傅里叶变换耦合曲率尺度空间的图形检索算法

吴庆涛[1]，曹再辉[1]，施进发[2]
（1.郑州航空工业管理学院，郑州 450000；2.华北水利水电大学，郑州 450045）

摘要：目的 解决当前基于曲率尺度空间 CSS 的图形检索算法仅仅使用了曲率空间图的峰值，且该峰值数量是根据图像形状不断变化的，加上其忽略了图形的重要特征，导致较低的检索精度与效率的不足。**方法** 提出了 2D 傅里叶变换耦合改进的曲率尺度空间的图形检索算法。首先，考虑零交叉点过程中的曲率动态变化，并定义峰值阈值控制准则，联合抛物线拟合技术，改进了 CSS 机制，去除伪峰值点，且能兼顾图像形状上的非峰值点信息，获取 CSS 抛物线拟合图；引入 2D 傅里叶变换，用 CSS 抛物线拟合图代替图像形状，获取曲率尺度图的 2D 傅里叶变换；最后，对其进行归一化，建立曲率-傅里叶描述符，构建查询图形与图形库的欧式距离，完成图形检索。**结果** MPEG 数据库测试结果显示：与当前利用曲率尺度空间、1D 傅里叶描述符的图形检索技术相比，本算法拥有更高的检索精度与效率，呈现出较好的 PR 曲线。**结论** 所提算法能够进一步提高图形检索精度与效率，在包装商标检索等领域具有较好的应用价值。

关键词： 图形检索；曲率尺度空间；2D 傅里叶变换；峰值阈值控制；抛物线拟合图；欧式距离
中图分类号： TP391 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2016)13-0157-08

A Graphical Shape Retrieval Algorithm Based on 2D Fourier Transform Coupled with Curvature Scale Space

WU Qing-tao[1], *CAO Zai-hui*[1], *SHI Jin-fa*[2]
(1.Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450000, China;
2.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

ABSTRACT: The current graphic retrieval algorithm based on CSS (Curvature-Scale-Space) only used the peak value of curvature space image which varied according to the image shape and neglected the important features of graph, which caused lower retrieval accuracy and efficiency. In order to solve the problems, the image retrieval algorithm was put forward based on 2D Fourier transform coupled with improved curvature scale space (CSS). Firstly, it considered the dynamic change in curvature zero crossing point's process, defined the peak threshold control criterion, and improved the CSS mechanism by combining parabola fitting technology to remove the pseudo-peak point, and take into account the non peak point information of image shape and get CSS parabola fitting image. Introducing the 2D Fourier transform, it substituted image shape with CSS parabola fitting image and achieved 2D Fourier transform of curvature scale image. Finally, it conducted normalization, built the curvature-Fourier descriptor, and constructed the Euclidean distance between the query image and the image database, and finished graphic retrieval. Database test results showed: compared with the

收稿日期： 2015-12-03
基金项目： 国家自然科学基金(71371172)；航空科学基金(2012ZG55023)；河南省高等学校重点科研项目计划(15A520105)；郑州航院青年基金（29010014）
作者简介： 吴庆涛（1981—），男，河南信阳人，硕士，郑州航空工业管理学院讲师，主要研究方向为图像处理、数据挖掘与云计算。

current technology based on curvature scale space and 1D Fourier descriptors, the new algorithm had higher retrieval precision and efficiency as well as better PR curve. It can further improve the precision and efficiency of graphic retrieval and have good application value in trademark retrieval, etc.

KEY WORDS: graphic retrieval; curvature scale space; 2D Fourier transform; peak threshold control; parabola fitting map; Euclidean distance

随着图像在商业、科研以及国防等方面被广泛应用，大型图像数据库也日益增加，在这些数据库中存储了各种不同类型的图像，覆盖了信息系统、数字图书馆等[1]。为了充分利用图像库或图形库中的资源，需要设计面向大型数据库的存储与检索技术。当前图像检索算法在大型图像库中搜索目标，主要是依赖图像纹理信息或内容信息[2]。如毋小省[3]等人设计的区域纹理谱描述符的增强算法，以及Wang[4]等人设计的基于颜色与纹理信息相融合的彩图检索技术。基于纹理信息的检索技术严重依赖人工注释，而人工注释过程是一个冗余、极其容易出错的过程，易导致较高误检率。

对此，研究人员又开发了基于内容的图像检索算法，该算法是依赖图像视觉内容来完成搜索，诸如颜色、形状以及纹理细节等低位特征[5]。如 Zhu 等人[6]提出了直推式模型耦合图像内容的检索算法，杨舒等人[7]提出了基于 Contourlet 变换和 Hu 不变矩的图像检索算法。虽然基于内容的检索技术避免了人工注释，但其难以构建底层特征与高层信息间的联系，使其检索效率不高[8]。

