

一种基于改进 SIFT 的图像检索算法

孙光民 王晨阳

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124)

摘要:为了实现高准确率要求的数字出版物中引用图片的侵权审查,提出了一种基于改进 SIFT 算法的图像检索算法。该改进算法首创性地提出了在特征提取过程中加入图像 SIFT 特征点的邻域颜色特征,并设计了双匹配的特征点匹配策略,增强了特征点匹配的可靠性,提升了图像检索的性能。该改进算法被分为 3 个步骤来实现:基于灰度和 HSV 彩色空间的双尺度空间的生成,结合传统 SIFT 特征点描述子和特征点颜色特征向量的新特征点描述子的生成,特征点搜索与双匹配。实验结果表明,与原始的 SIFT 算法相比,本文改进算法的检索精度更高,并且检索速度没有明显下降。

关键词:侵权审查;图像检索;SIFT;128graySIFT+36Color

中图分类号: TP391 TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Image retrieval algorithm based on improved SIFT

Sun Guangmin Wang Chenyang

(College of Electronic and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To achieve highly accurate infringement retrieval for reference images in digital publications, an improved SIFT (scale invariant feature transformation) algorithm for image retrieval has been proposed in this paper. To increase the reliability of feature-points matching and image retrieval, the neighborhood color features of SIFT feature-points are innovatively added to the image feature extraction process and a double-matching process is designed in our paper. In this paper, our improved algorithm is divided into three steps to describe: double scale space generation based on grayscale space and HSV color space respectively, new feature descriptors generation by combing traditional descriptors of feature-points and color feature vectors around feature points, feature-points searching and double matching. Experimental results show that, compared with the original SIFT algorithm, our improved algorithm has higher retrieval accuracy, and at the same time, the retrieval speed is not significantly decreased.

Keywords: infringement retrieval; image retrieval; SIFT; 128graySIFT+36Color

1 引言

随着计算机网络的快速发展,流媒体技术、存储技术等高新技术的蓬勃发展,数字出版已经成为新闻出版业发展的主要方向。同时,数字出版带来的知识产权保护问题引起了社会的广泛关注。数字出版物中图片的侵权检索成为知识产权保护的重要任务之一。相比于耗时耗力、出错率很大的人工审查,智能化的数字出版物中图片侵权检测技术的研究与开发具有重要的理论和现实意义。

考虑到数字出版物中存在侵权行为的图片很可能是具有版权的正规清晰图片的变形,本文选用对图像尺度变化、平移、旋转、仿射变换、光照变化、部分遮挡等都具有良

好鲁棒性的 SIFT 算法作为原始检索算法。但是,SIFT 算法存在误匹配问题和缺失图像颜色特征等重要信息的缺陷,它不能满足图像侵权审查高检索准确度的要求。截至目前,许多研究人员将颜色特征与 SIFT 特征相结合提出了自己的改进算法。RGB-SIFT, HSV-SIFT, Opponent-SIFT 和 Transformed-color SIFT 算法^[1]分别在 RGB 颜色通道、HSV 颜色通道、对手颜色通道和变换颜色通道进行 SIFT 特征点检测和特征描述子生成,给原始 SIFT 算法增加了颜色信息。XIAO P 等^[2]将图像的颜色空间转换到 HSV 颜色空间,并用一个一维向量来描述颜色空间,在该颜色空间的基础上提取 SIFT 描述子,生成 CQ-SIFT 描述子。Abdel-Hakim A E 等提出的 CSIFT(colored-SIFT)

收稿日期:2016-05

算法^[3]引入了图像的颜色不变量来代替 SIFT 算法中用到的图像灰度值作为图像的输入值。然后在该彩色空间中进行 SIFT 特征提取及匹配。Al D 等^[4]采用独立分量分析的方法提出了一种自适应的、有效的颜色独立分量来描述输入图像的彩色空间,并在该彩色空间中提取 SIFT 特征描述子,即 CIC-SIFT 的特征描述子。BO L 等^[5]提出了一种 137 维的 SIFT-颜色矩描述子(SIFT-color moments)取代原始 128 维 SIFT 特征描述子来描述 SIFT 特征点。它将每个特征点周围邻域内每个颜色通道对应的 3 个颜色低阶矩向量增加到传统 SIFT 特征点描述子中。这些改进算法以不同的方式在原始 SIFT 特征基础上加入了颜色信息,增强了原始算法的图像特征描述能力。但这些改进算法也存在不容忽视的缺点,如:颜色特征提取加大算法计算量;特征描述子维数增加造成特征搜索和匹配复杂度增大;SIFT 特征提取计算中的多个参数是根据灰度图像来设定的,不一定完全适用于彩色图像,基于彩色图像提取的 SIFT 特征可能不能良好的表达出图像真实的属性。这些因素都制约着颜色特征更好的引入 SIFT 算法中。

