

基于加权距离的机械设计图像异步检索方法

方乃伟¹, 吕学强^{1,2}, 张丹^{1*}, 王弘蔚^{1,2}

(1. 网络文化与数字传播北京市重点实验室(北京信息科技大学), 北京 100101;

2. 北京拓尔思信息技术股份有限公司, 北京 100101)

(* 通信作者电子邮箱 bihaiqingkong_1111@126.com)

摘要:根据机械设计图像的形状特征,提出一种利用加权距离实现的多特征异步检索方法。首先利用机械设计图像的外接圆距离特征进行初步检索,再结合初步检索结果集的位置计算输入图像和初步检索结果集的加权 Hu 不变矩特征距离,并据此获得最终的检索结果。实验表明,与单一特征的检索方法相比,该方法在机械设计图像检索中有更高的查准率和查全率。

关键词:机械设计图像;外接圆距离;Hu 不变矩;加权距离;异步检索

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Weighted-distance-based asynchronous retrieval for mechanical design images

FANG Naiwei¹, LYU Xueqiang^{1,2}, ZHANG Dan^{1*}, WANG Hongwei^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Internet Culture and Digital Dissemination Research

(Beijing Information Science and Technology University), Beijing 100101, China;

2. Beijing TRS Information Technology Company Limited, Beijing 100101, China)

Abstract: According to the shape features of mechanical design images, an asynchronous retrieval method based on weighted distance was proposed. The algorithm firstly got preliminary results from the image database by using the circumcircle distance feature, and then calculated the weighted distances between the input image and the preliminary results, by considering both the formal output positions and the Hu invariant moments feature. The experiments show that compared with the traditional methods, the proposed method gets higher precision and recall ratio.

Key words: mechanical design image; circumcircle distance; Hu invariant moment; weighted distance; asynchronous retrieval

0 引言

机械设计图像是对机械设计进行描述的主要载体,设计者在进行机械设计前需要通过查询同类型的机械设计来了解相关的发展现状,并从中获取经验和灵感,更重要的是可以避免对他人的设计侵权造成麻烦,因此对已有机械设计图像进行检索和管理,具有较大的实际意义。以数字形式保存的机械设计图像主要有两种,一种是矢量图,是通过计算机辅助设计(Computer-Aided Design, CAD)软件或对数字图像进行矢量化而生成的;另一种为非矢量图,主要通过将现有的机械图纸进行扫描而得到的数字图像,主要格式有 jpg, tif, bmp 等。针对矢量图检索的研究,一般是利用其能够比较容易地获得图元空间关系的特点,将图中的复杂图形分解成简单的几何形体并以它们的空间关系作为特征,以空间关系的相似度来衡量两幅图像是否相似^[1-2];而针对非矢量图检索的研究,则一般需要利用颜色、纹理、形状及区域等视觉特征对图像进行描述,并根据对应特征的相似性完成图像的检索。由于机械设计图像一般为二值图像且图像的纹理信息并不明显,颜色特征和纹理特征都不适合于对机械设计图像进行描述,因此,本文从机械设计图像的形状特征方面对图像进行描述,并提出一种将外接圆距离特征和 Hu 不变矩特征相结合的异步组

合检索方法。

1 相关工作

基于图像形状特征的描述方法总体来说可以分为两类:基于轮廓的方法和基于区域的方法。近年来已经有许多学者开展了一系列卓有成效的研究工作:文献[3]提出用链码来描述图像的形状,利用具有一定长度和方向的直线段表示目标的边界,但该方法容易受噪声影响;文献[4]给出一种基于边缘方向直方图的方法,对经过边缘检测的图像进行边缘方向的统计,将经过归一化的直方图作为特征,具有尺度不变性,但是不满足图像的旋转不变性。此外,也有文章提出基于矩的形状描述符,如 Legendre 矩^[5]、Zernike 矩^[6]、伪 Zernike 矩^[7-8]等,这些描述符将图像区域内的所有像素都考虑在内,受噪声影响和形状变化的影响较小。虽然国内外已经对“如何通过单一视觉特征进行检索从而得到更好的效果”进行了大量的研究,但实验表明,基于多种特征综合的图像检索结果优于单一特征检索^[9]。