然而，在建筑、包装商标以及医疗等诸多领域，涉及的对象是图形，若利用这些图像检索算法，虽然可以将图像转换为图形，但是不同的形状获取方式不同，导致其图形匹配精度不高，使得最终的检索精度较低，对此，已有学者提出了直接面向图形领域的图形检索算法，如 M. Fatih Demirci 等人[9]为了精确地从图形库中检索出目标，提出了基于履带分解的图形检索算法，仿真结果表明其具有良好的检索精度，但是使用了复杂树结构，使其搜索效率较低。如吴凡[10]等人为了克服传统的曲率尺度空间 CSS 检索技术忽略了拱形线条上的其他特征值点，从而无法全面地反映图形的特征的难题，提出了一种新的基于 CSS 图形检索技术，实验结果显示其算法具有良好的检索精度，但是其改进的 CSS 技术无法实现旋转不变。

对此，文中利用文献[10]思想，设计曲率-傅里叶描述子，来完成图形检索。通过改进 CSS 机制，去除伪峰值点，兼顾图像形状上的非峰值点信息；引入 2D 傅里叶变换，联合改进的 CSS 技术，将图形轮廓的 CSS 抛物线拟合图映射到 2D 傅里叶域中，获取曲率尺度图的 2D 傅里叶变换；最后，设计曲率-傅里叶描述子，构造查询图形与图形库的欧式距离，完成图形检索。最后，通过仿真验证了所提检索技术的精度与效率。

1 曲率尺度空间技术

曲率尺度空间 CSS 技术主要通过基于轮廓拐点的多尺度曲率信息来描述图像形状[11]。为了生成 CSS 图，首先需要使用弧长来对图形轮廓实施参数化，并在轮廓上以相等间隔完成采样，并记录每个采样点 $\left(x(s),y(s)\right)$ 的 2D 坐标（$s=0,1,\cdots,L$）[12]；并通过卷积理论，获取形状轮廓的曲率尺度空间映射，从而计算其峰值，通过峰值匹配来完成形状检索。对于任意形状轮廓，根据其弧长完成参数化：

$$T(i)=\left(x(i),y(i)\right) \tag{1}$$

式中：i 代表弧长参数。依据模型（1），可得到 i 处的曲率：

$$T(i)=\frac{\dot{x}(i)\dot{y}(i)-\ddot{x}(i)\dot{y}(i)}{\left(\dot{x}(i)^2+\dot{y}(i)^2\right)^{3/2}} \tag{2}$$

式中：$\dot{x}(i),\ddot{x}(i)$ 分别为 i 处的一阶、二阶导数；$\dot{y}(i)$ 为 i 处的一阶导数。

再引入高斯函数 $G(i,\sigma)$，完成对图像形状的演变：

$$G(i,\sigma)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3}$$

$$\begin{cases}X(i,\sigma)=x(i)\otimes G(i,\sigma)\\Y(i,\sigma)=y(i)\otimes G(i,\sigma)\end{cases} \tag{4}$$

式中：$\otimes$ 为卷积；σ 代表高斯卷积核。

联合模型（1）与（4）可知，演变后的曲线为：

$$T_\sigma(i)=\left(X(i,\sigma),Y(i,\sigma)\right) \tag{5}$$

再对模型（4）进行偏导，得到：

$$\begin{cases}\dot{X}(i,\sigma)=x(i)\otimes\ddot{G}(i,\sigma)\\ \ddot{X}(i,\sigma)=x(i)\otimes\ddot{G}(i,\sigma)\end{cases}\tag{6}$$

$$\begin{cases}\dot{Y}(i,\sigma)=y(i)\otimes\ddot{G}(i,\sigma)\\ \ddot{Y}(i,\sigma)=y(i)\otimes\ddot{G}(i,\sigma)\end{cases}\tag{7}$$

联合模型（2），最终得到了曲率模型：

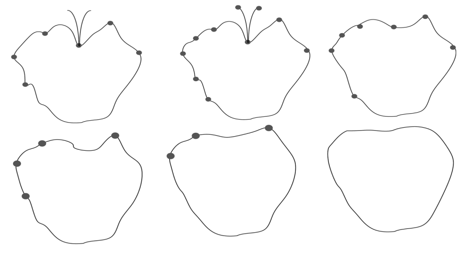
$$K(i)=\frac{\dot{X}(i,\sigma)\ddot{Y}(i,\sigma)-\ddot{X}(i,\sigma)\dot{Y}(i,\sigma)}{\left(\dot{X}(i,\sigma)^2+\dot{Y}(i,\sigma)^2\right)^{3/2}}\tag{8}$$

再完成每轮卷积后，获取其曲率 $K(i)$ 过零点，并将其映射到曲率尺度空间，通过不断反复执行卷积过程，直到非曲率过零点出现，输出曲率尺度空间图，其主要由诸多拐点构成[12]。这种 CSS 技术主要是利用了曲率 $K(i)$ 峰值，通过将峰值视为描述符来完成形状检索。以图 1a 为例，完成卷积后，其曲率尺度空间图及其峰值分别见图 1b 和 c。从图 1a 可知，经过反复卷积，形状的特征点逐步减少，直到形状演变为全凸。可见，曲率尺度空间技术仅仅是依靠提取图像的曲率峰值，将其作为描述符完成形状检索。同样地，曲率尺度空间技术是一种平移不变技术，也可通过归一化所有图形形状到一定数量的边界点上，来实现尺度不变。然而，该技术无法应对旋转不变，易引起圆周移位，见图 2(实线为旋转前，虚线为旋转后)。