为了解决上述问题,本文提出了一种引入特征点颜色信息,但又不过分增加算法复杂度的改进 SIFT 算法。该改进算法引入特征点邻域颜色直方图特征来对图像间匹配成功的 SIFT 特征点进行二次匹配判定,增强了原始 SIFT 算法图像匹配的可靠性,降低图像间特征点对的误匹配的概率,提升了最终图像检索结果的可信度。同时,没有增加特征点搜索与匹配的复杂度。本文的改进算法能更好的满足数字出版社出版物中图像侵权检索应用的高准确度要求。

2 SIFT 算法相关介绍

SIFT 算法^[6-8]是由英属哥伦比亚大学教授 David Lowe 在 1999 年提出的,并在 2004 年做了进一步的改进。该算法为每张图像提取成百上千的特征点描述子来描述图像,并使用图像之间的特征点匹配对的数目来衡量它们之间的相似性。在这里,SIFT 算法被分为 5 个步骤进行介绍。

2.1 尺度空间生成

为了保证算法对图像的尺度变换有很好的鲁棒性,并且算法稳定性高,SIFT 算法为每张图像建立差分高斯金字塔尺度空间,并且将尺度空间中局部特征变化剧烈的点(局部极值点)选为特征点。

SIFT 算法利用一系列尺度因子递增的高斯函数依次与经过滤波预处理的原始图像做卷积滤波,生成高斯金字塔第一组的图像。然后,将第一组图像中尺度为初始尺度 2 倍的图像按因子 2 作下采样,生成尺寸为上一组图像尺寸 1/4 的图像作为第二组的初始图像,之后按照第一组高斯图像的构造方法生成第二组高斯图像。依次操作,构造

高斯金字塔。最后,将高斯金字塔中每组的相邻两层高斯图像作差生成差分高斯金字塔。

2.2 特征点检测与精确定位

在上述生成的图像的差分高斯金字塔尺度空间中,选取局部极大值和极小值的像素点作为图像的特征点。值得注意的是,像素点必须与其同尺度图像中的 3×3 邻域和上下相邻尺度图像的对应位置的 3×3 的邻域共 26 个像素点进行灰度值比较,如果为该邻域的极值点才会被选为图像的特征点。每张图像都会检测到成百上千的特征点。并且,为了保证检测到的极值点的稳定性和可靠性,需要剔除低对比度的特征点和边缘响应点。

2.3 特征点方向的计算

为了保证后续生成的特征点描述子的旋转不变性,利用特征点邻域像素的梯度分布特性来为图像中的每个特征点分配一个方向。

选取特征点所在尺度的高斯平滑图像上的半径为 $3 \times 1.5 \times \sigma$ (其中, σ 为特征点所在尺度) 的圆形邻域窗口,计算该窗口内的所有像素点的梯度幅度 $m(x, y)$ 和梯度方向 $\theta(x, y)$ 。计算公式如下:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (1)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right) \quad (2)$$