文献[10]将多特征综合检索分为两种:一种是同步组合检索,另一种是异步组合检索。同步组合的基本思想是在一次查询中利用图像的多种特征进行相似性度量,并对每个度量赋以相应的权值,最后通过求加权和得到距离,实现检索结

收稿日期:2012-11-15;**修回日期:**2013-01-05。 **基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61271304);北京市教委科技发展计划重点项目(KZ201311232037);国家科技支撑计划项目(2011BAH11B03)。

作者简介:方乃伟(1986-),男,福建福州人,硕士研究生,CCF 会员,主要研究方向:多媒体信息检索与处理;吕学强(1970-),男,山东鱼台人,教授,CCF 会员,主要研究方向:中文信息处理、多媒体信息处理;张丹(1988-),女,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向:多媒体信息处理;王弘蔚(1966-),男,湖南长沙人,副教授,主要研究方向:全文检索。

果的输出,图1是同步组合特征检索过程的示意图。目前有很多针对同步组合特征检索的研究,如文献[11]利用多种区域形状特征的结合实现了商标图像检索结果的有效优化,文献[12]针对MPEG-7单一描述符特征检索效率低的问题,提出分块加权的特征融合方法,提高了检索的查准率和查全率。由于同步组合检索的权重难以选择,现在已经有不少研究将多特征融合与机器学习方法结合在一起,通过相关反馈进行权重的调整从而实现图像的有效检索^[13-15]。

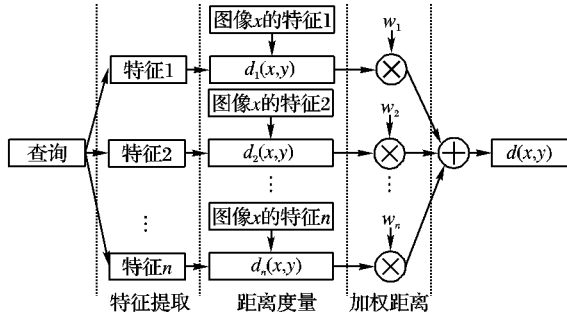


图1 同步组合检索示意图

图像异步组合检索方法的基本思想是将上一级经过相似性比较后的输出结果集成为下一级的特征提取与比较的输入,通过逐次进行相似性匹配,逐步缩小检索空间,从而提高检索精度。图2是异步组合检索示意图,但并未对每一步的检索策略提出具体的方法。本文对异步组合检索进行了进一步的研究,实现了图像检索结果准确度的有效提高。

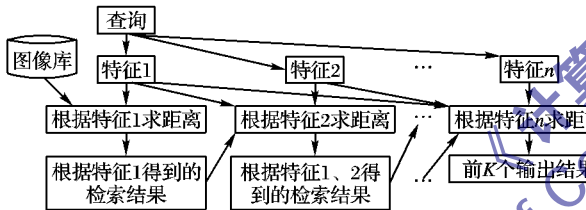


图2 异步组合检索示意图

2 机械设计图像异步组合检索方法

本文首先提出外接圆距离特征提取方法对机械设计图像的形状进行描述,根据与输入图像的外接圆距离特征的相似性,从图像库中输出一个初步检索结果集合,在此基础上计算输入图像和初步结果集合图像的Hu不变矩特征距离,并根据待检图像在初步检索结果中的位置对特征距离进行加权调整,从而实现图像的二级检索,得到最终结果集。