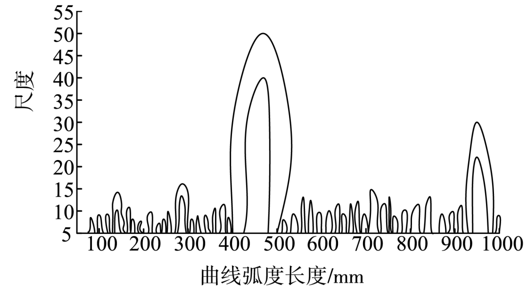
尽管 CSS 技术能够捕获局部形状特征，且对噪声有较好的鲁棒性，但是仅仅利用了曲率尺度空间图的峰值特性，忽略了图形形状的其他重要信息，如提取零交叉点过程中的曲率动态变化，而这种特性有助于算法区分不同图形形状。更重要的是，曲率尺度空间技术无法实现旋转不变，除非在形状匹配阶段时使用圆周移位机制[10]。另外，曲率尺度空间图的峰值数量是根据图像形状不断变化的，而这些峰值经常出现误配，使其检索精度不佳。

2　图形检索算法设计

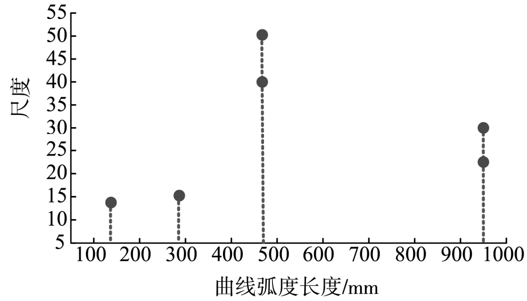
针对 CSS 技术存在的不足，通过考虑零交叉点过程中的曲率动态变化，改进了 CSS 技术，并引入 2D 傅里叶变换，提出了新的图形检索算法。该算法流程见图 3，包含两步：改进曲率尺度空间 CSS 技术，输出 CSS 抛物线拟合图；设计曲率-傅里叶描述子，完成图形检索。



a 形状及其卷积中的过零点轮廓样本
（上：形状，下：过零点轮廓）



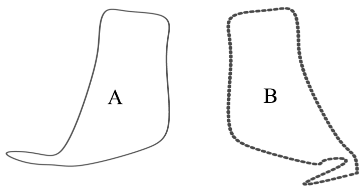
b 曲率尺度空间图



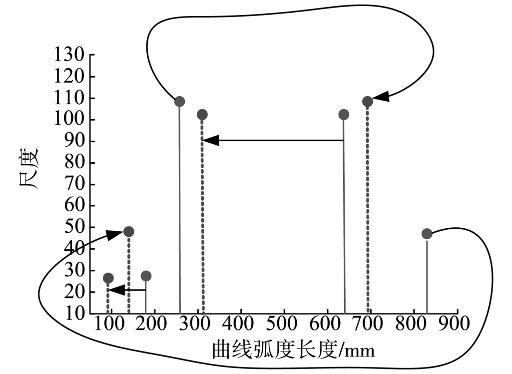
c 曲率尺度空间的极值

图 1　零交叉点卷积过程中图形轮廓的形状与样本

Fig.1 Shape and sample of the shape of the graph in the zero crossing point convolution



a 旋转前后的形状



b 旋转前后形状的曲率尺度空间图

图 2　曲率尺度空间技术的旋转操作

Fig.2 The rotation operation of the curvature scale space technology

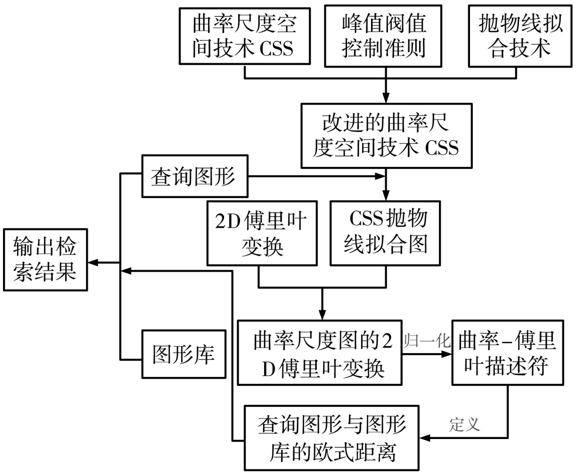


图 3　所提出的图形检索算法流程

Fig.3 The graph of this retrieval algorithm

2.1　改进曲率尺度空间 CSS 技术。

首先，引入权重因子，考虑零交叉点过程中的曲率动态变化，将模型（8）演变为：

$$K^{'}(i)=\frac{\lambda_1\dot{X}(i,\sigma)\eta_1\ddot{Y}(i,\sigma)-\lambda_2\ddot{X}(i,\sigma)\eta_1\dot{Y}(i,\sigma)}{\left(\lambda_1\dot{X}(i,\sigma)^2+\eta_1\dot{Y}(i,\sigma)^2\right)^{3/2}} \tag{9}$$