式中: $L(x, y)$ 为所选择的特征点所在的高斯平滑图像。然后,将像素点梯度方向的空间 $[0^\circ, 360^\circ]$ 均匀地划分为 36 个方向区间值。并且,特征点圆形窗口邻域内的所有像素点的梯度幅值都要经过高斯加权,表征不同距离的邻域像素点对中心特征点方向生成的贡献比重不同。加权过程计算如下:

$$m1(x, y) = G(x, y, \frac{3}{2}\sigma) \cdot m(x, y) \quad (3)$$

式中: $G(x, y, \frac{3}{2}\sigma)$ 为尺度因子为 $\frac{3}{2}\sigma$ 的高斯函数, σ 为特征点所在金字塔空间的尺度。之后,利用直方图统计该邻域内像素的对应不同梯度方向的梯度幅值累加值,生成梯度方向直方图。然后比较该直方图中 36 个方向对应的加权梯度幅值累加值,选择最大梯度累加值对应的方向作为特征点的主方向。并且,当存在另一个方向,其对应的梯度幅值累加值比其左右相邻的方向对应的梯度幅值累加值都要大,并且该值不低于主峰值(即主方向对应的加权梯度幅值累加值)能量的 80% (根据 Lowe 的建议) 时,则将该方向作为该特征点的辅方向。

2.4 特征点描述子生成

SIFT 算法为每个特征点生成了一个用于描述其局部梯度特征的多维特征向量来更详细、精确地描述特征点,使其具有更高的可分辨性,增强其对光照变化、视角变化、比较大的局部形状变化等的容忍性,提高特征点正确匹配

的概率。该多维特征向量被称为特征点描述子。

先将坐标轴旋转为特征点的方向以确保特征描述子的旋转不变性,然后计算以特征点为中心的 16×16 的邻域窗口内所有像素点的梯度模值和梯度方向,并将该区域划分为 4×4 个子区域,每个子区域生成一个 8 方向的梯度直方图(具体生成步骤参考 2.3 节),一共可以生成 16 个这样的梯度直方图,合计为 128 维的特征向量,即所求特征点描述子。

2.5 特征点搜索与匹配

在 SIFT 算法中, Lowe 将欧式距离作为特征向量间的相似性判定准则,采用的基于特征点的最近邻次近邻距离比的 BBF(Best Bin First)^[9-10] 搜索算法进行两幅图像间的特征匹配判定。

最近邻特征点被定义为参考图像中与待匹配图像所有特征点描述子向量之间欧氏距离最短的特征点^[11]。SIFT 算法利用 BBF 算法,在参考图像的特征点构建的 k-d 树上进行待检索图像特征点的二近邻(即最近邻和次近邻特征点)查找。然后,通过判断最近邻距离和次近邻距离的比值来判定一对特征点是否是匹配点。若比值小于设定阈值(通常设为 0.49),则认为查找到的最近邻特征点就是查询特征点的匹配点;反之,则查询特征点在参考图像中没有与之匹配的特征点。之后,遍历待检索图像中所有的特征点,为它们在 k-d 树上查找是否存在匹配点。而两张图像中的匹配点的数目用来判断两张图像的相似度。最后,参考图库中的所有图像,按其待检索图像间的匹配点数目进行排序,匹配点数目越多则图像的排名越靠前,图像与待检索图像的相似度越高。

3 本文改进算法详述

本文提出了一种利用特征点邻域的颜色直方图信息来对特征点进行二次匹配判定的改进 SIFT 算法。具体的算法步骤在下述章节中进行描述。

3.1 双尺度空间生成

在图像尺度空间生成之前,需将输入的图像转化为灰度图像和 HSV 颜色图像。然后,按照原始 SIFT 算法的图像尺度空间生成步骤,生成灰度图像的差分高斯金字塔尺度空间和 HSV 颜色图像的高斯金字塔尺度空间。

3.2 新特征点描述子生成

新的特征描述子的生成分为两步:传统 SIFT 特征点描述子的生成和特征点邻域颜色直方图特征描述子的生成。

1) 传统特征点描述子的生成

在灰度图像的差分高斯金字塔尺度空间中,按照原始 SIFT 算法中的步骤进行特征点的检测与精确定位,特征点方向的计算和特征点描述子的生成。并将生成的传统特征点描述子记为“128graySIFT”。