2.1 基于外接圆距离特征的初步检索

机械设计图像由于种种因素导致其边缘常出现各种毛刺和形变的现象,基于轮廓的形状描述符容易受此影响导致特征表述不够准确。本文在文献[10]的边界距离直方图基础上,提出基于区域的外接圆距离特征描述符(Circumcircle Distance Descriptor, CDD),并根据该描述符对机械设计图像库进行初步检索。

对于一幅 $w * h$ 的图像 $f(x, y)$, 其质心 (x_c, y_c) 可由下式求得:

$$\begin{cases} x_c = \sum \sum xf(x, y) / \sum \sum f(x, y) \\ y_c = \sum \sum yf(x, y) / \sum \sum f(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

则图像中的目标像素点 (x_k, y_k) 到质心的距离为:

$$Distance_i = \sqrt{(x_c - x_k)^2 + (y_c - y_k)^2}; \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

其中: n 为目标点像素个数,令 $RADIUS = \max\{Distance_i\}$, 则将图像的外接圆定义为以 (x_c, y_c) 为圆心,以 $RADIUS$ 为半径的圆。由此可得,图像中的目标像素点到外接圆的距离为:

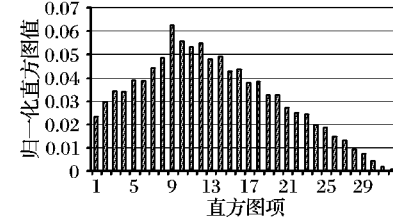
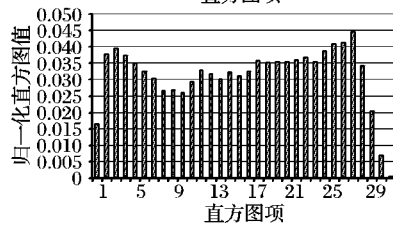
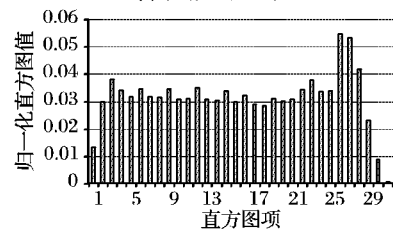
$$Distance_i^{CR} = RADIUS - Distance_i; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

在得到目标像素到外接圆的距离后,根据此建立基于区域的距离分布直方图对机械设计图像的形状进行描述:将距离区间 $[0, RADIUS]$ 划分成 R 个等距离的区间 (H_1, H_2, \dots, H_R) , 并统计落在各个区间内的点数 $sum(r)$ ($r = 1, 2, \dots, R$)。由外接圆的定义易得该距离分布直方图具有旋转不变性和平移不变性,但由于每幅图的外接圆半径不尽相同导致相应的直方图宽度各不相同,因此该距离分布直方图不具备旋转不变性。为解决这一问题,本文对距离分布直方图按照式(4)进行归一化,得到图像的外接圆距离特征描述子 $F^{CDD}(f_1^{CDD}, f_2^{CDD}, \dots, f_R^{CDD})$ 。图3给出了在 $R = 32$ 的情况下,三幅机械设计轮廓区域图对应的归一化距离分布直方图,从图中可以看出,形状比较相似的前两幅图像其直方图分布情况比较相似,二者与第三幅的分布情况差别较大,这说明外接圆距离特征具有一定的区分性。

$$f_r^{CDD} = sum(r) / n; \quad r = 1, 2, \dots, R \quad (4)$$



(a) 轮廓区域图像



(b) 轮廓区域图像对应的归一化距离直方图

图3 归一化的外接圆距离分布直方图

在初步检索阶段,假设有一幅输入图像 I_m , 本文分别计算 I_m 和机械设计图像库中所有图像外接圆距离特征的欧氏距离,并根据距离得到一个图像数为 N 的初步检索结果集,记为 $R_{INT} = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$, 其中 R_1, R_2, \dots, R_N 按照与 I_m 的距离从小到大进行排列。