式中：λ_1,η_1 分别代表形状曲线轮廓上点 $x(i)$ 的权重取向因子。

再用模型(9)计算形状的曲率，记录其峰值，同时，为了去除伪极值，定义峰值阀值控制准则：

$$T(u)=2\times\frac{1}{d_1+d_2+1}\sum_{i=u-d_2}^{u+d_1}K'(i) \tag{10}$$

式中：d_1,d_2 分别为峰值点与其 2 个相邻最小值的距离；u 为曲率峰值点在轮廓上的位置。

当形状轮廓曲率值低于 $T(u)$ 时，将此类伪峰值点删除。同时，为了兼顾形状轮廓曲线上的非峰值点，利用抛物线拟合技术对其完成优化。首先，依据模型（9），形成曲率尺度空间 CSS 图，对于 CSS 图上的每个拱弧，根据抛物线理论[11]，取其顶点以及底部 2 个特征点，则形状的 CSS 抛物线拟合图可表示为：

$$\mathrm{CSSP}=\{P_1,P_2,\cdots,P_m\} \tag{11}$$

$$P_i=\{x_{i,1},x_{i,2},x_{i,3}\}(i=1,2\cdots,m) \tag{12}$$

$$\begin{cases}x_{i,1}=\left(b_{i,1}^{s},b_{i,1}^{\sigma}\right)\\ x_{i,2}=\left(b_{i,k},b_{i,k}\right)\\ x_{i,3}=\left(s_{i,m},\sigma_{i,m}\right)\end{cases} \tag{13}$$

式中：m 代表 CSS 图中上拱数量；$x_{i,1},x_{i,2},x_{i,3}$ 分别代表CSS图中第 i 个上拱的左右底部点与峰值点位置；$b_{i,k},b_{i,k}$ 代表上拱形状中峰值点；$\left(b_{i,1}^{s},b_{i,1}^{\sigma}\right)$，$\left(s_{i,m},\sigma_{i,m}\right)$ 分别是 CSS 图中第 i 个上拱形状中的起始最低点与末尾最低点。

根据 $x_{i,1},x_{i,2},x_{i,3}$，描绘出其相应的 CSS 曲线拟合图[12]。

以图 4a 为目标，利用 CSS 技术与改进的 CSS 机制对其完成表示，分别获取其 CSS 图与 CSSP 图，见图 4b 与 c。依图 4 可知，利用 CSSP 图不但保留了每个拱中的峰值点，而且兼顾了全局轮廓特性。

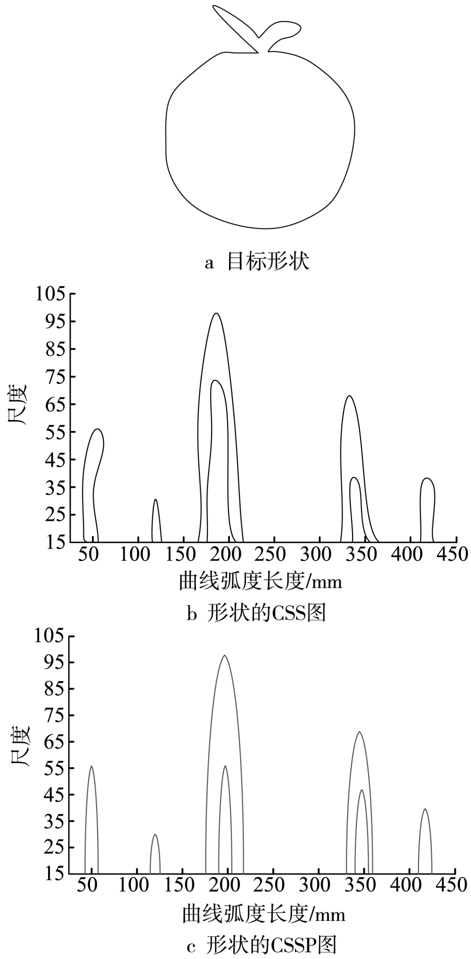


图 4　改进的曲率尺度空间

Fig.4 Improved curvature scale space

2.2　曲率–傅里叶描述子的设计

首先，引入 2D 傅里叶变换，以处理二位图像，从而提取傅里叶描述符[13]，其模型为：

$$F(u,v)=\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\cdot$$

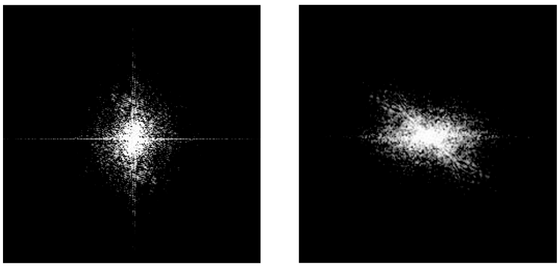
$$\exp\left[-\mathrm{j}2\pi\left(ux/m+vy/N\right)\right] \tag{14}$$