2) 36 维颜色直方图特征描述子的生成

根据特征点的尺度和位置信息,将在灰度图像尺度空

间中检测到的特征点映射到 HSV 彩色图像的高斯金字塔尺度空间中。然后,在 HSV 彩色图像的高斯金字塔尺度空间中,取以特征点为中心的 16×16 的邻域窗口作为特征点颜色直方图特征的提取区域。之后,将该邻域窗口区域内的像素点的 HSV 颜色空间根据人眼视觉模型的特点进行非均匀量化^[12-13]:色调 H 的取值 h 非均匀划分为 7 段,将饱和度 S 和亮度 V 的取值 s 和 v 在有效范围内分别非均匀划分为两段,并且最后用一个一维特征向量 L 来将 H, S, V 3 个分量的量化值整合划分到 $[0, 35]$ 的范围内。具体的量化公式如下:

$$L = \begin{cases} 0 & v \in [0, 0.2] \\ [(v - 0.2) \times 10] + 1 & s \in [0, 0.2] \text{ 且 } v \in [0.2, 0.8] \\ 7 & s \in [0, 0.2] \text{ 且 } v \in [0.8, 1] \\ 4H + 2S + V + 8 & s \in (0.2, 1] \text{ 且 } v \in (0.2, 1] \end{cases} \quad (4)$$

$$H = \begin{cases} 0 & h \in (330^\circ, 22^\circ] \\ 1 & h \in (22^\circ, 45^\circ] \\ 2 & h \in (45^\circ, 70^\circ] \\ 3 & h \in (70^\circ, 155^\circ] \\ 4 & h \in (155^\circ, 186^\circ] \\ 5 & h \in (186^\circ, 278^\circ] \\ 6 & h \in (278^\circ, 330^\circ] \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \begin{cases} 0 & s \in (0.2, 0.65] \\ 1 & s \in (0.65, 1] \end{cases} \quad (6)$$

$$V = \begin{cases} 0 & v \in (0.2, 0.7] \\ 1 & v \in (0.7, 1] \end{cases} \quad (7)$$

然后,在该非均匀量化的 HSV 颜色空间中,计算特征点邻域窗口范围内的 36 维颜色直方图。并且,在计算颜色直方图的过程中,仿照传统 SIFT 特征点描述子生成时的高斯加权过程,对特征点邻域窗口内的像素点进行高斯加权,来表征距离特征点越近的像素点对特征点邻域颜色信息的贡献越大;反之,贡献越小。具体的颜色直方图特征计算公式如下:

$$ColorHist = \{h[c_1], h[c_2], \dots, h[c_i], \dots, h[c_{36}]\} \quad (8)$$

$$h[c_i] = \frac{\sum_{(x,y) \in C_i} 1 \cdot G(x,y, \frac{3}{2}\sigma)}{\sum_{(x,y) \in P} 1 \cdot G(x,y, \frac{3}{2}\sigma)} \quad (9)$$

式中: c_i 表示图像中的第 i 种颜色, C_i 表示特征点邻域窗口中属于第 i 种颜色的像素点的集合, P 为特征点邻域窗口内的区域像素点的集合, (x, y) 为像素点的坐标, $G(x, y, \frac{3}{2}\sigma)$ 为尺度因子为 $\frac{3}{2}\sigma$ 的高斯加权函数, σ 为特征点所在金字塔空间的尺度。 $h[c_i]$ 表示颜色 i 在特征点邻域窗口区域中所占的比例。最终求得的加权归一化颜色直方图被称为“36Color”。通过描述 36 个颜色级在特征点邻域窗口中所占的比例,来直观地表示特征点邻域的颜色分

布特征。

最后,将得到的基于灰度图像的 128 维的传统特征点描述子和基于 HSV 彩色图像的 36 维颜色直方图特征描述子以串联的方式结合在一起,形成新的 164 维的特征描述子,记为“128graySIFT+36Color”。

3.3 特征点搜索和双匹配

本文改进算法的特征点搜索与匹配过程被分为两个步骤来实现:利用传统的特征点描述子,即 128graySIFT,进行图像间的高度相似特征点对的搜索和初步匹配判定。然后,利用特征点颜色信息,即 36Color,对初步匹配成功的候选特征点匹配对进行二次匹配判定。具体步骤描述如下:

1) 基于 128graySIFT 的特征点搜索与初次匹配

依照传统 SIFT 算法的特征点搜索与匹配步骤,利用传统特征点描述子来表示特征点,采用 BBF 搜索算法,为待检索图像中的特征点在参考图像特征点集中搜索其最近邻和次近邻特征点。采用特征点的最近邻距离和次近邻距离的比值判定方法来判定搜索到的最近邻特征点是否为查询特征点的匹配点,完成初次匹配判定。