2.2 基于Hu不变矩的二级检索

基于外接圆距离特征的初步检索为进一步检索提供了一个经过筛选且空间相对较小的检索集合,在二级检索中利用机械设计图像的Hu不变矩特征实现了输出结果精确度的提

高。由文献[16]可知, Hu 不变矩具有平移、旋转和缩放不变性, 具有较好的区分性。一幅图像的 7 个不变矩 $\{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7\}$ 可以用下式表示:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \\ \varphi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ \varphi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \\ \varphi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \\ \varphi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ \varphi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \\ \varphi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{02})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{12} - \eta_{30})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \end{cases} \quad (5)$$

利用式(5)对输入图像 I_{in} 和初步检索结果集 R_{INT} 中各幅图像分别提取 Hu 不变矩特征, 并计算 I_{in} 和 R_{INT} 中图像的距离, 将 R_{INT} 中排在第 i 位的图像和 I_{in} 的距离记为 D_i^{Hu} ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), 二级检索时若根据 D_i^{Hu} 的大小得到最终的输出结果, 则得到的结果只是单一的利用 Hu 不变矩特征对 R_{INT} 进行重新排序, 没有综合考虑到初步检索对图像相似性的影响, 本文结合初步检索结果对 Hu 不变矩相似性距离 D_i^{Hu} 进行了调整, 由此使得结果能够兼顾外接圆距离特征和 Hu 不变矩特征的相似性。

2.3 基于初步结果集位置的距离加权方法

通过对初步检索结果集 R_{INT} 的分析可知, 该集合为每一幅图像都设定了位置信息以表示在外接圆距离特征下图像与输入图像的相似性, 本文根据这些位置信息对特征距离 D_i^{Hu} ($i = 1, 2, \dots, N$) 进行加权调整, 利用加权距离作为输入图像和 R_{INT} 图像相似性度量的标准, 进而得到最终的检索结果集。

对于 R_{INT} 中的图像 R_1, R_2, \dots, R_N , 图像所处的位置 i 越大, 则表示在初步检索中该图像与输入图像的特征距离越大, 与输入图像的相似度越小。据此我们可以假设: 在 R_{INT} 中, 随着 i 的增大, 图像外接圆距离特征对最终图像相似度的贡献越小。基于以上假设, 在二级检索中, 对每个位置赋予权重 W_i ($i = 1, 2, \dots, N$), 用于对特征距离 D_i^{Hu} ($i = 1, 2, \dots, N$) 进行相应的加权计算, 其中权重计算公式如下:

$$W_i = \begin{cases} i/N, & i \leq m \\ i^2/N, & m < i \leq N \end{cases} \quad (6)$$

m 为二级检索输出的结果图像数。式(6)表明, W_i 随着 i 的增加逐步增大, 当 i 值大于 m 时其值增大的趋势变得更剧烈。根据式(6)和特征距离 D_i^{Hu} 按下式计算加权距离:

$$D_i^w = W_i * D_i^{Hu} \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)可知, 通过计算加权距离, 对 R_{INT} 中位置靠前的图像特征距离进行了相对缩小, 对位置靠后的图像的特征距离进行了相对放大。这样就保证了在计算 Hu 不变矩相似性的同时, 在初步检索阶段具有较高相似性的图像不至于被排除在最终的结果集之外。

3 实验结果及分析

3.1 实验设置

为验证本文提出的外接圆距离特征描述子(CDD)和异

步组合特征检索方法针对机械设计图像检索的有效性, 本节在同一个机械设计图像库中利用本文方法、Hu 不变矩方法以及傅里叶描述子(Fourier Descriptor, FD)方法进行检索实验并进行对比, 特别地, 在异步检索实验中, 本文将初步检索结果集个数设置为 50, 最终结果集个数设置为 10。本文测试数据总共包含 1269 幅机械设计图像, 其中包含 28 类共 629 幅已经分好类的图像以及 640 幅未分类图像, 本文从 28 个已经分好类的机械设计图像中选择了 15 个类共 361 幅图像用于检索实验。由于大部分机械设计图像都包含标引线和数字, 实验中需要将其去除, 因此在检索实验之前, 本文首先利用孔洞填充和形态学开操作等方法对机械设计图像进行了轮廓区域提取, 具体步骤如图 4 所示。

