



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
08
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



北魏



隋



初唐

数字文化遗产研究 P968

综述

尺度不变特征变换算子综述

刘立, 詹茵茵, 罗扬, 刘朝晖, 彭复员 885

图像处理和编码

改进的H.264帧间模式选择算法

任克强, 张旭光, 罗会兰 893

均质雾天下摄像机动态标定的车速估计

宋洪军, 陈阳舟, 郜园园 901

基于人脸五官特征的空域差错掩盖算法

张江鑫, 谢晋, 邝万坤 913

采用圆谱-傅里叶矩的图像区域复制粘贴篡改检测

秦娟, 李峰, 向凌云, 殷荻茗 919

图像分析和识别

基于视频感知哈希的视频篡改检测与多粒度定位

朱映映, 文振焜, 杜以华, 邓良太 924

视觉注意模型的道路监控视频关键帧提取

刘云鹏, 张三元, 王仁芳, 张引 933

格拉斯曼流形上的半监督判别分析

姜伟, 陆瑶, 杨炳儒 944

精神疲劳实时监测中多面部特征时序分类模型

陈云华, 张灵, 丁伍洋, 严明玉 953

图像分类中的概率乘积核函数

杨赛, 赵春霞 961

轮廓整体结构约束的壁画图像相似性度量

唐大伟, 鲁东明, 杨冰, 许端清 968

应用色彩空间聚类方法实现道路建模

向宸薇, 王拓, 于舰 976

图像理解和计算机视觉

杂乱背景和摄像机移动下的时空兴趣点检测

刘长红, 陈勇, 王明文 982

形状和颜色混合不变量在图像检索中的应用

公明, 曹伟国, 李华 990

计算机图形学

结合统计分类和边缘特征的最优视图提取

潘翔, 陈敖, 章国栋 1004

医学图像处理

局部熵驱动下的脑MR图像分割与偏移场恢复耦合模型

张建伟, 杨红, 陈允杰, 方林, 詹天明 1011

改进的模糊聚类亚实质肺结节3维分割

李翠芳, 聂生东, 王远军, 孙希文, 郑斌 1019

遥感图像处理

高光谱海岸带区域分割的活动轮廓模型

王相海, 金弋博 1031

改进的基于非局部均值的极化SAR相干斑抑制

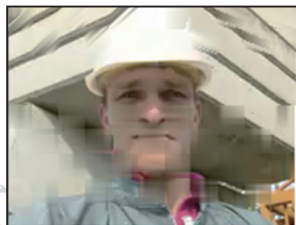
赵忠民, 赵拥军, 牛朝阳 1038

小波变换和稀疏表示相结合的遥感图像融合

刘婷, 程建 1045

《中国图象图形学报》论文摘要写作要求

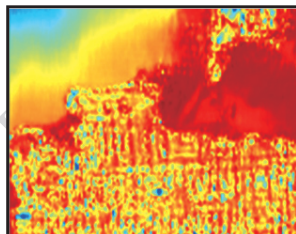
1054



基于人脸五官特征的空域差错掩盖算法 (第913页)



应用色彩空间聚类方法实现道路建模 (第976页)



改进的基于非局部均值的极化SAR相干斑抑制 (第1038页)

CONTENTS

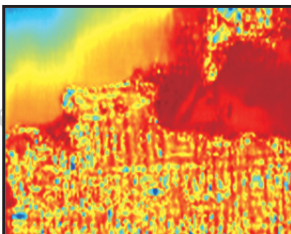
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Spatial error concealment algorithm based on the facial features (P913)



Road modeling using color spatial clustering (P976)



Improved polarimetric SAR speckle filter based on non-local means (P1038)

Review

Summarization of the scale invariant feature transform

Liu Li , Zhan Yinyin, Luo Yang, Liu Chaohui, Peng Fuyuan 885

Image Processing and Coding

Improved inter frame mode selection algorithm for H.264

Ren Keqiang, Zhang Xuguang, Luo Huilan 893

Vehicle velocity estimation based on camera calibration under homogenous fog

Song Hongjun, Chen Yangzhou, Gao Yuanyuan 901

Spatial error concealment algorithm based on the facial features

Zhang Jiangxin, Xie Jin, Kuang Wankun 913

Detection of image region copy-move forgery using radial harmonic Fourier moments

Qin Juan, Li Feng, Xiang Lingyun, Yin Changming 919

Image Analysis and Recognition

Video forgery detection and multi-granularity location based on video perceptual hashing

Zhu Yingying, Wen Zhenkun, Du Yihua, Deng Liangtai 924

Key frame extraction based on the visual attention model for lane surveillance video

Liu Yunpeng, Zhang Sanyuan, Wang Renfang, Zhang Yin 933

Semi-supervised discriminant analysis on Grassmannian manifold

Jiang Wei, Lu Yao, Yang Bingru 944

Time-series classification model based on multiple facial feature for real-time mental fatigue monitoring

Chen Yunhua, Zhang Ling, Ding Wuyang, Yan Mingyu 953

Probability product kernels in image classification

Yang Sai, Zhao Chunxia 961

Similarity metrics between mural images with constraints of the overall structure of contours

Tang Dawei, Lu Dongming, Yang Bing, Xu Duanqing 968

Road modeling using color spatial clustering

Xiang Chenwei, Wang Tuo, Yu Jian 976

Image Understanding and Computer Vision

Spatio-temporal interest point detection in cluttered backgrounds with camera movements

Liu Changhong, Chen Yong, Wang Mingwen 982

Application of combined shape and color invariants to image retrieval

Gong Ming, Cao Weiguo, Li Hua 990

Computer Graphics

Best view selection based on statistical classification and edge features

Pan Xiang, Chen Ao, Zhang Guodong 1004

Medical Image Processing

Brain MR image segmentation and bias correction model based on local entropy

Zhang Jianwei, Yang Hong, Chen Yunjie, Fang Ling, Zhan Tianming 1011

Segmentation of sub-solid pulmonary nodules based on improved fuzzy

C-means clustering

Li Cuifang, Nie Shengdong, Wang Yuanjun, Sun Xiwen, Zheng Bin 1019

Remote Sensing Image Processing

The active contour model for segmentation of coastal hyperspectral remote sensing image

Wang Xianghai, Yin Yibo 1031

Improved polarimetric SAR speckle filter based on non-local means

Zhao Zhongmin, Zhao Yongjun, Niu Chaoyang 1038

Remote sensing image fusion with wavelet transform and sparse representation

Liu Ting, Cheng Jian 1045

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)08-0990-14

论文引用格式: 公明, 曹伟国, 李华. 形状和颜色混合不变量在图像检索中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(8): 990-1003. [DOI: 10.11843/jig.20130814]

形状和颜色混合不变量在图像检索中的应用

公明^{1,2}, 曹伟国², 李华^{1,2}

1. 中国科学院计算技术研究所计算机应用研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 多视觉特征的图像检索是当前基于内容的图像检索领域的重要方向。已有的多特征的检索主要通过线性加权的方法对特征进行组合,但这种组合方式仅实现了代数意义上的合并,未能真正利用和发掘特征间存在的相互关系,并且权重值不容易确定,检索结果易受权重值的影响。针对这一问题,提出一种形状-颜色混合不变特征的构造方法,特征提取的过程包含同时对形状、颜色信息的抽取,直接构造出能够同时对形状仿射变换和颜色对角-偏移变换具有不变性的特征,也称作形状-颜色矩不变量。首先分别在图像的2维几何空间、3维颜色空间定义形状核、颜色核,然后对形状核、颜色核的乘积进行多重积分,最后做规范化,就得到一个不变量。理论上,通过选择不同的形状核、颜色核可以推导出无穷多的不变量。实验结果表明,该方法优于加权组合特征的方法;与加权特征、局部特征相比,形状-颜色矩不变量对于同一物体不同成像条件下的近复制图像、整体属性相似的图像、大体类似的物体图像等表现出较高的检索性能及效率。

关键词: 形状;颜色;混合特征;不变量;图像检索

Application of combined shape and color invariants to image retrieval

Gong Ming^{1,2}, Cao Weiguo², Li Hua^{1,2}

1. Computer Applications Research Center, Institute of Computing Technology Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Image retrieval based on multiple visual features is one of most important direction in the field of content-based image retrieval. Existing retrieval algorithms are based on multiple features mainly combining features through linear weighting. However, this just achieves combinations in the sense of algebra, and the retrieval result is susceptible to the choice of the weights. To solve this problem, including the extraction of shape and color information in the feature extraction procedure, we propose a method to construct combined shape-color features, called shape-color moment invariants, which are invariant to both shape affine transformation and color diagonal-offset transformations. First, we define the shape core and color core in the two-dimensional geometric space and three-dimensional color space respectively. Then multiple integrals to the product of shape core and color core are produced. Finally, we get an invariant feature by normalization. Theoretically, this method can derive an infinite number of invariant features while choosing different shape cores or color cores. The experimental results show that this method is distinctive to existing linear weighting method, and has better performance and efficiency when retrieving near-duplicated images, images with similar property, broadly similar images etc.