2) 基于 36Color 的特征点二次匹配

对于在上一步骤中,被初次判定为特征点匹配对的特征点,须再次通过特征点的颜色特征,即 36Color,对两个特征点间的相似性进行二次判定。当两个特征点的 36Color 特征向量间相似度距离小于等于设定阈值(本文中该阈值用 τ 表示),则认为两个特征点的周围邻域的颜色特征相似度很高,两个特征点被最终确定为正确匹配的特征点对。反之,则认为两个特征点是错误匹配的特征点对。其中,36Color 特征向量间的相似性度量以直方图相交法^[14]为判定准则。公式如下:

$$D(A, B) = 1 - \sum_{i=1}^n \min(a_i, b_i) \quad (10)$$

式中: A, B 表示图像的颜色特征向量, a_i, b_i 表示颜色特征向量 A, B 中的具体归一化值。由公式(10)可知,36Color 特征向量间的距离度量取值范围为 $[0, 1]$ 。当取值为 0 时,说明两个特征点的 36Color 特征向量完全相同,两个特征点周围邻域颜色特征的相似度最高;当取值为 1 时,说明两个特征点的 36Color 特征向量完全不相同,两个特征点周围邻域颜色特征的相似度最低;其他取值,值越小,两个特征点间的相似度越高。

最后,按照上述搜索和双匹配步骤遍历待检索图像中所有的特征点,为它们在参考图像特征点构建的 $k-d$ 树上查找是否存在匹配点。两张图像间的正确特征点匹配对的数目被用来衡量两张图像的相似度。图像间特征点匹配对数目越多,则图像间的相似度越高。最终,数据库中的所有参考图像,按其待查询图像间的特征点匹配对数目进行相似度由高到低排序,排名靠前的图像作为图像检索的结果图像。

4 实验结果与分析

设计图像检索对比实验,验证本文改进算法的优越性。本文中提出的改进算法被称为“128graySIFT+36Color”。对比算法分别为:SIFT, HSV-SIFT 和 CSIFT。

考虑到数字出版社有版权图库的保密性,本文选用在 Oxford 图片库和 Zurich 建筑图片库^[15-16]基础上的拓展图库作为模拟图片库。该图库中有 6 000 张图片,主要分为两部分:一部分包含 30 种不同类别的图像及他们的不同种类的变形图像,如旋转变换、尺度变换、光照变换、仿射变换等;另一部分包含一些多种多样的其他图像,来丰富图像库的多样性。本文中,将 30 种不同类别的图像依次作为待检索图像,在模拟图库中进行图像检索实验。实验平台为 Windows XP, Intel (R) Core (TM) 2 Duo CPU, 3 GHz, 3.00 GB 内存的台式机;检索系统的实现环境为 Microsoft Visual Studio 2010。

4.1 检索性能评价方法

本文中,图像检索的性能由算法运行时间,查准率(Precision)和查全率(Recall)^[17]来评价。查全率和查准率的公式表述如下:

$$Precision = \frac{N_{result-similar}}{N_{result}} \quad (11)$$

$$Recall = \frac{N_{result-similar}}{N_{database-similar}} \quad (12)$$

式中: $N_{result-similar}$ 表示检索结果中与待检索图像相似的图像数目, N_{result} 表示检索结果中所有图像数目, $N_{database-similar}$ 表示检索图库中所有与待检索图像相似的图像数目。

如果算法的检索结果查全率和查准率均都比较高,并且检索过程相对耗时短,则认为该算法的检索性能比较好。

4.2 参数设置

如 3.3 节所述,二次匹配判定中阈值参数 τ 是影响图像特征点间的邻域颜色直方图特征相似性判定的重要因素。参数 τ 的取值直接影响到图像间的特征点匹配对数目,进而影响到图像检索结果的准确率。