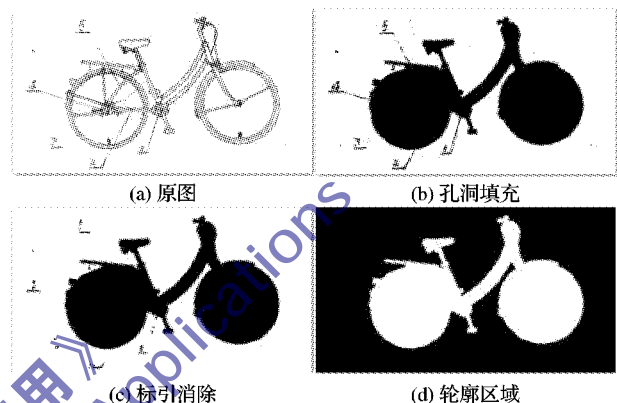


图4 机械设计图像轮廓区域提取

3.2 实验结果

首先对图像库中的图像按照 2.1 节方法获得图像轮廓区域并分别提取它们的 CDD 特征以及 Hu 不变矩特征, 完成图像特征库的构建。以图像库中的自行车类为例进行实验说明, 该类别下共含 24 幅图像, 每幅输入图像的异步检索过程如下: 首先计算输入图像的特征并和图像特征库进行相似性计算, 根据特征距离大小得到初步结果集合; 然后, 提取输入图像 Hu 不变矩特征, 计算输入图像和初步结果集合图像基于 Hu 不变矩的特征距离, 并根据式(6)得到加权距离; 最后, 根据加权距离大小得到最终结果集。本文在实验时将初步结果集的图像数设置为 50, 最终结果集图像数设置为 10。图 5 给出了一幅输入图像从图像库检索得到的初步检索结果集(只给出了前 10 幅图像), 图 6 是经过二级检索后得到最终检索结果。将本文方法和两种基于单一特征的检索方法进行比较, 统计 24 幅实验图像在三种方法下的查准率得到如图 7(a)所示的对比曲线。根据上述方法对选择的 15 个类分别进行检索实验, 并统计每个类的平均查准率, 得到每个类在不同方法下的平均查准率曲线如图 7(b)所示。

为进一步验证异步组合检索的效果, 本文从查全率上将初步检索的结果集和经过加权距离优化后的结果集进行了对比, 分别统计两种情况下自行车类中的 24 幅图像在返回结果为 i ($i = 10, 20, 30, 40, 50$) 时的平均查全率, 如图 7(c)所示。

3.3 结果分析

从图 5 的初步检索结果可以看出, 前 10 幅结果图像中符合要求的图像数较少, 精度不够高, 说明单一特征对不同图像间的区分能力有限, 无法满足精度要求较高的检索。图 6 是利用本文方法得到的最终结果, 和图 5 相比可以看出, 图像的查准率得到很大的提高, 说明通过结合 CDD 特征和 Hu 不变矩特征的异步检索能有效弥补单一特征的弱点, 使输出结果