尽管傅里叶描述符忽略了傅里叶变换相，拥有较好的检索精度，但是，其与 CSS 技术一样，无法实现旋转不变。也就是，若 2D 形状 $f(x,y)$ 在卡迪尔空间内被旋转了 θ 角度，则其会形成不同的描述符：

$$f\left(x\cos\theta+y\sin\theta,-x\sin\theta+y\cos\theta\right)\leftrightarrow$$
$$F\left(u\cos\theta+v\sin\theta,-u\sin\theta+v\cos\theta\right) \tag{15}$$

对图 5a 进行旋转操作，见图 5b，再利用模型（15）对其处理，二者产生的变换幅度谱是截然不同的，见图 5c 和 d。

a 初始图像　　　　　　b 旋转图像



c 初始图像的幅度谱　　　　　　d 旋转图像的幅度谱

图 5　形状的傅里叶变换幅度谱

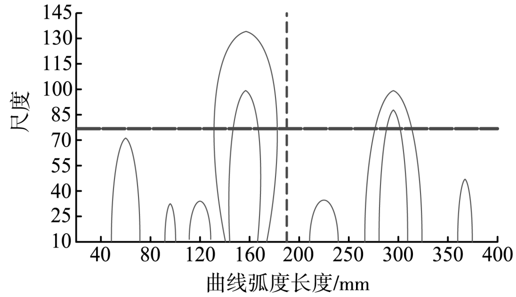
Fig.5 Fourier transform amplitude spectrum

为了充分利用 2D 傅里叶变换的特性，基于改进的曲率尺度空间技术，形成曲率尺度图像，将其视为卡迪尔空间内的二值图像：

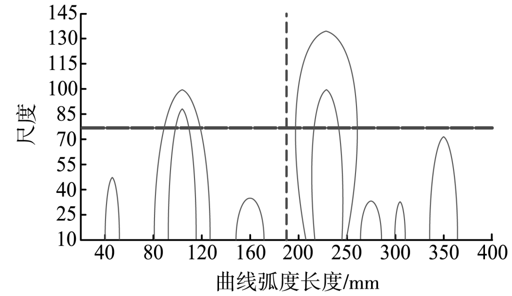
$$\mathrm{CSI}=\begin{cases}0 & \text{if} \quad K'(s,\sigma)<0\\ 1 & \text{if} \quad K'(s,\sigma)\ge 0\end{cases} \tag{16}$$

式中：CSI 为曲率尺度图像；$K'(s,\sigma)$ 代表改进的曲率尺度空间模型所计算的曲率。

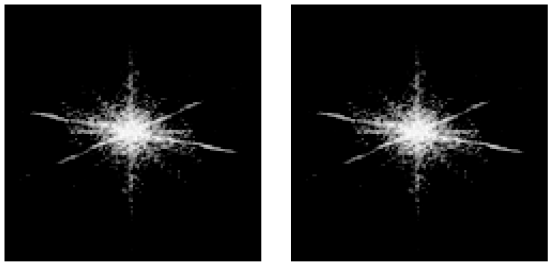
依据模型（16）可知，将 2D 傅里叶变换应用于 *CSI* 上，则可以通过忽略 *CSI* 的傅里叶变换相与仅考虑其变换幅度来有效消除变换相对描述符的影响，使其具有旋转不变性，见图 6。依图 6 可知，以图 5a 为对象，获取 CSI，见图 6a，当 CSI 发生旋转时，其傅里叶变换幅度谱是一致的，见图 6b 和 c。



a 图5a的曲率尺度图CSI



b 图5b的曲率尺度图CSI



c 旋转前CSI图的变换幅度　　　　d 旋转后CSI图的变换幅度

图 6　图像旋转前后的 CSI 图及旋转不变性测试

Fig.6 CSI graph and rotation invariance test before and after image rotation

再联合模型（14）与模型（16），利用 CSI 代替 2D 形状，得到 CSI 图的 2D 傅里叶变换：

$$FCSI(u,v)=\sum_{t=0}^{m-1}\sum_{\sigma=0}^{n-1}\mathrm{CSI}(s,\sigma)\cdot$$
$$\exp\left[-\mathrm{j}2\pi\left(us/m+v\sigma/n\right)\right] \tag{17}$$

式中：m 为轮廓点的最大数量；n 为在不同的标准偏差 σ 下构建 CSI 图所需的最大迭代数量。

随后，基于模型（18）与归一化处理，得到曲率-傅里叶描述符：

$$FD=\frac{|FSCI(0,1)|}{|FSCI(0,0)|},\frac{|FSCI(0,2)|}{|FSCI(0,0)|},\cdots,$$
$$\frac{|FSCI(0,n)|}{|FSCI(0,0)|},\cdots,\frac{|FSCI(m,0)|}{|FSCI(0,0)|},\cdots,\frac{|FSCI(m,n)|}{|FSCI(0,0)|} \tag{18}$$