Key words: shape; color; combined feature; invariants; image retrieval

收稿日期: 2012-11-12; 修回日期: 2013-01-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2007AA01Z317); 国家自然科学基金项目(60873164)

第一作者简介: 公明(1987—), 女, 中国科学院计算技术研究所计算机应用技术专业博士研究生, 主要研究方向为图像的不变特征分析与应用、计算机图形学、计算机视觉等。E-mail: gongming@ncic.ac.cn

0 引言

近年来,数码相机、数字摄像机、拍照手机等设备的普及以及低价的存储设备和方便的网络接入,使得图像采集、存储和分享变得越来越容易。图像数据库随之迅速膨胀,如 Flickr 网络相册截至 2011 年 8 月已突破了 60 亿张关口,目前仍以每分钟图像上传量 3 500 张的速度增长。图像越来越多的成为承载和传递信息的媒介之一,如何准确、快速地检索到所需要的图像成为亟待解决的问题。

传统基于文本标注的图像检索方法具有的主观性、不精确性等缺点,致使它无法突破海量图像信息梳理的瓶颈,基于视觉特征(如形状^[1]、颜色^[2]等)“以图搜图”的检索方式,即基于内容的图像检索技术(content based image retrieval),成为目前及将来主流的发展趋势。其基本思路是:先通过对图像内容的分析,自动或半自动的从中抽取形状、颜色、纹理等视觉特征,并利用基于这些特征定义的相似性度量函数计算或评价特征之间的相似性,将最相似的一些图像作为检索结果返回给用户^[3]。因此,提取视觉特征来描述图像是实现检索的基础和关键环节。2010 年下半年至今,以 Google、百度、Bing、搜狗等为首的各大互联网公司先后推出“以图搜图”的图像检索功能,而网络图像来源的复杂性更对视觉特征的不变性分析提出了挑战性的问题,适用于复杂变化的不变特征将为高效的图像检索提供有效方法。

目前,对于“如何通过单一的视觉特征进行检索从而得到更好的效果”已开展了大量的研究,其中形状、颜色是最直观、最重要、应用最广泛的视觉特征。但是实验表明,基于多种特征综合的 CBIR 的结果优于基于单一视觉特征 CBIR 的结果^[4]。已有的多视觉特征组合方法主要包含两类^[5]。

第 1 类权重求和意义上的特征组合,需要已知各单一特征在检索中所占的比重,即权重,然后通过单一特征的相似性进行加权求和来获得图像的整体相似性^[6]。应用最广泛的形状和颜色特征为^[7]

$$D = \omega_1 D_1 + \omega_2 D_2 \quad (1)$$

式中, D 表示图像的整体相似性, D_1 、 D_2 分别表示基于形状、颜色特征计算的相似性, ω_1 、 ω_2 分别是两种特征相应的权重。权值不容易确定,往往需要预先设定(如平均权重等)或者由用户设定,而且检索结

果也往往依赖于权重的选择,这样既不能得到较好的结果也加重了用户负担。为解决这一问题,又提出了基于相关反馈技术动态调整多特征权值的检索方法^[8],在一定程度上提高了检索的有效性、方便了用户使用。但在图像获取条件(如拍摄视角、光照条件等)有较大变化时,检索效果仍不尽如人意,其根本原因在于简单的线性加权方法仅实现了代数意义上的合并,未能真正完全地利用和发掘特征间存在的相互关系^[5]。

针对第 1 类特征组合方法存在的问题,目前国内已有若干研究致力于第 2 类深层融合的方法,即特征提取算法本身包含了同时对多类信息的抽取,因此特征向量中容纳了多于一种的底层内容特征^[5],如直接构造形状、颜色混合特征。Hu 矩^[1]是最早利用图像形状和灰度信息(各颜色通道求和,即 $I = R + G + B$, I 表示图像灰度值)的特征,但仅对形状相似变换(平移、旋转、缩放)具有不变性而不具有颜色不变性。王义平等^[9]提出了一种修正的 Hu 矩,除了保持 Hu 矩的几何相似变化不变性外,能够在图像灰度发生线性变化时(即变化后图像灰度值 $I' = aI + o$, I 表示原始图像灰度值, a 、 o 是常数)具有不变性,但当光照条件变化复杂导致图像的各颜色通道变化不均匀时,该方法不再有效。Mindru 等人^[10]提出了一种形状仿射、颜色对角-偏移变化下的不变量(GPSO),理论上对于复杂的形状和颜色变换具有良好的不变性。但该不变量是基于 Lie 群的方法推导出的,偏微分方程求解的复杂性导致该方法不易扩展,推广到高阶不变量更加困难。已给出的一组 GPSO 是由低阶矩构成,区分能力较弱。一些局部特征,如应用最广的 SIFT(scale invariant feature transform)特征^[11],也同时利用了形状和灰度信息,但理论上仅具有几何旋转、灰度线性变换下的不变性,当视角变化较大或者光照变化复杂时鲁棒性明显下降。此外,局部特征往往具有较高维度,图像两两之间进行关键点匹配效率较低,特别对于大规模图像库,必须采用有效的降维或匹配方法^[12]。

本文工作也致力于第 2 类方法的研究,直接构造对复杂的形状、颜色变换有不变性质的特征。一方面,在理论上提出一种基于多重积分^[13]构造形状、颜色混合特征的方法,具有良好的直观性和扩展性;另一方面,基于该方法推导出一组对形状仿射变换、颜色对角-偏移变换具有不变性质的特征。由于

这些特征具有矩的形式,所以也称为形状-颜色矩不变量(SCMI),通过对不同图像数据库的检索实验以及与已有方法的对比,结果证实了SCMI的有效性及适用性。

1 几何变换与颜色变换

1.1 几何变换

当相机从不同视点获得同一目标的图像时,图像之间满足射影变换关系^[14-15],要实现视点不变性即要构造射影变换下的不变特征,这是一个相当有挑战性的问题,目前尚无有效的方法。当相机距离目标很远时,图像间的射影变换可由仿射变换近似表示,即使在近距离情况下拍摄的图像,在一定条件下,图像的局部区域之间的几何关系也可以用仿射变换来近似^[16],因此,采用仿射变换模型近似图像间的射影变换关系。若图像 I 上点 $[x, y]^T$ 与图像 I' 上的点 $[x', y']^T$ 对应,则两点坐标的关系为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \mathbf{t} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{M}$ 是仿射变换矩阵, $\mathbf{t}$ 是平移向量。

1.2 颜色变换

对于图像的光度变换,根据Shafer的反射模型^[17],图像 $\mathbf{f}(x, y) = [R(x, y), G(x, y), B(x, y)]^T$ 上任意像素点 (x, y) 的R、G、B三通道的亮度值可以表示为

$$\mathbf{f}_c(x, y) = \sigma \int_{\omega} e(\lambda) s(x, y, \lambda) c(\lambda) d\lambda + \int_{\omega} \alpha(\lambda) c(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中, $c \in \{R, G, B\}$, σ 是由表面法线与光线方向夹角决定的反射系数, ω 表示可见光谱, λ 是波长, $e(\lambda)$ 是光源的谱能量分布, $s(x, y, \lambda)$ 是表面反射系数, $\alpha(\lambda)$ 为漫反射分量, $c(\lambda)$ 是相机的感光函数。

通过对式(3)增添限制条件,Finlayson等人^[18]得出一个结论:光源 e_1 条件下获得的图像 $\mathbf{f}_o$ 与光源 e_2 条件下获得的图像 $\mathbf{f}_T$ 之间的变换关系可以用对角-偏移模型表示为

$$\mathbf{f}_T = \mathbf{D} \mathbf{f}_o + \mathbf{o} \quad (4)$$

$$SC_{\eta_{pqr}} = \frac{SC_{u_{pqr}}}{(SC_{u_{001}})^r} = \frac{\iint (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q \cdot |(R(x, y) - \bar{R})(G(x, y) - \bar{G})(B(x, y) - \bar{B})|^r dx dy}{\left[\iint |(R(x, y) - \bar{R})(G(x, y) - \bar{G})(B(x, y) - \bar{B})| dx dy \right]^r} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{D}$ 是对角矩阵, $\mathbf{o}$ 包含的3个分量分别是3个通道的偏移量。以RGB空间为例,可以展开为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_T \\ \mathbf{G}_T \\ \mathbf{B}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_o \\ \mathbf{G}_o \\ \mathbf{B}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o_R \\ o_G \\ o_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

称式(5)为DO颜色(变换)模型。已有实验结果表明,与已有的颜色变换模型相比,DO模型在准确性和计算复杂度上能取得联合最优的结果,因此采用DO模型来近似图像颜色的真实变换关系。

2 形状-颜色不变量的构造方法与实例

2.1 定义与性质

2.1.1 形状-颜色矩

彩色图像 $\mathbf{f}(x, y) = [R(x, y), G(x, y), B(x, y)]^T$ 的形状-颜色矩定义为

$$SC_{m_{pqr}} = \iint x^p y^q \cdot |(R(x, y) - \bar{R})(G(x, y) - \bar{G})(B(x, y) - \bar{B})|^r dx dy \quad (6)$$

式中, $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$ 表示各颜色通道的平均强度值。式(6)阶数是 $p+q$,度为 r 。若各颜色通道的强度函数分段连续且在2维欧氏空间中有界,那么各阶矩都存在。显然,当各颜色通道发生偏移变化时,形状-颜色矩保持不变。

