检索性能大大低于采用相同

特征的 K-NN 方法。

表 1 返回 15 个 ROI 时,3 种不同 CBIR 方法平均查准率比较

不同 CBIR 方法	K-NN(K = 1)	BP-ANN	MI
平均查准率/(%)	72.6	70.7	68.9

2.2 3 种 CBIR 方法检索结果相关度分析

K-NN,BP-ANN 和 MI 之间检索结果相关度比较的部分实验结果如表 2 所示。

表 2 返回不同 ROI 个数时,3 种 CBIR 方法之间检索结果相关度比较

返回 ROI 个数 K	K-NN 与 MI	K-NN 与 BP-ANN	MI 与 BP-ANN
	/(%)	BP-ANN/(%)	/(%)
K = 10	4.77	5.41	5.23
K = 15	7.09	9.60	14.37
K = 20	11.47	14.86	21.33
K = 25	16.37	19.38	25.87

可以看出,随着返回 ROI 个数的增加,3 种 CBIR 方法之间检索结果相关度逐渐增大(从返回 10 个 ROI 时 K-NN 与 MI 之间的 4.77% 增加到返回 25 个 ROI 时 MI 与 BP-ANN 之间的 25.87%)。返回 ROI 个数相对历史病例数据库中 ROI 总数的比例越高(本研究实验数据库中 ROI 数量为 255 个),不同 CBIR 方法之间检索结果的相关度越大。在返回一定的 ROI 数量时(如返回 15 个),3 种不同 CBIR 方法之间检索结果相关度均较差。当返回 ROI 个数大于 10 时,MI 与 BP-ANN 之间检索结果相关度相对较高,接近于 K-NN 与 MI 之间检索结果相关度的 2 倍(如表 2 所示),而 K-NN 与 BP-ANN 同 K-NN 与 MI 之间检索结果的相关度较为接近。上述 3 种 CBIR 方法之间检索结果相关度比较如图 2 所示。

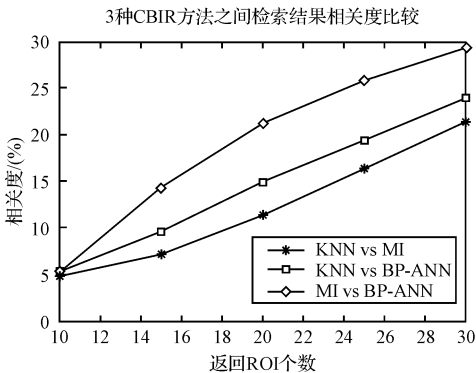


图 2 3 种 CBIR 方法之间检索结果相关度比较

其主要原因在于:①由于 MI 和 BP-ANN 检索性能较为接近(如表 1 所示,返回 15 个 ROI 时,分别为 68.9% 和 70.7%),对于相同的查询 ROI,将会检索到更多“相同”的相似图像,因而相关度相对较高;②K-NN 与 MI 检索性能差别较大(返回 15 个 ROI 时,分别

为 72.6% 和 68.9%),对于同一查询 ROI,它们在返回相同 ROI 个数时将检索到更多“不相同”的相似图像,影响其相关度;③同②类似,K-NN 与 BP-ANN 各自检索性能差异较大,它们之间也将难以获得良好的相关一致性。

但是,在面向乳腺 X 线图像 CAD 的 CBIR 临床应用中,由于反馈给医生参考的与查询 ROI“相似”的病灶图像数量不可能太多(通常不大于 15 个),此时,不同 CBIR 方法之间检索结果相关度较低(小于 15%)。不同 CBIR 系统由于检索到非常“不相同”的相似病灶图像,难以提供一个相对一致的“意见”来让临床医生接受 CBIR 的检索结果,使得 CBIR 系统难以在临床上真正起到辅助诊断作用。