因为两个特征点的向量间的颜色直方图相交距离恒小于等于 1,所以参数 τ 的取值范围为 $[0, 1]$ 。并且,在该取值范围内取值越小,匹配对二次判定越严苛,二次匹配成功的特征点对越大的概率成为真正符合人类视觉感知要求的正确匹配对。但是,随着参数 τ 值的减小,在剔除错误匹配特征点对的同时,也会错误剔除一些因为图像变形引起的特征距离变大的正确特征点匹配对。所以参数 τ 的取值不是越小越好,而是根据图像检索效果的整体情况而定。因此,为了设置参数 τ 的合适取值,本节中利用本文的改进算法进行图像检索实验。模拟图片库中一半的图像作为实验图库,15 种不同种类的图像被依次作为待检索图像在模拟的参考图像库中进行图像检索效果测试。最终,本文将参数 τ 的值设置为 0.35。

4.3 实验结果分析

如图1所示4种算法的查全率—查准率关系。众所周知,随着查准率的减小,查全率的值越大,表示检索结果中与待检索图像相似的图像越多,算法检索准确率越高。同时,当查全率开始趋于稳定时,查准率越大,表明检索结果中与待检索图像相似的图像排名越靠前,算法的检索性能越好。依此理论,评价4种算法的检索准确率。

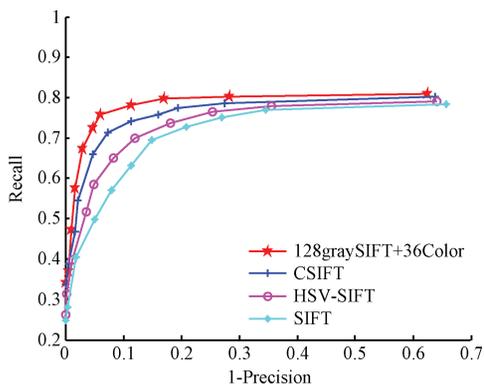


图1 4种算法的检索查全率和查准率关系

如图1所示,算法128graySIFT+36Color的综合检索效果要优于对比算法SIFT, HSV-SIFT和CSIFT。这说明,本文的改进算法是有价值的。它既保证了原始算法的检索准确度,又在此基础上引入颜色特征来增加图像特征的可区分性。新的特征描述子在图像匹配中表现出更强劲的生命力。

另外,表1显示了4种算法的平均运行时间的比较结果。在实际检索过程中,参考图库中6000张图像的特征提取可以离线进行,提取出的特征向量被保存到每张图像的数据库属性里,避免每次检索都重复提取参考图像的特征。这样检索的时间成本仅包含两部分,即待检索图像的特征提取时间和实时的待检索图像和参考图库中图像的匹配时间。如表1所示,与原始SIFT算法和CSIFT算法相比,本章改进算法128graySIFT+36Color的平均运行时间几乎与其持平。并且,与算法HSV-SIFT相比,本章改进算法的运行速度上有很大优势。这主要是因为本章改进算法提出的36维的特征点颜色直方图特征只是在特征点二次匹配判断时使用,且判断过程简单。它并没有影响原始SIFT算法中的特征点检测和特征搜索与匹配等重要过程。

表1 四种算法的平均运行时间比较结果

算法名称	每张图像的平均特征提取及表示时间/s	图像间的特征搜索与匹配时间/s
SIFT	1.204 6	3.027 8
HSV-SIFT	1.677 3	9.634 8
CSIFT	1.395 6	3.203 8
128graySIFT+36Color	1.525 8	3.151 4

综上所述,与SIFT, HSV-SIFT和CSIFT算法相比,本文提出的SIFT改进算法在查准率、查全率以及检索时间上综合效果最优。

5 结论

在本文中,提出了一种基于特征点颜色信息和双匹配策略的改进SIFT的图像检索算法。该改进算法创新性地利用特征点的邻域颜色特征来进行特征点二次匹配判定,提升了特征匹配的正确率。可靠的实验结果表明,与原始SIFT算法及其他类似算法相比,本文提出的改进算法的检索准确率和检索时间的综合衡量最优。但是,该改进算法仍存在着检索时间过长,不能满足工作实用性要求的缺点。在将来的工作中,将针对这一问题做进一步研究,如引入视觉词典模型对图像的SIFT特征点进行降维处理等。