图像的质心可以计算为

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{SC_{m_{101}}}{SC_{m_{001}}} \\ \bar{y} &= \frac{SC_{m_{011}}}{SC_{m_{001}}} \end{aligned} \quad (7)$$

那么形状-颜色中心矩在几何平移变换、各颜色通道发生偏移变换时具有不变性,可以定义为

$$SC_{u_{pqr}} = \iint (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q \cdot |(R(x, y) - \bar{R})(G(x, y) - \bar{G})(B(x, y) - \bar{B})|^r dx dy \quad (8)$$

限定 p, q, r 的关系满足 $r = \frac{p+q+2}{2}$,定义规范

化的形状-颜色矩为

当形状发生 λ 的均匀尺度变化、颜色发生 δ 的均匀尺度变化时, 则

$$SC_{\eta'_{pqr}} = \frac{SC_{u'_{pqr}}}{(SC_{u'_{001}})^{\frac{p+q+2}{2}}} = \frac{\lambda^{p+q+2} \delta^{3r} \iint (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q |(\mathbf{R}(x, y) - \bar{\mathbf{R}})(\mathbf{G}(x, y) - \bar{\mathbf{G}})(\mathbf{B}(x, y) - \bar{\mathbf{B}})|^r dx dy}{\left[\lambda^2 \delta^3 \iint |(\mathbf{R}(x, y) - \bar{\mathbf{R}})(\mathbf{G}(x, y) - \bar{\mathbf{G}})(\mathbf{B}(x, y) - \bar{\mathbf{B}})| dx dy \right]^r} = \frac{SC_{u_{pqr}}}{(SC_{u_{001}})^r} = SC_{\eta_{pqr}} \quad (10)$$

所以除了几何平移变换、各颜色通道发生偏移变换之外, $SC_{\eta_{pqr}}$ 在形状、颜色发生均匀尺度变换时也具有不变性。

2.1.2 形状核在仿射变换下的性质

考虑图像的形状, 在 2 维几何空间, 将形状基元定义为任意两个像素点 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 与图像质心 O 构成的平面三角形的面积, 即

$$A(O, i, j) = \frac{1}{2}(x_i y_j - x_j y_i) \quad (11)$$

当形状仿射变换时 (如式 (2)), 容易推导形状基元满足

$$A'(O, i, j) = |\mathbf{M}| A(O, i, j) \quad (12)$$

定义形状核 $S_Core(N, m; d_1, d_2, \dots, d_N)$ 是 2 维几何空间由 N 个点组成的 m 个几何基元的连乘积, 即

$$S_Core(N, m; d_1, \dots, d_N) = A(O, 1, 2) \cdots A(O, k, l) \cdots A(O, r, N) \quad (13)$$

$$k < l, r < N$$

式中, d_i 表示第 i 个点在形状核中出现的次数。

所以, 形状仿射变换前后, 形状核满足

$$S_Core'(N, m; d_1, \dots, d_N) = |\mathbf{M}|^m \times S_Core(N, m; d_1, \dots, d_N) \quad (14)$$

2.1.3 颜色核在对角-偏移变换下的性质

考虑图像的颜色, 将像素点 (x_i, y_i) 的各通道的颜色值 $(R(x_i, y_i), G(x_i, y_i), B(x_i, y_i))$ 简记为 (R_i, G_i, B_i) 。3 维颜色空间, 将颜色基元定义为像素点 (R_i, G_i, B_i) 的极径在 3 个坐标轴投影为邻边构成的立方体的体积

$$V(O, i) = |(R_i - \bar{R})(G_i - \bar{G})(B_i - \bar{B})| \quad (15)$$

在颜色发生对角-偏移变换 (如式 (5)) 时, 可以证明颜色基元满足

$$V'(O, i) = |\mathbf{D}| V(O, i) \quad (16)$$

定义颜色核 $C_Core(N, m; r_1, r_2, \dots, r_N)$ 是 3 维颜色空间由 N 个点组成的 m 个颜色基元的连乘积, 即

$$C_Core(N, m; r_1, r_2, \dots, r_N) = V^{r_1}(O, 1) \times V^{r_2}(O, 2) \cdots V^{r_N}(O, N) \quad (17)$$

式中, r_i 表示第 i 个点的几何基元在颜色核中出现的个数。所以, 颜色对角-偏移变换前后, 颜色核满足

$$C_Core'(N, m; r_1, r_2, \dots, r_N) = |\mathbf{D}|^{r_1 + r_2 + \dots + r_N} C_Core(N, m; r_1, r_2, \dots, r_N) \quad (18)$$

2.2 构造方法

定理

$$I \left(S_Core(N, m; d_1, d_2, \dots, d_N) \times C_Core \left(N, N + m; \frac{d_1 + 2}{2}, \frac{d_2 + 2}{2}, \dots, \frac{d_N + 2}{2} \right) \right) / (SC_{u_{001}})^{N+m} \quad (19)$$

是几何仿射-颜色对角偏移变换的不变量。

证明: 假设图像经过几何仿射变换、颜色 DO 变换, 根据形状-颜色中心矩的定义, 已经消除了形状的平移参数 t 、颜色的偏移参数 o 。下面仅考虑矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \text{ 和 } \mathbf{D} = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix} \text{ 下的变换。}$$

根据 2.1.1 节和 2.1.2 节形状核、颜色核分别在形状仿射、颜色 DO 变换下的性质, 分析多重积分

$$I \left(S_Core(N, m; d_1, d_2, \dots, d_N) \times C_Core \left(N, N + m; \frac{d_1 + 2}{2}, \frac{d_2 + 2}{2}, \dots, \frac{d_N + 2}{2} \right) \right) \text{ 在几何仿射-颜色对角偏移变换前后的关系。}$$

$$I \left(S_Core'(N, m; d_1, d_2, \dots, d_N) \times C_Core' \left(N, N + m; \frac{d_1 + 2}{2}, \frac{d_2 + 2}{2}, \dots, \frac{d_N + 2}{2} \right) \right) = \iint \cdots \iint \left(S_Core'(N, m; d_1, d_2, \dots, d_N) \times C_Core' \left(N, N + m; \frac{d_1 + 2}{2}, \frac{d_2 + 2}{2}, \dots, \frac{d_N + 2}{2} \right) \right) dx'_1 dy'_1 \cdots dx'_N dy'_N =$$

$$\begin{aligned} & \iint \cdots \iint \left(|M|^m S_Core(N, m; r_1, r_2, \cdots, r_N) |D|^{\frac{d_1+2}{2} + \frac{d_2+2}{2} + \cdots + \frac{d_N+2}{2}} \times \right. \\ & C_Core\left(N, N+m; \frac{d_1+2}{2}, \frac{d_2+2}{2}, \cdots, \frac{d_N+2}{2}\right) |M|^N dx_1 dy_1 \cdots dx_N dy_N = \\ & |M|^{N+m} |D|^{\frac{d_1+2}{2} + \frac{d_2+2}{2} + \cdots + \frac{d_N+2}{2}} I \left(S_Core(N, m; d_1, d_2, \cdots, d_N) \times \right. \\ & \left. C_Core\left(N, N+m; \frac{d_1+2}{2}, \frac{d_2+2}{2}, \cdots, \frac{d_N+2}{2}\right) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

在矩阵 M 变换下, 零阶中心矩的变化为

$$\begin{aligned} SC_u'_{001} &= \iint |R'(x, y) - \bar{R}'| (G'(x, y) - \bar{G}') (B'(x, y) - \bar{B}') |dx dy = \\ & |M| \cdot |D| \cdot SC_u_{001} \end{aligned} \quad (21)$$

已知由 N 个点构成了 m 个三角形面积 $A(O, i, j)$, 每个 A 中除原点外有两个点参与构成, 每个点在所有 A 中出现次数为 d_i 因为除原点外, 每个 A 中有两个点参与, 则

$$\begin{aligned} 2m &= d_1 + d_2 + \cdots + d_N \Rightarrow \\ m &= \frac{1}{2}(d_1 + d_2 + \cdots + d_N) \Rightarrow \\ \frac{d_1+2}{2} + \frac{d_2+2}{2} + \cdots + \frac{d_N+2}{2} &= \\ \frac{1}{2}(d_1 + d_2 + \cdots + d_N) + \frac{2N}{2} &= m + N \end{aligned} \quad (22)$$

所以, 由式(20)–(22)可得

$$\begin{aligned} & \frac{I \left(S_Core'(N, m; d_1, d_2, \cdots, d_N) \times C_Core' \left(N, N+m; \frac{d_1+2}{2}, \frac{d_2+2}{2}, \cdots, \frac{d_N+2}{2} \right) \right)}{(SC_u'_{001})^{N+m}} = \\ & \left(|M|^{N+m} |D|^{\frac{d_1+2}{2} + \frac{d_2+2}{2} + \cdots + \frac{d_N+2}{2}} \times I \left(S_Core(N, m; d_1, d_2, \cdots, d_N) \times \right. \right. \\ & \left. \left. C_Core \left(N, N+m; \frac{d_1+2}{2}, \frac{d_2+2}{2}, \cdots, \frac{d_N+2}{2} \right) \right) \right) / (|M| |D| SC_u_{001})^{N+m} = \\ & \left(|M|^{N+m} |D|^{N+m} \times I \left(S_Core(N, m; d_1, d_2, \cdots, d_N) \times \right. \right. \\ & \left. \left. C_Core \left(N, N+m; \frac{d_1+2}{2}, \frac{d_2+2}{2}, \cdots, \frac{d_N+2}{2} \right) \right) \right) / (|M| |D| SC_u_{001})^{N+m} = \\ & I \left(S_Core(N, m; d_1, d_2, \cdots, d_N) \times C_Core \left(N, N+m; \frac{d_1+2}{2}, \frac{d_2+2}{2}, \cdots, \frac{d_N+2}{2} \right) \right) / (SC_u_{001})^{N+m} \end{aligned} \quad (23)$$