基于模型（18），构建查询图形与图形库的欧式距离，完成目标形状检索：

$$D_{\mathrm{FCSI}}\left(F^q,F^d\right)=\sqrt{\sum_{i=1}^{M}\left(f_i^q-f_i^d\right)^2} \tag{19}$$

式中：D_{FCSI} 代表欧式距离；F^q, F^d 分别为查询图形、数据库中图形的曲率-傅里叶描述符。

依据算法可知，曲率-傅里叶描述符兼顾了曲率图形的所有信息，对于不同的形状，其特征数量是相等的，降低了误配率，且其具有旋转不变性，故其在匹配阶段，不需要使用圆周移位机制，提高了检索效率。

3　实验结果与分析

利用 Matlab 工具，在 MPEG-7 CE-shape-1Part B[14]数据库中测试所提检索算法的检索精度与效率。从 MPEG 库中随机择取部分样例，见图 7。为了反映检索技术的优异性，将当前检索精度性能较好的检索算法视为对照组：基于曲率尺度空间技术的检索算法-文献[15]、基于 1D 傅里叶描述符的检索算法-文献[16]。并利用查全率-查准率（Recall-Precise）[17]衡量这些技术的精度。

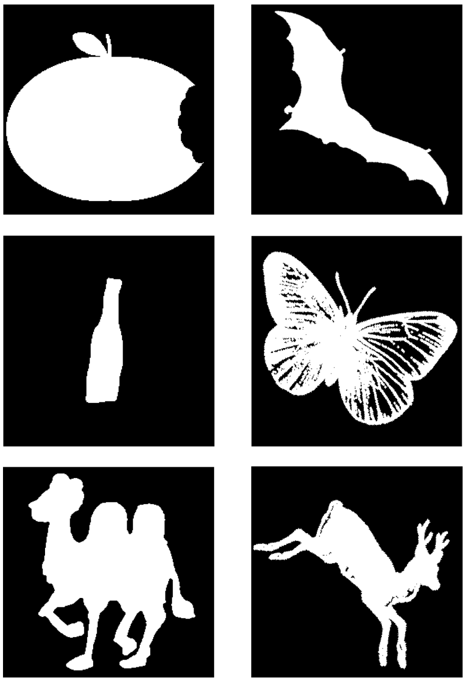
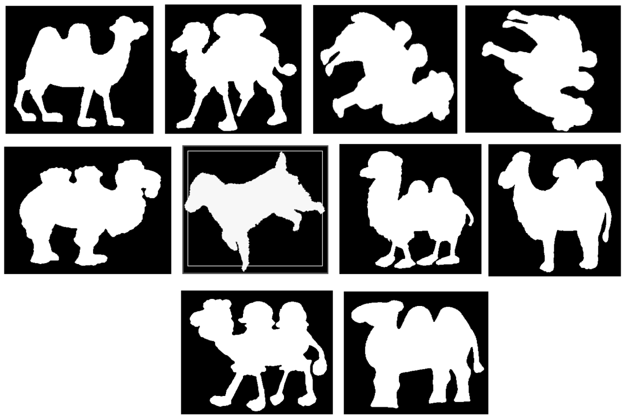


图 7　MPEG 数据库中的部分样例
Fig.7 Partial sample of MPEG database

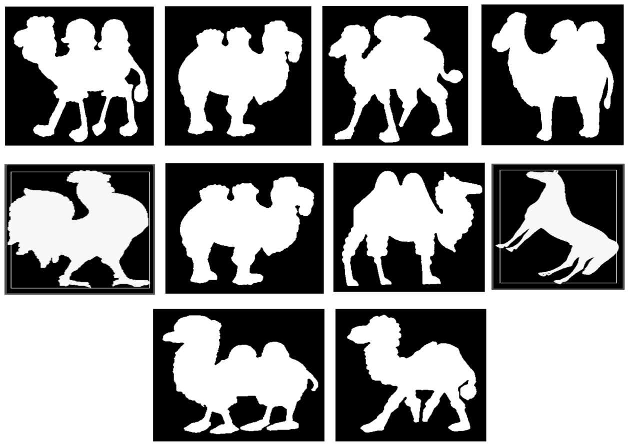
3.1　图像检索效果

以图 8a 为检索目标，利用本算法与文献[15]、文献[16]等 3 种技术在 MPEG-Part B 数据库中完成检索，结果见图 8b-d。依图 8 可知，本检索算法的准确度最高，具有较强的旋转不变性，误检率最低，其误检图像只有一个，见图 8b；而文献[15]和[16]两种技术的检索精度不理想，误检率较高。原因是本算法考虑零交叉点过程中的曲率动态变化，并定义了峰值阀值控制准则，联合抛物线拟合技术，改进了 CSS 机制，去除伪峰值点，且能兼顾图像形