更符合人们的要求,由于在二级检索阶段对相似性距离进行了加权调整,因此可以看出在最终结果集中排在前两位的图

像和初步结果集中的完全相同,这说明本文方法综合考虑到了初步检索对最终结果的影响。

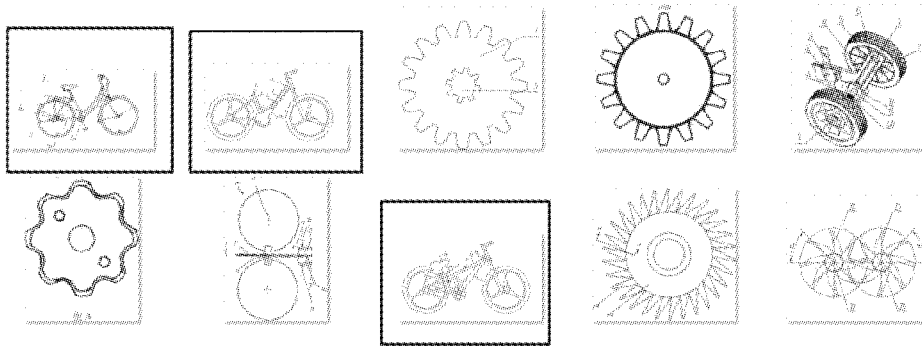


图 5 异步图像的初级检索结果(黑框处为正确的结果)

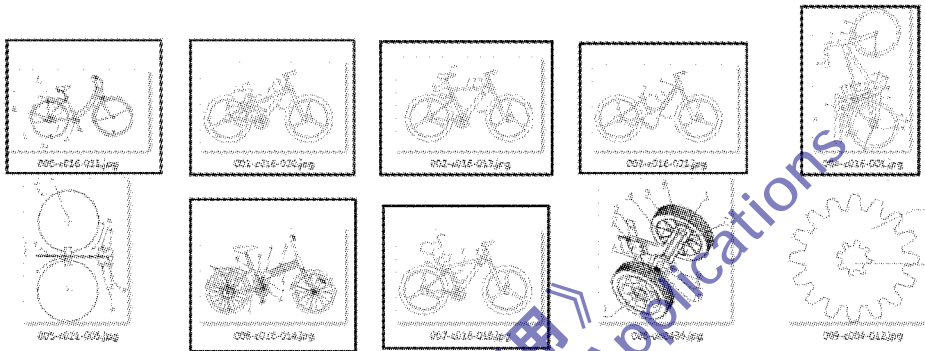


图 6 异步图像检索的二级检索(黑框处为正确的结果)