因此, 证明

$$\begin{aligned} & I \left(S_Core(N, m; d_1, d_2, \cdots, d_N) \times \right. \\ & \left. C_Core(N, N+m; \frac{d_1+2}{2}, \frac{d_2+2}{2}, \cdots, \frac{d_N+2}{2}) \right) / \\ & (SC_u_{001})^{N+m} \end{aligned}$$

是几何仿射-颜色对角偏移变换的不变量。

事实上, 上述对不变核的多重积分可以展开为形状-颜色矩的形式, 即

$$\sum_j a_j \prod_{i=1}^N SC_u_{p_i q_i r_i} \quad (24)$$

式中, j 的数目就是展开式中加数项的项数。若有 N

个点参与颜色核(或者形状核)的构成, 则每个加数项就包含 N 个形状-颜色矩的连乘, 即定义该不变量的次数为 N ; $p_i + q_i = d_i$, 即该矩的阶数由对应的点 i 在形状核中出现的次数决定; $r_i = (d_i + 2)/2$, 即该矩的度由对应点 i 在颜色核中出现的次数决定。因此, 通过控制构成形状核、颜色核的像素点数目以及各个点出现的次数, 可以构造不同次数、阶数及度的不变量。次数、阶数、度越高, 不变量的区分能力越强, 但不变量的计算复杂度也越高, 更容易受噪声的影响。所以, 均衡考虑不变量的区分能力和计算复杂度来选择不变核构造不变量。

2.3 实例

实例 1

形状核、颜色核分别定义为

$$S_Core(2,2;2,2) = 2A^2(O,1,2) = \frac{1}{2}(x_1y_2 - x_2y_1)^2 = \frac{1}{2}(x_1^2y_2^2 - 2x_1x_2y_1y_2 + x_2^2y_1^2) \quad (25)$$

$$C_Core(2,4;2,2) = |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^2 \times |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^2 \quad (26)$$

利用定义进行多重积分,并依次展开成形状-颜色矩(如式(8)(9))的形式:

$$\begin{aligned} SCMI(1) &= \frac{I(S_Core(2,2;2,2) \times C_Core(2,4;2,2))}{(SC_u_{001})^{2+2}} = \\ &= \frac{\iiint S_Core(2,2;2,2) \times C_Core(2,4;2,2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{(SC_u_{001})^2 (SC_u_{001})^2} = \\ &= \frac{\frac{1}{2} \iiint ((x_1^2 y_2^2 - 2x_1 y_1 x_2 y_2 + x_2^2 y_1^2) \times |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^2 \times \\ &\quad |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{((SC_u_{001})^2 (SC_u_{001})^2)} = \\ &= \frac{1}{2} \left(\iint x_1^2 |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^2 dx_1 dy_1 \times \right. \\ &\quad \left. \iint y_2^2 |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^2 dx_2 dy_2 - \right. \\ &\quad \left. 2 \iint x_1 y_1 |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^2 dx_1 dy_1 \times \right. \\ &\quad \left. \iint x_2 y_2 |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^2 dx_2 dy_2 + \right. \\ &\quad \left. \iint y_1^2 |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^2 dx_1 dy_1 \times \right. \\ &\quad \left. \iint x_2^2 |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^2 dx_2 dy_2 \right) / ((SC_u_{001})^2 (SC_u_{001})^2) = \\ &= \frac{\frac{1}{2} \{ SC_u_{202} SC_u_{022} - 2 SC_u_{112} SC_u_{112} + SC_u_{022} SC_u_{202} \}}{(SC_u_{001})^2 (SC_u_{001})^2} = \\ &= \frac{SC_u_{202}}{(SC_u_{001})^2} \times \frac{SC_u_{022}}{(SC_u_{001})^2} - \frac{SC_u_{112}}{(SC_u_{001})^2} \times \frac{SC_u_{112}}{(SC_u_{001})^2} = SC_u_{202} SC_u_{022} - SC_u_{112}^2 \quad (27) \end{aligned}$$

同样,利用不同的形状核、颜色核可以构造更多形状-颜色矩不变量,附录给出另外的7个实例。 $SCMI(i) (i=1,2,\dots,8)$ 分别为8个形状-颜色矩不变量。这些不变核的点数或每个点出现的次数不同,因此根据2.2节的分析,它们具有不同的次数、阶数及度。通过控制点数及其出现次数来控制不变量的次数、阶数和度,以使得不变量的区分能力和计算复杂度最好的均衡。在第3部分的实验中,将很好地验证这一点。

3 实验

以 Matlab2009 为编程平台,在 Intel Core2 Quad

CPU 2.66 GHZ、4 G 内存的微机上测试 SCMI 的性能,并与相关工作进行对比。

3.1 特征提取与相似性度量

利用提出的形状-颜色矩不变量(2.3节的实例1-8)构造8维的形状-颜色混合特征向量

$$\begin{aligned} SCMI^* &= \\ &= [SCMI(1), SCMI(2), SCMI(3), SCMI(4), \\ &\quad SCMI(5), SCMI(6), SCMI(7), SCMI(8)] \end{aligned}$$

随后,将通过图像检索实验,对比 SCMI 与两类特征的性能:线性加权的单一形状和单一颜色特征、局部特征 SIFT^[11]。

对于线性加权的单一形状和单一颜色特征,首先,利用 Hu 的相似不变矩(SMI)^[1]构造7维形状特

征向量

$$SMI^* = [SMI(1), SMI(2), SMI(3), SMI(4), SMI(5), SMI(6), SMI(7)]$$

然后,分别对图像的 R、G、B 3 个颜色分量计算的一阶、二阶、三阶颜色矩(CM)^[19]构造 9 维颜色特征向量

$$CM^* = [m_R, \sigma_R, s_R, m_G, \sigma_G, s_G, m_B, \sigma_B, s_B]$$

$$m_c = \frac{1}{A} \sum_i \sum_j P_{ij} \quad (28)$$

$$\sigma_c = \left[\frac{1}{A} \sum_i \sum_j (P_{ij} - m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$s_c = \left[\frac{1}{A} \sum_i \sum_j (P_{ij} - \mu)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (30)$$

式中, $c \in \{R, G, B\}$, A 表示图像像素的总数, P_{ij} 表示坐标 (i, j) 处的像素值。

对图像计算上述特征向量,根据特征向量的距离度量图像之间的相似性。选用修正的 χ^2 距离 (<http://dx.doi.org/10.1007/s11432-011-4453-y>) (MD_{χ^2}),假设两个 n 维特征向量 $V_1 = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n})$ 和 $V_2 = (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n})$, 它们的 χ^2 距离为

$$MD_{\chi^2}(V_1, V_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|v_{2i} - v_{1i}|}{|v_{2i}| + |v_{1i}|} \quad (31)$$

其取值范围是 $[0, 1]$ 。对于提出的混合特征 SCMI 的方法,直接计算两图像的混合特征向量距离;对于加权单一特征的方法,分别计算图像之间的形状特征向量距离、颜色特征向量距离,然后将两个距离的加权和作为图像间的距离(权重分别定为 0.5,认为形状颜色是同样重要的)。距离越小,说明图像越相近。

对于局部特征 SIFT,利用文献[11]的方法检测图像中的关键点并计算得到每个关键点 128 维的特征向量。然后利用文献[20]的方法,基于 SIFT 特征进行图像检索,即根据两幅图像之间特征点匹配的数目作为它们的相似度,关键点匹配的数量越多,图像的相似程度就越高。不同的是本文用式(31)定义的修正的 χ^2 距离代替文献[20]中的欧氏距离,并且同时考虑了降维前后的结果,将降维后的 SIFT 特征称为 PCA-SIFT。

3.2 不变性实验

图 1 是根据第 1 节定义的变换模型,通过计算机对原始图像进行颜色、形状变换所生成的一组图像,同一行发生形状变换、同一列发生颜色变换。图 1(a)是原始图像 $f = [R, G, B]^T$;图 1(e)对图 1(a)

的各颜色通道进行了均匀的尺度变换和偏移变换,

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = a \cdot f + o_u = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} o_u \\ o_u \\ o_u \end{pmatrix}, a, o_u \text{ 为}$$

常数;图 1(i)对图 1(a)的各颜色通道做了非均匀的

$$\text{尺度变换和偏移变换,即} \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = D \cdot f + O_{ff} =$$

$$\begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{pmatrix}, D \text{ 为 } 3 \times 3 \text{ 的矩阵且}$$

$\det(D) \neq 0, O_{ff}$ 为 3×1 的向量;图 1(f)——(h)、图 1(j)——(l)相对图 1(a)而言,既有形状变换也有颜色变换。为了消除像素插值或取整引入的误差,在变换过程中图像的像素值被存储为 Double 型。