参考文献

- [1] RASSEM T H, KHOO B E. Object class recognition using combination of color SIFT descriptors [C]. IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), 2011: 290-295.
- [2] XIAO P, CAI N, TANG B, et al. Efficient SIFT descriptor via color quantization [C]. IEEE International Conference on Consumer Electronics-China, 2014: 1-3.
- [3] ABDEL-HAKIM A E, FARAG A A. CSIFT: A SIFT descriptor with color invariant characteristics [C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006: 1978-1983.
- [4] AI D, HAN X, RUAN X, et al. Adaptive color independent components based sift descriptors for image classification [C]. 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2010: 2436-2439.
- [5] BO L, WHANGBO T K. A SIFT-Color Moments Descriptor for Object Recognition [C]. International Conference on IT Convergence and Security (IC-ITCS), 2014: 1-3.
- [6] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]. IEEE international conference on Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh 1999: 1150-1157.
- [7] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International journal of computer vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [8] 杨世沛, 陈杰, 周莉, 等. 一种基于SIFT的图像特征匹配方法 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 50-53.
- [9] FRIEDMAN J H, BENTLEY J L, FINKEL R A.

- An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time[J]. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 1977, 3(3): 209-226.
- [10] BEIS J S, LOWE D G. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997: 1000-1006.
- [11] 戚世贵, 戚素娟. 基于特征点的最近邻配准算法[J]. 许昌学院学报, 2008, 27(2): 67-71.
- [12] LEI Z, FUZONG L, BO Z. A CBIR method based on color-spatial feature[C]. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference TENCON 99, 1999: 166-169.
- [13] 程言志, 吕天阳, 王钰旋, 等. 基于表面属性颜色分布的三维模型检索[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1707-1713.
- [14] SWAIN M J, BALLARD D H. Color indexing[J]. International journal of computer vision, 1991, 7(1): 11-32.
- [15] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [16] SHAO H, SVOBODA T, VAN GOOL L. Zubud-zurich buildings database for image based recognition[J]. Computer Vision Lab, Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland, Tech. Rep, 2003(260): 20.
- [17] 张弘, 卢奕南. 基于内容的图像检索技术在医学领域中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(增刊2): 682-685.

作者简介

孙光民, 1960年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号与图像处理、神经网络与应用、人工智能与模式识别等。

E-mail: gmsun@bjut.edu.cn

王晨阳, 1990年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理与人工智能。

E-mail: cywang0913@sina.com

(上接第31页)

- [6] 李勇, 傅德民, 李焱明, 等. DBF天线的近场测量与模拟分析[J]. 电子测量技术, 2009, 32(5): 141-144.
- [7] 张书仙, 李璐, 潘点飞. 基于数字波束形成的多目标测控[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8): 73-77.
- [8] WANG W Q. Near-space wide-swath radar imaging with multiaperture antenna [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2009(8): 461-464.
- [9] 李世强. 高分辨率宽测绘带合成孔径雷达系统研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2004.
- [10] 李杨. 基于多波束和数字波束形成的星载合成孔径雷达系统及其信号处理研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2011.
- [11] 范强, 吕晓德, 张平, 等. 星载 SAR DPCMAB技术的方位向非均匀采样研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(1): 31-35.
- [12] 郜参观, 邓云凯, 冯锦, 等. 非均匀采样对偏置相位中心多波束 SAR性能影响的分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1305-1310.
- [13] BROWN J R, JOHN L. Multi-channel sampling of low-pass signals[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1981, 28(2): 101-106.
- [14] 梁波, 储彬彬, 郭泽成. SAR方位向非均匀采样频谱重构算法及误差分析[J]. 电子质量, 2010(2): 3-6.
- [15] 高玉凯, 王传英. 基于傅立叶分析的非均匀采样信号内插重构方法[J]. 齐齐哈尔大学学报: 自然科学版, 2011, 27(6): 29-32.

作者简介

郑保文(通讯作者), 1990年出生, 中国科学院大学电子学研究所电子与通信工程专业硕士研究生, 主要研究方向为多角度 SAR数据获取机制。

E-mail: zbwchuwen@126.com

林赞, 1983年出生, 助理研究员, 主要研究方向为合成孔径雷达三维成像技术。

洪文, 1968年出生, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理理论、合成孔径雷达成像算法、微波遥感图像理解及其应用等。