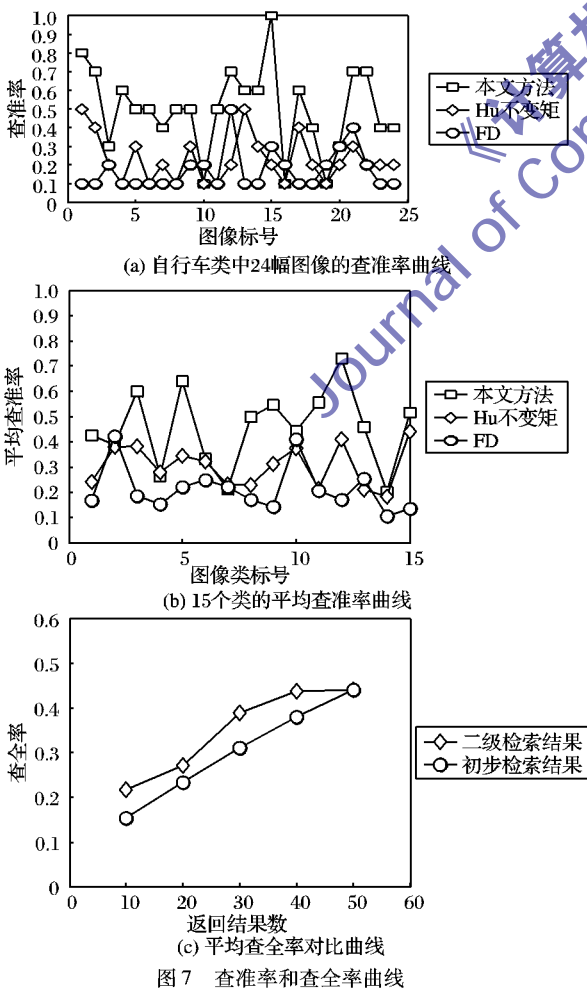


图 7 查准率和查全率曲线

由图 7(a)可知,在自行车类的图像检索中,对除第 10、第 16、第 19 之外的其余 21 幅图像,利用本文方法得到的检索查

准率相对于 Hu 不变矩和 FD 方法有了较大的提高,说明本文方法具有一定的优越性,而这三幅图像上本文方法的查准率则低于或者等于两种单一特征检索方法。由于本文方法在二级检索需要在初级检索得到的结果上进行,因此初级检索中特征的检索性能对最终的检索结果有至关重要的影响。表 1 给出了前述三幅检索效果不理想的图像在初级检索得到的结果与两种单一特征检索方法在返回结果数为 50 时得到的正确图像数。从表中可以看出,CDD 方法在这三幅图像中没有得到足够多的正确图像数,检索性能不够理想,这导致二级检索之后检索效果无法得到提高。以上结果说明,本文方法在初级检索阶段,若其检索效果较差,则有可能将大部分正确结果排除在最终结果集之外,此时二级检索无法发挥其特点,最终的检索效果也会不尽理想。在检索中对这种情况可以考虑用以下两种方法进行改进:1) 设置更大的初级检索结果集个数,使初级检索结果得到更多的正确图像;2) 针对效果不好的图像,选择不同的初级检索和二级检索特征,如图像 16,若选择 Hu 不变矩作为其初级检索特征,初级检索结果集就能得到更多的正确图像,从而为二级检索提供更大的效果提升空间。

表 1 三幅图像检索结果中返回的正确图像数

图像标号	CDD	Hu 不变矩	FD
10	1	2	2
16	1	5	3
19	1	1	3

从图 7(b)可以看出,虽然在不同类别下的异步特征检索的平均查准率各不相同,但几乎每个类的平均检索查准率都高于单一特征检索方法。综上可知,本文方法具有一定的稳定性且相较于单一特征检索方法,检索精度有较明显的提升。通过图 7(c)的平均查全率对比可知,和初步检索结果相比,

二级检索结果在不同返回结果下的查全率有所提升,虽然在返回结果为 50 的时候二者的查全率是相同的,但二级检索的查全率比初级检索能更快地趋于稳定,这说明二级检索实现了对初步检索结果的优化,从总体上提高了正确结果的排名。

4 结语

本文结合机械设计图像的外接圆距离特征和 Hu 不变矩特征,提出了一种异步组合检索方法,通过对二级检索相似性距离的加权调整,提高了机械设计图像的检索效果。本文方法相对于使用 Hu 不变矩和 FD 的单一特征检索方法,有更高的图像检索查准率。但本文方法针对机械设计图像的查准率和查全率仍有较大的提升空间。因为本文方法所使用的特征均是区域特征,所以下一步研究工作将从更多方面进行考虑,比如着眼于机械设计图像的如何将图像的轮廓特征和区域特征有效融合以及预处理时有效的轮廓平滑方法,从而进一步提高图像检索效果。

参考文献:

- [1] MANUEL F, ALFREDO F. Sketch-based retrieval of complex drawings using hierarchical topology and geometry[J]. *Computer-Aided Design*, 2009, 41(12): 1067-1081.
- [2] PEDRO S, MANUEL F. Sketch-based retrieval of drawing using spatial proximity[J]. *Journal of Visual Languages and Computing*, 2010, 21(2): 69-80.
- [3] 余博, 郭雷. Freeman 链码描述的曲线匹配方法[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(4): 5-8.
- [4] 曾接贤, 任璐. 基于聚合边缘方向直方图的图像检索算法[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(11): 205-209.
- [5] DINESH KUMAR V P. Performance study of an improved Legendre

moment descriptor as region-based shape descriptor[J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2008, 18(1): 23-29.