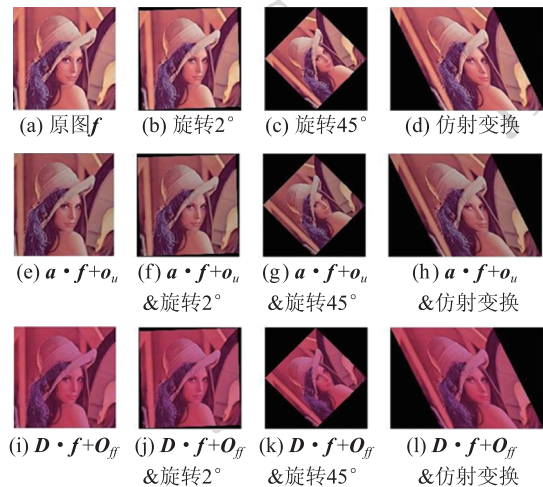


图 1 合成的颜色与形状变换的图像

Fig. 1 Images of synthesis color and shape transformations

为了验证 SCMI 的不变性,对图 1 每幅图像计算 8 维的形状-颜色混合特征向量 $SCMI^*$,结果如表 1 所示,同时根据式(31)分别计算图 1(b)——(l)与图 1(a)之间的特征向量距离 (Dis)。由于变换严格控制并且像素保存为 Double 型,所以当仅有颜色变换时(如图 1(e)——(i)),特征向量距离为 0。当有形状变换时(如图 1(b)——(g)、(f)——(h)、(j)——(l)),特征向量会发生微小的变化,这主要是形变过程中坐标值取整造成的。所以,表 1 的结果证实了 SCMI 理论上的不变性。

3.3 ALOI 数据库检索实验

假设图像库数据库中有 N 幅图像, N_j 表示与第

表 1 对合成变换的图像计算 SCMI* 的结果

Table 1 Results of SCMI* evaluated on synthetic images

图 1	[SCMI(1) /10 ²	SCMI (2) /10 ⁸	SCMI (3) /10 ⁵	SCMI (4) /10 ⁶	SCMI (5) /10 ²	SCMI (6) /10 ⁴	SCMI (7) /10 ⁻³	SCMI (8) /10 ³	Dis
(a)	[1.598 0	3.465 2	-2.583 2	3.409 1	5.258 3	2.914 2	-1.206 4	1.016 3]	0
(e)(i)	[1.598 0	3.465 2	-2.583 2	3.409 1	5.258 3	2.914 2	-1.206 4	1.016 3]	0
(b)(f)(j)	[1.903 2	3.551 6	-2.302 3	3.805 7	5.359 8	3.142 9	-1.105 6	1.122 4]	0.044 1
(c)(g)(k)	[1.647 5	3.651 2	-2.699 5	3.691 3	5.287 3	2.524 8	-1.509 2	1.052 6]	0.038 3
(d)(h)(l)	[1.783 4	3.059 5	-2.535 1	3.823 6	5.659 8	3.024 0	-0.967 3	1.234 2]	0.055 7

j 幅($j=1,2,\dots,n$)待检索图像相关的图像数量, R_j 表示第 j 幅待检索图像的第 i 相关($j=1,2,\dots,N_j$)的图像在实际检索出的序列中的位序。对于第 j 幅待检索图像检索最好结果是 R_j 正好是 1 到 N_j 的顶增序列时。对于一次检索, 规范化的平均等级 (NAR)^[21] 定义为

$$NAR(j) = \frac{1}{NN_j} \left(\sum_{i=1}^{N_j} R_i - \frac{N_j(N_j+1)}{2} \right) \quad (32)$$

取值范围是 $[0, 1]$ 。NAR 越小, 检索结果就越好。NAR=0 是最好的检索结果, 而 NAR=0.5 是随机检索的结果。考虑所有的检索, NAR 的平均值为

$$NAR = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n NAR(j) \right) \quad (33)$$

此外, 通过绘制准确率(P)-召回率(R)曲线可以直观地显示检索的结果。准确率是指检索出的相关图像数与检索出的图像总数 N_t 的比率; 召回率是指检索出的相关图像数和图像库中所有相关图像数 N_r 的比率, 即

$$P = \frac{|\{Nr\} \cap \{Nt\}|}{|\{Nt\}|}$$

$$R = \frac{|\{Nr\} \cap \{Nt\}|}{|\{Nr\}|} \quad (34)$$

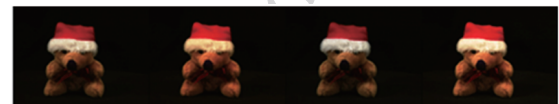
将准确率作为以召回率为变量的函数, 即 $P(R)$, 画出准确率-召回率曲线。

实验数据选用阿姆斯特丹大学的物体图像数据库 (ALOI)^[22], 其中包含物体在黑色背景、不同成像条件(不同光照条件以及不同拍摄视角)下的图像, 该类图像被称为近重复图像 (near-duplicated images)。目前, 该类型的图像数据越来越多, 比如电子商务网站上可能有多个角度、不同光照条件下拍摄的同一商品的一组照片等, 有效的特征描述将使用户准确、高效地检索到自己所需要的商品。选用 ALOI 数据库的两个子数据集进行检索实验, 验证 SCMI 对于 3 种变化条件下的有效性, 同时与加权的

全局特征 (CM + SMI)、局部特征 SIFT 和 PCA-SIFT 对比性能。

3.3.1 单一的光照变化

第 1 个图像数据集由 112 种物体分别在 6 种不同光源颜色、4 种不同光源位置下的 1 120 幅图像构成。图 2 是小熊的示例图像。对于每个物体, 将一幅图像作为待检索目标, 其他图像用来构成检索库。



(a) 不同光源颜色



(b) 不同光源位置

图 2 不同光照条件拍摄的小熊图像

Fig. 2 Example images of a bear under different imaging conditions

从检索结果中看出, 当光照条件变化时, 两种全局特征的性能要优于局部特征的性能 (根据式 (33) 计算利用 SIFT 和 PCA-SIFT 检索的 NARA 分别为 0.160 2、0.174 3), 并且 SCMI 的性能 (NARA = 0.084 9) 要比加权特征 (NARA = 0.148 9) 有更好的效果, 由图 3 的准确率-召回率曲线上也可以得出同样的结论。分析原因, 主要由于 SCMI 是在颜色对角-偏移的颜色变换模型下构造的, 比 CM 更适用于真实光照的变化, 而 SIFT 仅利用图像的灰度信息, 对灰度线性变换有一定的鲁棒性, 容易受到复杂颜色变换的影响。

3.3.2 单一视角变化

考虑不同的拍摄视角导致同一个物体在图像中的形状变化。第 2 个数据集由 112 种物体 (与第 1 个数据集相同) 在 11 种不同拍摄角度下的 1 232 幅

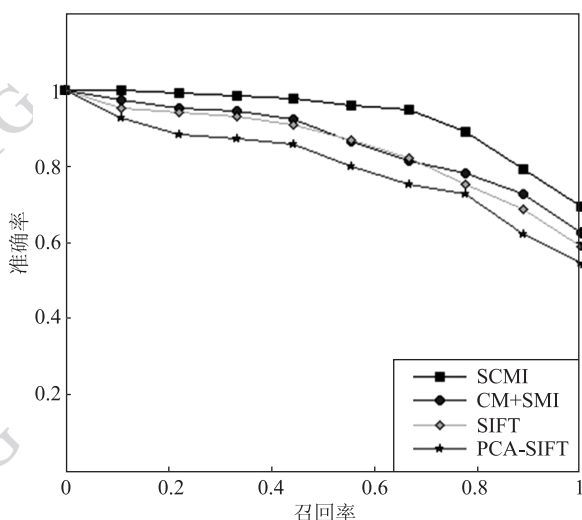


图3 单一光照变化下检索的准确率-召回率曲线

Fig. 3 Precision-Recall curve for retrieval
in different illuminations

图像。图4是小熊在不同视角下的示例图像。对于每个物体,将一幅图像作为待检索目标,其他图像用来构成检索库。



图4 不同视角拍摄的小熊图像

Fig. 4 Example images of a bear under different viewpoints

在这种情况下,利用 SCMI 检索的 NARA 为 0.027 2,加权特征检索的 NARA 为 0.068 5,SIFT 检索的 NARA 为 0.082 4,PCA-SIFT 检索的 NARA 为 0.096 8。从图5中可以看出,4种特征对于 ALOI 数据集的形状变化都有较好的鲁棒性,SCMI 表现更好一些,这主要由于它是在形状仿射变换的条件下构造的,而理论上 SMI 在相似变换下具有不变性,SIFT 仅在旋转变换下具有不变性。

3.3.3 光照与视角同时变化

在真实条件下,光照变化与视角变化往往同时存在。将 3.3.1 节实验中的第 1 个图像集作为检索库,对于每个物体,选择一幅不同角度拍摄的图像(也就是从 3.3.2 节实验中的第 2 个数据集中选择该物体的一幅图像)作为待检索的目标。

利用 SCMI、CM + SMI、SIFT、PCA-SIFT 4 种特征检索的 NARA 分别为 0.126 9、0.309 2、0.293 4、0.310 6。从图6中看出,SCMI 比加权特征、局部特征表现的更为出色。因此,在真实条件下,对于同一