2.3 3 种 CBIR 方法检索结果权重相关度分析

由于不同 CBIR 方法检索到相同的 ROI 在它们各自检索结果中的排列位置不同,而这种排列位置信息在面向乳腺 X 线 CAD 基于内容图像检索中起着重要作用(检索结果中排列靠前的 ROI 对医生诊断结果的影响会比排列靠后的 ROI 要大),这是 CBIR 方法在辅助诊断中能否取得成功应用所需要考虑的一个重要因素。笔者利用权重相关度来表征不同 CBIR 方法检索到相同的 ROI 在各自检索结果中的不同排列位置信息。返回不同 ROI 个数时,K-NN,BP-ANN 和 MI 之间检索结果权重相关度比较如表 3 所示。

表 3 返回不同 ROI 个数时,3 种 CBIR 方法之间检索结果权重相关度比较

返回 ROI 个数 K	K-NN 与 MI	K-NN 与 BP-ANN	MI 与 BP-ANN
K = 10	0.007 5	0.015 0	0.037 0
K = 15	0.010 7	0.022 6	0.039 3
K = 20	0.014 8	0.030 2	0.041 2
K = 25	0.020 0	0.038 2	0.044 6

由表 3 可知,随着返回 ROI 个数的增加(K 值增大),K-NN 与 MI,K-NN 与 BP-ANN 以及 MI 与 BP-ANN 检索到相同 ROI 在各自检索结果中的排列位置差异增大(WAD 值变大)。由 1.3 节和公式(4)可知,两种 CBIR 方法检索结果中相同 ROI 之间排列位置差异较大的可以得到较大的权重相关系数,结合表 2 可以得出,K 越大,K-NN,BP-ANN 和 MI 之间检索结果的相关度越大,但同时它们检索到相同 ROI 在各自检索结果中的排列位置差异也将越变大(权重相关度值变大)。对于相同的返回 ROI 个数,MI 与 BP-ANN 之间的权重相关度最差(值越大表明权重相关度越差)。这表明,相比 K-NN 与 MI,K-NN 与 BP-ANN,虽然 MI

与 BP-ANN 能检索到更多相同的 ROI,但是这些相同 ROI 在它们各自检索结果中排列位置差异较大,其原因类似于 2.2 节中的讨论。在实际应用中,反馈给医生参考的与查询 ROI“相似”的 ROI 数据并非越多越好,由于返回太多的“相似”ROI 反而影响医生的正常诊断效率,依据临床经验,返回 ROI 个数通常不大于 15 个,不同 CBIR 方法之间检索结果的位置差异较大。K-NN,BP-ANN 和 MI 之间检索结果权重相关度比较如图 3 所示。

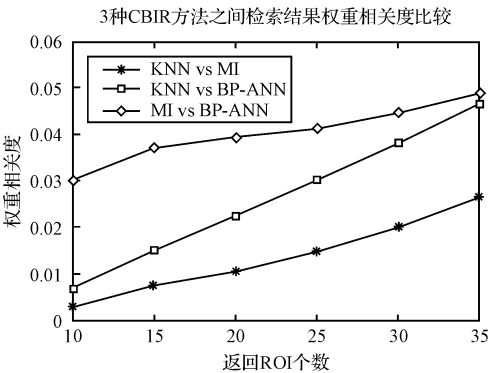


图3 3种CBIR方法之间检索结果权重相关度比较

综上所述,返回相同 ROI 个数时,3 种 CBIR 方法之间检索结果的相关度关系为:K-NN 与 MI < K-NN 与 BP-ANN < MI 与 BP-ANN;而权重相关度关系为:K-NN 与 MI > K-NN 与 BP-ANN > MI 与 BP-ANN。