- [6] MARENCO E, COCCHI M, DEMARTINI M, *et al.* Investigation of the applicability of Zernike moments to the classification of SDS 2D-PAGE maps[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, 400(5): 1419-1431.
- [7] CAO W, ZHAO J, MENG W, *et al.* Map matching algorithm according to pseudo-Zernike moments[C]// *Proceedings of Second World Congress on Software Engineering*. Piscataway: IEEE, 2010: 21-24.
- [8] 陈平, 李全, 任越美. 基于区域伪 Zernike 矩的商标图像检索[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(8): 270-273.
- [9] 邓诚强, 冯刚. 基于内容的多特征综合图像检索[J]. *计算机应用*, 2003, 23(7): 100-102.
- [10] 周明全, 耿国华, 韦娜. 基于内容图像检索技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 165-166.
- [11] 张雯雯, 王斌, 舒华忠. 基于粒子群优化的多特征融合的商标图像检索[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(21): 186-190.
- [12] 樊凌. 基于 MPEG-7 多特征融合的图像检索技术[J]. *电脑与信息技术*, 2012, 19(6): 12-15.
- [13] 张国宏, 蔡念, 楼朋旭, 等. 一种多特征融合的外观设计专利图像检索方法[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(14): 166-169.
- [14] 罗军, 祝秀. 基于内容的多特征融合图像检索[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(1): 153-155.
- [15] 鲁珂, 赵继东, 丁正明, 等. 一种基于近邻保留的相关反馈图像检索算法[J]. *计算机科学*, 2012, 39(1): 281-284.
- [16] 匡逊君, 赵文倩, 李明富. 基于图像不变矩和 SVM 的机械零件分类识别[J]. *制造业自动化*, 2012, 34(15): 65-68.

(上接第 1405 页)

表 1 三种算法的处理时间度分析

算法	处理帧数	耗时/s	平均每帧耗时/s
高斯混合算法	60	225.18	3.75
码本算法	60	303.96	5.07
本文算法	60	69.58	11.59

6 结语

针对背景发生光照变化时,现有基于单像素的背景建模方法不能有效检测出运动目标的问题,本文设计并实现了一种基于背景图像集合与图块稀疏分析的运动目标检测方法。该方法利用 RPCA 构建背景图像集合,通过基于稀疏表示的图块分析方法实现背景图块与前景图块的分离,最终实现运动目标的提取。仿真结果表明,本文的方法能较好地处理背景环境光照的突变,有效地消除环境噪声对目标检测的影响。但是,算法中涉及到了大矩阵的运算,耗时较长,如何在保证高精度的同时具有较好的实时性将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] STAUFFER C, GRIMSON W E L. Learning patterns of activity using real-time tracking[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(8): 747-757.
- [2] KIM K, CHALIDABHONGSE T H, HARWOOD D, *et al.* Background modeling and subtraction by codebook construction[C]// *2004 International Conference on Image Processing*. Piscataway:

IEEE, 2004: 3061-3064.

- [3] CANDÉS E, LI X D, MA Y, *et al.* Robust principal component analysis: Recovering low-rank matrices from sparse errors[C]// *Proceedings of 2010 IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*. Piscataway: IEEE, 2010: 201-204.
- [4] LIN Z C, CHEN M, MA Y. The augmented Lagrange multiplier method for exact recovery of corrupted low-rank matrices[J]. *Mathematical Programming*, 2009, 22(15): 55-78.
- [5] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. *SIAM Journal Scientific Computing*, 1999, 20(1): 33-61.
- [6] CANDÉS E J, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [7] MALLAT S, ZHANG Z F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [8] 赵佳佳, 唐峥远, 杨杰, 等. 基于图像稀疏表示的红外小目标检测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(2): 156-161.
- [9] GAO C Q, ZHANG T Q, LI Q. Small infrared target detection using sparse ring representation[J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2012, 27(3): 21-30.
- [10] 许雪梅, 墨芹, 倪兰. 基于局部更新的分层码本目标检测算法[J]. *计算机应用*, 2011, 31(12): 3399-3402.