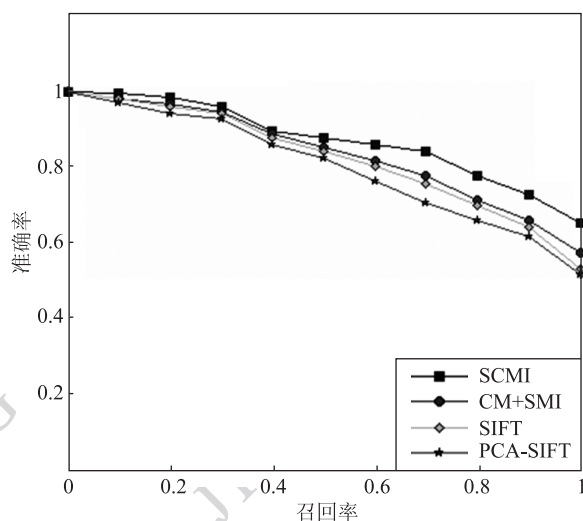


图5 单一视角变化下检索的准确率-召回率曲线

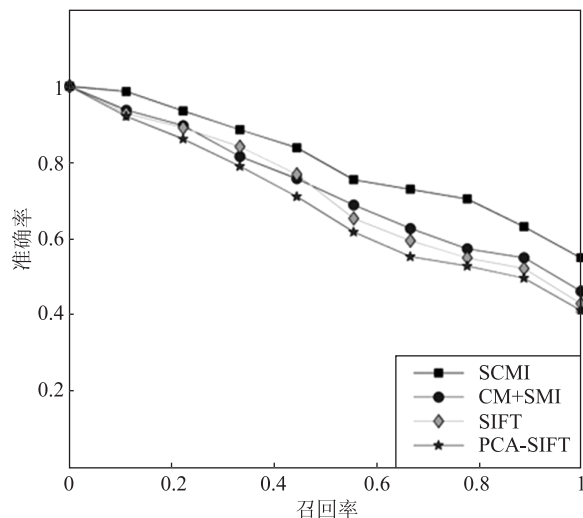
Fig. 5 Precision-Recall curve for retrieval
in different viewpoints

图6 光照和视角同时变化下检索的准确率-召回率曲线

Fig. 6 Precision-Recall curve for retrieval
in different illuminations and viewpoints

物体,当光照变化与视角变化同时存在导致图像的颜色、形状变化时,SCMI 是用于描述图像更好的方法。

利用 4 种不同的特征分别进行 112 次检索所需要的总时间、平均每次的检索时间统计为表 2。其中,数据库图像的特征向量是在检索之前预计算的,不占用检索时间;一幅图像的检索时间包括待检索图像的特征向量计算时间和特征匹配时间。由表 2 的结果看出:总体而言,全局特征(SCMI、CM + SMI)相比局部特征具有更好的检索效率;SCMI 由于包含了高阶矩的计算,所以检索时

间比 CM + SMI 稍长一些; SIFT 要对待检索图像与数据库中的每幅图像进行匹配, 即两图像之间所有关键点之间进行 128 维特征向量比较, 因此消耗较长的时间; 利用 PCA 将特征向量由 128 维降为 20 维, 明显降低了匹配速度, 提高了检索效率, 但检索性能受到了一定的影响 (如图 6 所示), 可考虑采用更优的降维方法或者高维向量相似性匹配方法改进性能^[12]。

表 2 不同特征的检索效率

Table 2 Retrieval efficiency of different features

特征	检索时间	平均检索时间 /s
SCMI	56.761 6	0.506 8
CM + SMI	50.803 2	0.453 6
SIFT	93.464 0	0.834 5
PCA-SIFT	69.820 8	0.623 4

3.4 COREL 数据库检索实验

为了进一步检验几种特征的检索性能, 选用 Corel-1000^[23] 作为测试图像库, 该数据库共包含 10 类共 1 000 幅图像, 每类 100 幅彩色图像, 主要包括非洲 (Africa)、海滩 (Beach)、建筑 (Building)、公共汽车 (Bus)、恐龙 (Dinosaurs)、大象 (Elephant)、花 (Flower)、马 (Horse)、山川 (Mountain) 和食物 (Food)。首先, 从该数据库的每类图像中随机抽取 20 幅图像 (共 200 幅); 由于该数据库没有同一目标不同拍摄条件下的图像, 所以接着对每幅图像进行 5 种变换处理 (包括光照、白平衡、几何形变、模糊、加噪), 得到 1 000 幅变换后的图像; 最后, 将变换后的 1 000 幅图像与原来的 200 幅图像一起共 1 200 幅图像构成实验数据集 D 。

从 D 的每类图像中随机抽取 10 幅作为检索测试用例, 这样共 100 幅图像构成测试集 T , 每类图像的测试集记做 T_i , 且 $T_i \subseteq T, 1 \leq i \leq 10$ 。对于每个检索图像, D 中有 120 幅图像与之相关。通过计算检索 T 的每类图像的 MAP (mean average precision) 来评价算法的性能^[24]: 首先, 根据式 (34) 统计每个查询用例 t 的查准率-查全率值 $R \rightarrow P(R)$; 然后计算 t 的 AP (average precision) 值

$$AP(t) = \frac{1}{120} \sum_{n=1}^{120} P_i(R_n) \quad (35)$$

最后计算 T 中每类图像的 MAP 值

$$MAP_i = \frac{1}{|T_i|} \sum_{t \in T_i} AP(t) \quad (36)$$

式中, $|T_i| = 10, 1 \leq i \leq 10$ 。

分别利用 4 种特征进行上述检索实验, 绘制的 MAP 直方图如图 7 所示。从直方图的结果可以看出, 作为全局特征, SCMI 和 CM + SMI 对于整体属性相似的图像, 比如相似自然风光 (如 Africa、beach、mountain)、人造背景 (如 food) 等, 相比局部特征而言具有较好的检索效果。同时, 对于背景单一、大体类似物体 (如 dinosaur) 的检索也有很好的效果。本文提出的形状-颜色混合特征 SCMI 相对加权特征 CM + SMI 表现出更突出的性能, 而检索效率并没有明显降低。

对于局部特征 SIFT、PCA-SIFT, 两幅图像只要有部分物件重复或者同一物体的局部重复 (如 Building、Bus、Flower、Horse、Elephant 等) 就可匹配到, 从而被判定为相似图像, 实现良好的检索结果。SIFT 相对于降维后的 PCA-SIFT 有更好的检索效果, 但关键点高维特征向量的匹配会降低检索效率。

3.5 讨论

由上述实验结果可以看出, 对于不同类型的图像数据集或者不同的检索需求, 应选用不同的特征。总体而言检索需求分为两大类: 其一是“近重复检索”, 主要针对同一源图经过不同变换 (包括光照、白平衡、形变、模糊等) 的图像 (如 ALOI 数据库), 或者整体属性相似的图像 (如 COREL 数据库中的部分自然风光图像), 或者大体类似的物体图像 (如 COREL 数据库中单一背景的物体图像), 可以采用全局特征 (如 SCMI、CM + SMI 等) 来描述图像, 主要应用于基本的相似检索或分类、图像去重、版权保护、违禁识别等; 其二是“局部检索”, 对于复杂背景图像或者多物体图像, 两幅图像只要有部分物件重复或同一物体的局部重复就能匹配到 (如 COREL 数据库的部分图像), 从而判定为相似图像, 此时一般采用局部特征 (如 SIFT 等) 来描述图像。

此外, 第 2 类检索也可以转化为第 1 类检索, 如先对图像进行分割然后利用全局特征对区域进行描述; 全局特征与整体特征也可以组合使用, 如先利用全局特征进行大致图像分类, 然后利用局部特征进行精确检索。因此, 可以根据应用场景灵活的选择特征。

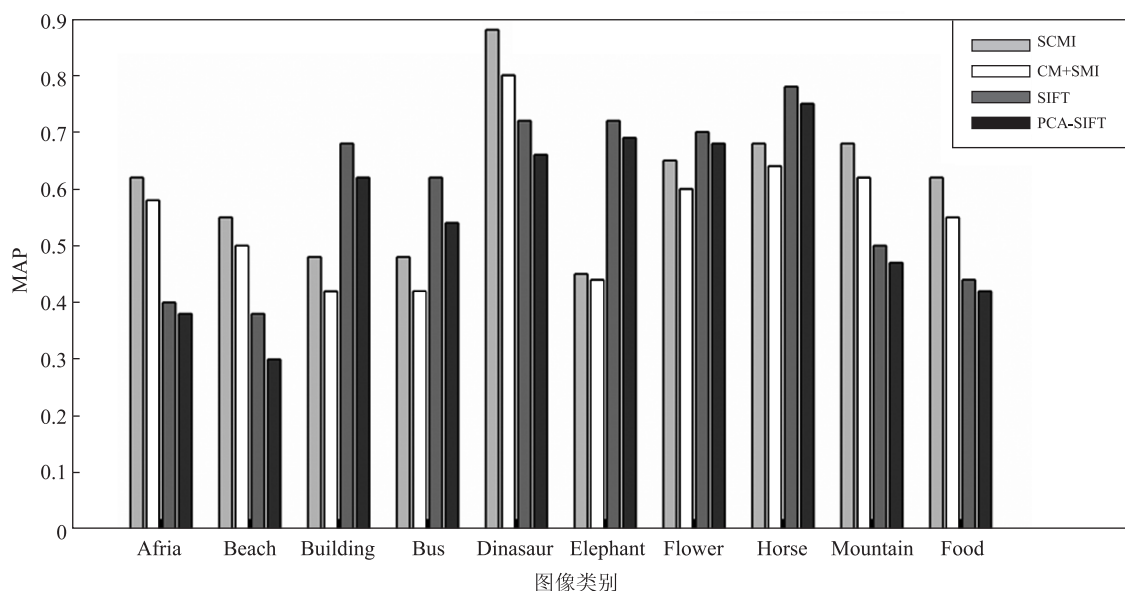


图7 利用4种特征检索各类图像的MAP直方图

Fig. 7 MAP histogram for retrieve each class of images by four types of features

4 结 论

致力于解决图像检索中多视觉特征的组合问题,主要有以下3个方面的贡献:

1)提出了一种形状-颜色混合不变量的构造方法,该构造方法利用几何基元组成不变核,通过对不变核多重积分得到不变量,具有较好的直观性;不变核的形式有无数多种,理论上能够得到无限多的不变量,因而,这种方法具有很好的扩展性。

2)该形状-颜色混合不变量在理论上具有同时对几何仿射变换、颜色对角偏移变换的不变性。

3)通过检索实验与已有的基于多特征检索的方法比较,结果表明混合不变量对近复制图像、整体属性相似图像具有较好适用性,其检索时间略多于线性加权方法但明显少于局部特征的方法。

下一步将针对SCMI的独立性和完备性进行研究,提高SCMI在图像检索中的不变性和区分能力,将SCMI应用于更具有一般性质的图像数据库的检索。此外,如何将形状和颜色与其他视觉特征(如纹理等)结合、如何将图像全局的SCMI特征应用于图像局部区域的描述、如何基于特征向量建立更高效的索引结构及相似性匹配方法等,都是进一步的研究内容。

参考文献 (References)

[1] Hu M. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. IRE

Transactions on Information Theory, 1962, (8): 179-187.

[2] Gevers T. Color-based retrieval [C]// Lew M S. Principles of Visual Information Retrieval. Berlin: Springer, 2001: 11-49.

[3] Zhang H W, Sun J G. A research of image retrieval based on color and shape [J]. Computer Simulation, 2009, 26(11): 207-210. [张华伟, 孙劲光. 基于颜色与形状图像检索的研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(11): 207-210.]

[4] Rui Y, Huang T S, Mehrotra S. Content-based image retrieval with relevance feedback in MARS [C]// Proceedings of International Conference on Image Processing. Washington DC, USA: IEEE, 1997: 815-818.

[5] Wu J, Qiu Z D. An overview: low-level feature fusion in content-based image retrieval [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(2): 189-197. [吴介, 裘正定. 底层内容特征的融合在图像检索中的研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(2): 189-197.]

[6] Piamsa-nga P, Alexandridis N A, Srakaew S, et al. Multi-feature content based image retrieval [C]// Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Imaging. Halifax, Canada: IASTED, 1998.

[7] Sun J D, Cui J T, Wu X S, et al. Color image retrieval based on color and shape features [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(7): 820-827. [孙君顶, 崔江涛, 毋小省, 等. 基于颜色和形状特征的彩色图像检索方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 820-827.]

[8] Deng C Q, Feng G. Content-based image retrieval using combination features [J]. Computer Applications, 2003, 23(7): 100-102. [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.]

[9] Wang Y P, Huang X S, Li X L, et al. Moment invariants of gray distorted based on Hu moments [J]. Journal of Dalian Maritime

- University, 2009, 34(4):23-27. [王义平, 黄新生, 李晓雷, 等. 一种新的灰度变化不变矩[J]. 大连海事大学学报, 2009, 34(4):23-27.]
- [10] Mindru F, Tuytelaars T, Gool L V, et al. Moment invariants for recognition under changing viewpoint and illumination [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 94(1):3-27.
- [11] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [12] Zhang X, Li Z W, Zhang L, et al. Efficient indexing for large-scale visual search [C]// Proceedings of International Conference on Computer Vision. Kyoto, Japan: IEEE, 2009:1103-1110.
- [13] Xu D, Li H. Geometric moment invariants [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1):240-249.
- [14] Sun J X. Feature Extraction in Pattern Recognition and Computer Vision Invariants [M]. ChangSha: Academic Press, 2001, 228-230. [孙即祥. 模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2001, 228-230.]
- [15] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [16] Chen T. Research on affine invariant feature of images [D]. ChangSha: National University of Defense Technology, 2006. [陈涛. 图像仿射不变特征提取方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.]
- [17] Shafer S. Using color to separate reflection components [J]. Color Research and Application, 1985, 10(4):210-218.
- [18] Finlayson G D, Hordley S D, Xu R. Convex programming colour constancy with a diagonal-offset model [C]// Proceedings of International Conference on Image Processing. Genoa, Italy: IEEE, 2005:948-951.
- [19] Markus S, Markus O. Similarity of color images [C]// Proceedings of SPIE Storage and Retrieval for Image and Video Databases. San Jose, CA, USA: SPIE, 1995: 381-392.
- [20] Wu R H, Li S Z, Zou F M. Image retrieval based on SIFT features [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(2): 478-481. [吴锐航, 李绍滋, 邹丰美. 基于 SIFT 特征的图像检索[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(2):478-481.]
- [21] Weijer J V D, Schmid C. Blur robust and color constant image description [C]// Proceedings of International Conference On Image Processing. Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2006:993-996.
- [22] Geusebroek J M, Burghouts G J, Smeulders A W M. The Amsterdam library of object images [J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 61(1):103-112.
- [23] Li Jia, Wang J Z. Download databases [EB/OL]. (2003-09-01) [2012-12-18]. <http://wang.ist.psu.edu/docs/related>.
- [24] Zhi L J, Zhang S M, Zhao D Z, et al. Combining similarity measures in content-based image retrieval guided by mutual information [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(10): 1850-1857. [支力佳, 张少敏, 赵大哲, 等. 互信息启发的相似度组合图像检索算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(10):1850-1857.]

附 录

实例 2

$$\begin{aligned}
 S_Core(4, 6; 3, 3, 3, 3) &= 32A(O, 1, 2)A^2(O, 1, 3)A(O, 3, 4)A^2(O, 2, 4) \\
 C_Core\left(2, 10; \frac{5}{2}, \frac{5}{2}, \frac{5}{2}, \frac{5}{2}\right) &= |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^{\frac{5}{2}} |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^{\frac{5}{2}} \times \\
 &\quad |(R_3 - \bar{R})(G_3 - \bar{G})(B_3 - \bar{B})|^{\frac{5}{2}} |(R_4 - \bar{R})(G_4 - \bar{G})(B_4 - \bar{B})|^{\frac{5}{2}} \\
 SCMI(2) &= (-SC_{u_{30}(\frac{5}{2})}SC_{u_{03}(\frac{5}{2})} + 6SC_{u_{30}(\frac{5}{2})}SC_{u_{21}(\frac{5}{2})} \times \\
 &\quad SC_{u_{12}(\frac{5}{2})}SC_{u_{03}(\frac{5}{2})} - 4SC_{u_{30}(\frac{5}{2})}SC_{u_{12}(\frac{5}{2})} - 4SC_{u_{03}(\frac{5}{2})}SC_{u_{21}(\frac{5}{2})} + \\
 &\quad 3SC_{u_{21}(\frac{5}{2})}SC_{u_{12}(\frac{5}{2})}) / (SC_{u_{001}})^{10} = -SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})}SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})} + 6SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})}SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})}SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} \times \\
 &\quad SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})} - 4SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})}SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} - 4SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})}SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})} + 3SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})}SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})}
 \end{aligned}$$

实例 3

$$\begin{aligned}
 S_Core(3, 4; 2, 3, 3) &= 8A(O, 1, 2)A(O, 1, 3)A^2(O, 2, 3) \\
 C_Core\left(3, 7; 2, \frac{5}{2}, \frac{5}{2}\right) &= |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^2 \times \\
 &\quad |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^{\frac{5}{2}} |(R_3 - \bar{R})(G_3 - \bar{G})(B_3 - \bar{B})|^{\frac{5}{2}} \\
 SCMI(3) &= (SC_{u_{202}}SC_{u_{21}(\frac{5}{2})}SC_{u_{03}(\frac{5}{2})} - SC_{u_{202}}SC_{u_{12}(\frac{5}{2})} - \\
 &\quad SC_{u_{112}}SC_{u_{30}(\frac{5}{2})}SC_{u_{03}(\frac{5}{2})} + SC_{u_{112}}SC_{u_{21}(\frac{5}{2})} \times \\
 &\quad SC_{u_{12}(\frac{5}{2})} + SC_{u_{022}}SC_{u_{30}(\frac{5}{2})}SC_{u_{03}(\frac{5}{2})} - SC_{u_{022}}SC_{u_{21}(\frac{5}{2})}) / (SC_{u_{001}})^7 =
 \end{aligned}$$

$$SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})} - SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} - SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})} + SC_{\eta_{112}} \times \\ SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} + SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})} - SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})}$$