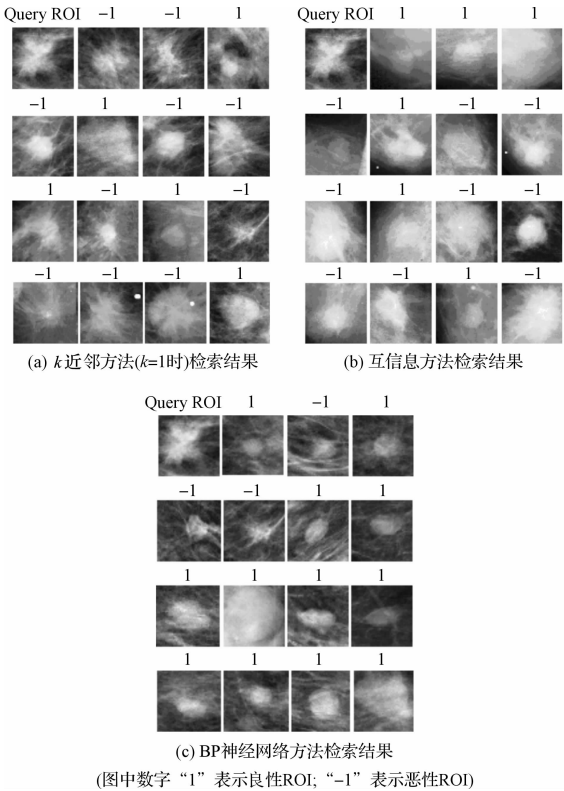


图4 对于同一查询 ROI 图像,3 种不同 CBIR 方法检索结果比较

本研究的实验结论仅仅是初步的,因为影响实验结果的因素可能会是多方面的,如历史病例数据库的大小^[16]、数据库中 ROI 的良恶性比例、ROI 大小以及病灶图像特征提取和选择等。本研究中 3 种 CBIR 方法检索结果的一组实例如图 4 所示。

3 结束语

本研究对基于 K-NN,BP-ANN 和互信息的 3 种不同类别的 CBIR 方法各自的检索性能以及它们之间检索结果的相关一致性和权重相关度进行分析研究。实验结果表明,由于相似性测度的不同,不同 CBIR 方法检索性能差异较大,可能会检索到非常“不同的”以及“不同排列位置的”相似病灶图像。当返回 15 个 ROI 时,K-NN,MI 和 BP-ANN 各自的平均查准率分别为 72.6% ,70. 7% 和 68. 9% ,K-NN 与 MI,K-NN 与 BP-ANN 以及 MI 与 BP-ANN 之间检索结果的相关度分别仅为 7. 09% ,9. 60% 和 14. 37% ,权重相关度分别为 0. 010 7,0. 022 6和0. 039 3。返回相同 ROI 个数时,3 种 CBIR 方法之间检索结果的相关度关系为:K-NN 与 MI < K-NN 与 BP-ANN < MI 与 BP-ANN;而权重相关度关系为:K-NN 与 MI > K-NN 与 BP-ANN > MI 与 BP-ANN。

本研究结果表明,目前不同 CBIR 方法较难获得一致的检索结果,因而难以表明哪种 CBIR 方法“真正”有效。此外,由于错误的检索结果可能会误导影像医生的正常诊断,这使得目前 CBIR 检索结果还难以获得临床医生的认可和采纳。本研究结果为同行研究者们提供了一个新的参考。

参考文献 (References) :

[1] ZHENG Bin. Computer-aided diagnosis in mammography using content-based image retrieval approaches: current status and future perspectives [J]. **Algorithms**,2009 (2) :828 - 849.

[2] ZHENG Bin, MELLO-THOMS C, WANG X, et al. Interactive computer aided diagnosis of breast masses: computerized selection of visually similar image sets from a reference library[J]. **Acad Radiol**,2007 (14) :917 - 927.

[3] EI-NAQA I, YANG Y, GALATSANOS N P, et al. A similarity learning approach to content-based image retrieval: Application to digital mammography [J]. **IEEE Trans. Med. Imaging**,2004(23) :1233 - 1244.

[4] LO S C, LIN J S, FREEDMAN M T, et al. Application of artificial neural networks to medical image pattern recognition: detection of clustered microcalcifications on mammograms and lung cancer on chest radiographs[J]. **J. of VL-**