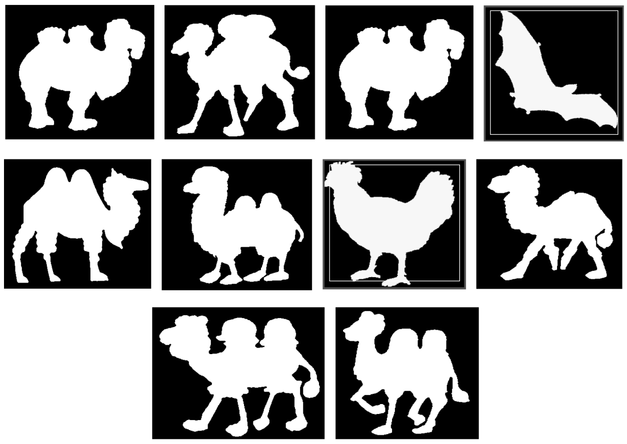
a 检索目标



b 文中算法的检索结果



c 文献[15]技术的检索结果



d 文献[16]技术的检索结果

图 8　3 种不同算法的目标检索结果
Fig.8 Target retrieval results of three different algorithms

状上的非峰值点信息，并联合傅里叶变换，形成新的描述符，对于 MEG 数据库中不同的形状，其特征数量是相等的，降低了误配率，且其具有旋转不变性，提高了算法的鲁棒性。而文献[15]技术利用 CSS 技术，只考虑了轮廓曲线上的峰值点，无法兼顾其他点的信息，且对于 MPEG 数据库中不同的形状，其特征数量是动态变化的，难以检索其中的旋转变换目标，造成其精度较低；而文献[16]是借助傅里叶描述符来检索，不具备旋转不变性，易出现误检。

3.2 PR 曲线分析

在 MPEG-Part B 数据库中测试这些检索算法的 Recall-Precise 曲线[13]，见图 9。依图 9 可知，当 Recall 值逐步增加时，3 种技术的精度都下降，所提检索算法的准确率始终最高。当 Recall 在 0.2 左右时，这些检索技术的准确度较高，都在 90%以上；但是，当 Recall 值继续增加时，所提算法的优势比较明显，当 Recall 高达 0.5 时，本设计的曲率-傅里叶描述符的准确率仍保持在 70%。原因是算法改进了 CSS 机制，能够去除伪峰值点，且兼顾曲率尺度图像上的非峰值点信息，并联合傅里叶变换的优势，形成新的描述符，对于 MPEG 数据库中不同的形状，其特征数量是相等的，降低了误配率，且其具有旋转不变性，提高了算法的精索精度。

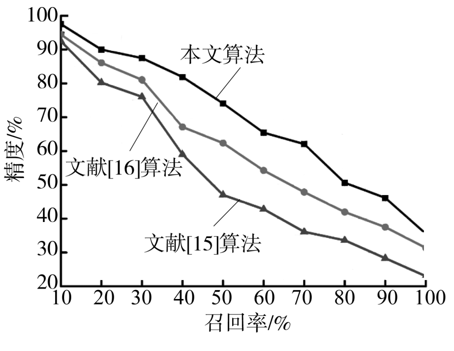


图 9　3 种算法的平均检索精度测试

Fig.9 Average retrieval accuracy test of three different algorithms

为了体现 3 种算法的旋转不变性，在 MPEG 数据库中子集 A_2 上测试了其检索结果，见图 10。依图 10 可知，在子集 A_2 中，文中算法具有较强的鲁棒性，受旋转操作的影响较小，其精度处于较为稳定值。而另 2 种技术的旋转不变性较差，其精度随着 Recall 值的增加而呈现下降趋势。原因是本检索算法将 2D 傅里叶变换应用于 CSI 上，通过忽略 CSI 的傅里叶变换相与仅考虑其变换幅度来有效消除变换相对描述符的影响，使其具有旋转不变性，而其他 2 种算法都缺乏旋转不变性。

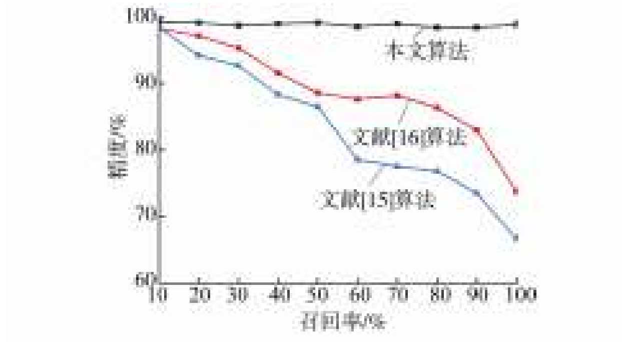


图 10　3 种算法的旋转不变性测试

Fig.10 Rotation invariance test of three different algorithms

3.3 算法检索效率测试分析

优异的图像检索算法还应拥有较高的检索效率，降低搜索成本[17]。在 MPEG-7 CE-shape-1 Part B 图形库中测试了 3 种算法的检索效率，结果 3 中算法的耗时分别为 1.82, 1.73, 2.16 s,可知文中算法与文献[16]技术具有接近的检索效率，而文献[15]的时耗最高，约为 2.23 s。原因是文中算法与文献[16]技术在面对相同数量图形特征时，使用了相同的匹配过程；而文献[15]在对其 CSS 图的峰值点时，需要考虑非常多的因素。