实例 4

$$S_{Core}(5,6;3,3,2,2,2) = 32A(O,1,3)A(O,1,4)A(O,1,5)A(O,2,3)A(O,2,4)A(O,2,5) \\ C_{Core}\left(5,11;\frac{5}{2},\frac{5}{2},2,2,2\right) = |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^{\frac{5}{2}} |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^{\frac{5}{2}} \times \\ |(R_3 - \bar{R})(G_3 - \bar{G})(B_3 - \bar{B})|^2 |(R_4 - \bar{R})(G_4 - \bar{G})(B_4 - \bar{B})|^2 |(R_5 - \bar{R})(G_5 - \bar{G})(B_5 - \bar{B})|^2 \\ SCMI(4) = (SC_{u_{202}}^3 SC_{u_{03}(\frac{5}{2})}^2 + 6SC_{u_{202}}^2 SC_{u_{112}} SC_{u_{12}(\frac{5}{2})} SC_{u_{03}(\frac{5}{2})} - 3SC_{u_{202}}^2 SC_{u_{022}} \times \\ SC_{u_{12}(\frac{5}{2})} - 6SC_{u_{112}}^2 SC_{u_{202}} SC_{u_{21}(\frac{5}{2})} SC_{u_{03}(\frac{5}{2})} - 6SC_{u_{112}}^2 SC_{u_{12}(\frac{5}{2})} SC_{u_{202}} + \\ 12SC_{u_{202}} SC_{u_{112}} SC_{u_{022}} SC_{u_{21}(\frac{5}{2})} SC_{u_{12}(\frac{5}{2})} - 3SC_{u_{022}}^2 SC_{u_{202}} SC_{u_{21}(\frac{5}{2})} + \\ 2SC_{u_{112}}^3 SC_{u_{30}(\frac{5}{2})} SC_{u_{03}(\frac{5}{2})} + 6SC_{u_{112}}^3 SC_{u_{21}} SC_{u_{12}} - 6SC_{u_{112}}^2 SC_{u_{022}} \times \\ SC_{u_{30}(\frac{5}{2})} SC_{u_{12}(\frac{5}{2})} - 6SC_{u_{112}}^2 SC_{u_{21}(\frac{5}{2})} SC_{u_{022}} + 6SC_{u_{022}}^2 SC_{u_{112}} SC_{u_{30}(\frac{5}{2})} \times \\ SC_{u_{21}(\frac{5}{2})} - SC_{u_{022}}^3 SC_{u_{30}(\frac{5}{2})}^2) / (SC_{u_{001}})^{11} = \\ SC_{\eta_{202}}^3 SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})}^2 + 6SC_{\eta_{202}}^2 SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})} - 3SC_{\eta_{202}}^2 \times \\ SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} - 6SC_{\eta_{112}}^2 SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})} - 6SC_{\eta_{112}}^2 \times \\ SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{202}} + 12SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} - \\ 3SC_{\eta_{022}}^2 SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})} + 2SC_{\eta_{112}}^3 SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{03}(\frac{5}{2})} + 6SC_{\eta_{112}}^3 \times \\ SC_{\eta_{21}} SC_{\eta_{12}} - 6SC_{\eta_{112}}^2 SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{12}(\frac{5}{2})} - 6SC_{\eta_{112}}^2 SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})} \times \\ SC_{\eta_{022}} + 6SC_{\eta_{022}}^2 SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})} SC_{\eta_{21}(\frac{5}{2})} - SC_{\eta_{022}}^3 SC_{\eta_{30}(\frac{5}{2})}^2)$$

实例 5

$$S_{Core}(2,4;4,4) = 8A^4(O,1,2) \\ C_{Core}(2,6;3,3) = |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^3 |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^3 \\ SCMI(5) = \frac{SC_{u_{403}} SC_{u_{043}} - 4SC_{u_{313}} SC_{u_{133}} + 3SC_{u_{223}}^2}{(SC_{u_{001}})^6} = \\ SC_{\eta_{403}} SC_{\eta_{043}} - 4SC_{\eta_{313}} SC_{\eta_{133}} + 3SC_{\eta_{223}}^2$$

实例 6

$$S_{Core}(3,6;4,4,4) = 32A^2(O,1,2)A^2(O,1,3)A^2(O,2,3) \\ C_{Core}(3,9;3,3,3) = |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^3 \times \\ |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^3 |(R_3 - \bar{R})(G_3 - \bar{G})(B_3 - \bar{B})|^3 \\ SCMI(6) = (SC_{u_{403}} SC_{u_{223}} SC_{u_{043}} - SC_{u_{403}} SC_{u_{133}}^2 - SC_{u_{043}} \times \\ SC_{u_{313}}^2 + SC_{u_{313}} SC_{u_{223}} SC_{u_{133}} - SC_{u_{223}}^3) / (SC_{u_{001}})^9 = \\ SC_{\eta_{403}} SC_{\eta_{223}} SC_{\eta_{043}} - SC_{\eta_{403}} SC_{\eta_{133}}^2 - SC_{\eta_{043}} SC_{\eta_{313}}^2 + \\ SC_{\eta_{313}} SC_{\eta_{223}} SC_{\eta_{133}} - SC_{\eta_{223}}^3$$

实例 7

$$S_{Core}(3,4;4,2,2) = 8A^2(O,1,2)A^2(O,1,3) \\ C_{Core}(3,7;3,2,2) = |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^3 |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^2 \times \\ |(R_3 - \bar{R})(G_3 - \bar{G})(B_3 - \bar{B})|^2 \\ SCMI(7) = (SC_{u_{202}}^2 SC_{u_{043}} - 4SC_{u_{202}} SC_{u_{112}} SC_{u_{133}} + \\ 2SC_{u_{202}} SC_{u_{022}} SC_{u_{223}} + 4SC_{u_{112}}^2 SC_{u_{223}} - \\ 4SC_{u_{112}} SC_{u_{022}} SC_{u_{313}} + SC_{u_{022}}^2 SC_{u_{403}}) / (SC_{u_{001}})^7 =$$

实例 8

$$\begin{aligned}
& SC_{\eta_{202}}^2 SC_{\eta_{043}} - 4SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{133}} + 2SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{223}} + \\
& 4SC_{\eta_{112}}^2 SC_{\eta_{223}} - 4SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{313}} + SC_{\eta_{022}}^2 SC_{\eta_{403}} \\
S_{Core}(4, 6; 2, 4, 4, 2) &= 32A^2(O, 1, 2)A^2(O, 2, 3)A^2(O, 3, 4) \\
C_{Core}(4, 10; 2, 3, 3, 2) &= |(R_1 - \bar{R})(G_1 - \bar{G})(B_1 - \bar{B})|^2 \times |(R_2 - \bar{R})(G_2 - \bar{G})(B_2 - \bar{B})|^3 \\
& \quad |(R_3 - \bar{R})(G_3 - \bar{G})(B_3 - \bar{B})|^3 |(R_4 - \bar{R})(G_4 - \bar{G})(B_4 - \bar{B})|^2 \\
SCMI(8) &= (SC_{u_{202}}^2 SC_{u_{223}} SC_{u_{043}} - SC_{u_{202}}^2 SC_{u_{133}} - \\
& 2SC_{u_{202}} SC_{u_{112}} SC_{u_{313}} SC_{u_{043}} + 2SC_{u_{202}} SC_{u_{112}} SC_{u_{223}} SC_{u_{133}} + \\
& SC_{u_{202}} SC_{u_{022}} SC_{u_{403}} SC_{u_{043}} - 2SC_{u_{202}} SC_{u_{022}} SC_{u_{313}} SC_{u_{133}} + \\
& SC_{u_{223}}^2 SC_{u_{202}} SC_{u_{022}} + 4SC_{u_{112}}^2 SC_{u_{313}} SC_{u_{133}} - 4SC_{u_{112}}^2 SC_{u_{223}}^2 - \\
& 2SC_{u_{112}} SC_{u_{022}} SC_{u_{403}} SC_{u_{133}} + 2SC_{u_{112}} SC_{u_{022}} SC_{u_{313}} SC_{u_{223}} + \\
& SC_{u_{022}}^2 SC_{u_{403}} SC_{u_{223}} - SC_{u_{022}}^2 SC_{u_{313}}^2) / (SC_{u_{001}})^{10} = \\
& SC_{\eta_{202}}^2 SC_{\eta_{223}} SC_{\eta_{043}} - SC_{\eta_{202}}^2 SC_{\eta_{133}}^2 - 2SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{313}} SC_{\eta_{043}} + \\
& 2SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{223}} SC_{\eta_{133}} + SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{403}} SC_{\eta_{043}} - \\
& 2SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{313}} SC_{\eta_{133}} + SC_{\eta_{223}}^2 SC_{\eta_{202}} SC_{\eta_{022}} + \\
& 4SC_{\eta_{112}}^2 SC_{u_{313}} SC_{\eta_{133}} - 4SC_{\eta_{112}}^2 SC_{\eta_{223}}^2 - 2SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{403}} SC_{\eta_{133}} + \\
& 2SC_{\eta_{112}} SC_{\eta_{022}} SC_{\eta_{313}} SC_{\eta_{223}} + SC_{\eta_{022}}^2 SC_{\eta_{403}} SC_{\eta_{223}} - SC_{\eta_{022}}^2 SC_{\eta_{313}}^2
\end{aligned}$$