- SI in Sign. Proc.**, 1998(18):263 – 274.
- [5] TOURASSI G D, HARRAWOOD B, SINGH S, et al. Information-theoretic CAD system in mammography: entropy-based indexing for computational efficiency and robust performance[J]. **Med. Phys.**, 2007(34):3193 – 204.
- [6] TOURASSI G D, VARGAS-VORACEK R, CATARIOUS D, et al. Computer-assisted detection of mammographic masses: a template matching scheme based on mutual information[J]. **Med. Phys.**, 2003(30):2123 – 2130.
- [7] TOURASSI G D, HARRAWOOD B, SINGH S, et al. Information-theoretic CAD system in mammography: entropy-based indexing for computational efficiency and robust performance[J]. **Med. Phys.**, 2007(34):3193 – 3204.
- [8] ALTO H, RANGAYYAN R M, DESAUTELS J E. Content-based retrieval and analysis of mammographic masses[J]. **J. Electron. Imaging**, 2005(14):16 – 23.
- [9] KINOSHITA S K, DEAZEVEDO-MARQUES P M, PEERELRA R R, et al. Content-based retrieval of mammograms using visual features related to breast density patterns[J]. **J. Digit Imaging**, 2007(20):172 – 190.
- [10] MAZUROWSKI M A, HABAS P A, ZURADA J M, et al. Decision optimization of case based computer-aided decision systems using genetic algorithm with application to mammography[J]. **Phys. Med. Biol.**, 2008(53):895 – 908.
- [11] ROSA N A, FELIPE J C, TRAINA A J, et al. Using Relevance Feedback to Reduce the Semantic Gap in Content-based Image Retrieval of Mammographic Masses [C]// Conf. Proc. IEEE Med. Biol. Soc. Vancouver: [s. n.], 2008:406 – 409.
- [12] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [13] University of South Florida. DDSM[EB/OL]. [日期不详]. <http://marathon.csee.usf.edu/Mammography/Database.html>.
- [14] ZHENG B, LU A, HARDESTY L A, et al. A method to improve visual similarity of breast masses for an interactive computer-aided diagnosis environment[J]. **Med. Phys.**, 2006(33):111 – 117.
- [15] SMITH J R, CHANGE S F. Tools and Techniques for Color Image Retrieval [C]//Proc of SPIE: Storage and Retrieval for Image and Video Database. San Diego: [s. n.], 1996:426 – 437.
- [16] PARK S C, SUKTHANKAR R, MUMMERT L, et al. Optimization of reference library used in content-based medical image retrieval scheme[J]. **Med. Phys.**, 2007(34):4331 – 4339.

[编辑: 李 辉]

(上接第 17 页)

- [2] 杨 甫, 许伯强, 杨桂兰. 变频器供电下异步电动机转子断条故障仿真研究[J]. 机电工程技术, 2009, 38(1):67 – 69.
- [3] 李 凤. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994:1 – 110.
- [4] 曹承志, 曲红梅, 路战红, 等. Matlab 软件包中 simulink 环境下直接转矩控制系统的仿真[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(2):112 – 114.
- [5] 孟庆春, 叶锦娇, 郭凤仪. 异步电动机直接转矩控制系统的改进方案[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13):118 – 122.
- [6] CASADEI D, SERRA G, TANI A. Performance analysis of a speed-sensorless induction motor drive based on a constant-switching-frequency DTC scheme [J]. **IEEE IA**, 2003, 39(2):476 – 483.
- [7] KLRIS N, YATIM A. An improved stator flux estimation in steady-state operation for direct torque control of induction machine[J]. **IEEE Trans. on Industry Applications**, 2002, 38(1):110 – 116.
- [8] WAHAB H F A, SANUSI H. Simulink model of direct torque control of induction machine[J]. **American Journal of Applied Sciences**, 2008, 5(8):1083 – 1090.
- [9] BUJA G S, KAZMIERKOWSKI M P. Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey[J]. **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, 2004, 51(4):744 – 757.
- [10] 廖晓钟, 马克明, 周乐芳. 一种细分空间的 PWM 波形实时生成方法[J]. 电气传动, 2004, 34(3):13 – 15.
- [11] SHYU Kuo-kai, SHANG Li-jen, CHEN Hwang-zhi. Flux compensated direct torque control of induction motor drives for low speed operation[J]. **IEEE Trans. Ind. Electronics**, 2004, 19(6):545 – 553.
- [12] 孙笑辉, 张曾科, 韩曾晋. 基于直接转矩控制的感应电动机转矩脉动最小化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8):109 – 112.

[编辑: 张 翔]