4 结语

为了提高目标在大型数据库中的检索效率与精度，提出了 2D 傅里叶变换耦合改进的曲率尺度空间的图像检索算法。引入权重因子，定义峰值阀值控制准则，联合抛物线拟合技术，改进了 CSS 机制，有效去除伪峰值点，并兼顾图像形状上的非峰值点信息，获取 *CSS* 抛物线拟合图；引入 2D 傅里叶变换，用 CSS 抛物线拟合图代替图形形状，获取曲率尺度图的 2D 傅里叶变换；最后，对曲率-傅里叶描述符进行归一化，构建检索欧式距离，完成形状检索。测试数据显示，算法具有良好的旋转不变性，其检索精度与效率更高。

参考文献：

[1] GUO Ke-hua, DUAN Gui-hua. 3D Image Retrieval Based on Differential Geometry and Co-occurrence Matrix[J]. Neural Computing and Applications, 2014,

24(3-4):715—721.

[2] HERNÁNDEZ-GRACIDAS C A. Improving Image Retrieval by Using Spatial Relations[J]. Multimedia Tools and Applications, 2013, 62(2):479—505.

[3] 毋小省, 孙君顶. 基于改进的区域纹理谱描述符的图像检索[J]. 激光与红外, 2012, 42(12):1329—1332.
WU Xiao-xing, SUN Jun-xiang. Image Retrieval Based on Improved Region Texture Spectrum Descriptor[J]. Laser and Infrared, 2012, 42(12):1329—1332.

[4] WANG Xiang-yang, YANG Hong-ying, LI Dong-ming. A New Content-based Image Retrieval Technique Using Color and Texture Information[J]. Computers and Electrical Engineering, 16(8):2210—2217.

[5] KHAN Y D, AHMAD F, KHAN S A. Content-based Image Retrieval Using Extroverted Semantics: a Probabilistic Approach[J]. Neural Computing and Applications, 2014, 24(7-8):1735—1748.

[6] ZHU Song-hao, ZOU Li-ming, FANG Bao-jie. Content Based Image Retrieval Via a Transductive Model[J]. Journal of Intelligent Information Systems, 2014, 42(1): 95—109.

[7] 杨舒, 王玉德. 基于 Contourlet 变换和 Hu 不变矩的图像检索算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1):306—310.
YANG Shu, WANG Yu-de. Image Retrieval Algorithm Based on Contourlet Transform and Hu Invariant Moments[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 306—310.

[8] 伟光, 解成俊. 基于文本的图像检索与基于内容的图像检索技术的对比研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2013, 32(4):7—10.
WEI Guang, XIE Cheng-jun. A Comparative Study of Text Based Image Retrieval and Content-based Image Retrieval Techniques[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2013, 32(4):7—10.

[9] DEMIRCI M F. Retrieving 2D Shapes Using Caterpillar Decomposition[J]. Machine Vision and Applications, 2013, 24(2):435—445.

[10] 吴凡, 钟宝江. 基于 CSS 图拱拟合描述算法的形状检索技术[C]. 全国图象图形学学术会议, 2010.
WU Fan, ZHONG Bao-jiang. Shape Retrieval Technology Based on the CSS Graph Fitting Description Algorithm[C]. National Conference on Image and Graphics, 2010.

[11] KUMAR M, SHARMA R K, JINDAL M K. Efficient Feature Extraction Techniques for Offline Handwritten Gurmukhi Character Recognition[J]. National Academy Science Letters, 2014, 37(4):381—391.

[12] 吴凡. 基于曲率尺度空间图抛物线拟合的形状匹配技术[D]. 江苏：南京航空航天大学, 2011:22—38.
WU Fan. Shape Matching Technique Based on the Curvature Scale Space Graph Parabola Fitting[D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011:22—38.

[13] ZHANG Gang, MA Zong-min, NIU Lian-qiang. Modified Fourier Descriptor for Shape Feature Extraction[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(2):488—495.

[14] XU Guo-qing, MU Zhi-chun, XU Ye. Shape Retrieval Using Multi-level Included Angle Functions-based Fourier Descriptor[J]. Journal of Southeast University, 2014, 30(1):22—26.

[15] 李昌众. 放射不变的 CSS 形状检索[D]. 江苏:苏州大学, 2013:20—36.
LI Chang-zhong. The Shape Retrieval of the Invariant CSS[D]. Jiangsu: Suzhou University, 2013: 20-36.

[16] HU Yong, LI Zuo-yong. An Improved Shape Signature for Shape Representation and Retrieval[J]. Journal of Software, 2013, 8(11):2925—2929

[17] 田喆嘉. 形谱产品器形的计算机图形检索和拟合研究[D]. 河北:燕山大学, 2013:18—52.
TIAN Ji-jia. Research on Computer Graphics Retrieval and Fitting of Shape Spectrum Product[D]. Hehei: Yanshan University, 2013:18—52.