

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012
Vol.17 No.

4

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年4月 第17卷 第4期(总第192期)

目次

综述

图像分割中的模糊聚类方法 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨率重建中的应用 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

图像分析和识别

核空间散度阈值法 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测	王千,夏利民,谭论正(560)
利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度	朱新懿,耿国华,温超(568)

计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现	赵艳伟,程振林,董慧,方金云(575)
------------------------	---------------------

虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制	张兵强,张立民,张建廷(582)
----------------------------	------------------

遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法	杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)
自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪	杨萌,张弓(596)

第 18 届中国遥感大会征文通知	封 2
第 33 届亚洲遥感会议征文通知	封 2

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 4 期

2012 年 4 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
 中国图象图形学学会
 北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
 北京 9718 信箱 邮编 100101
 电子信箱:jig@irsa. ac. cn
 电话:010-68407995 010-82614429
 网 址:www. cjig. cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
 (中国国际书店)
 (北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
 CAS China Society of Image and Graphics
 Institute of Applied Physics and Computational
 Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
 of Journal of Image and Graphics
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
 E-mail: jig@irsa. ac. cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
 and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公益事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

- 论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;
 - 论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;
 - 论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;
 - 网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;
 - 会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。
- 会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>

与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

Contents

Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image
..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale
..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space
..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images
..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application
..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation
..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps
..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method
..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD
..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data
..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary
..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0530-07

论文引用格式: 刘雅蓉, 汪西莉. LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 530-536

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法

刘雅蓉, 汪西莉

陕西师范大学计算机科学学院, 西安 710062

摘要:提出一种在 LUV 空间中基于多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法。首先引入 LUV 色彩空间, 避免了 RGB 色彩空间中色彩辨别阈对分割的影响, 在纹理、边缘区域取得了更好的分割效果; 其次将谱聚类算法中基于多层次化结构的方法和基于 Nyström 采样的方法结合起来, 有效减少了运算时间、解决了数据量较大时计算过程中内存溢出的问题; 最后在 K 均值聚类中通过对特征间隙(eigengap)的分析, 自适应地选择 K 值的大小, 解决了自动确定聚类数目的问题。将提出的方法在 LUV 色彩空间和 RGB 色彩空间中分别进行图像分割实验, 结果表明在 LUV 色彩空间中取得效果更加理想。同时也将提出的算法与基于 Nyström 方法的谱聚类算法(spectral clustering-Nyström, SC-N)进行比较。实验结果表明, 该算法在数据运算量、运行时间和分割结果上都优于 SC-N 方法。

关键词:LUV 色彩空间; 多层次化结构 Nyström 方法; 自适应 K 均值算法; 谱聚类; 彩色图像分割

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space

Liu Yarong, Wang Xili

School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract: In this paper, we propose an adaptive spectral clustering algorithm based on the Nyström method with multi-level structures in LUV color space. First, we introduce the LUV color space, which can effectively avoid the influence of barely noticeable differences on the segmentation results, achieving better result in texture and edge regions. Second, we combine the spectral clustering algorithm based on multi-level structure and the Nyström method. Our approach can reduce the operation time and solve the problem of memory overflow. Finally, in K -means, through the analysis of the eigengap to adaptive select the value of K , this approach can automatically determine the number of clusters. The proposed method is applied to image segmentation, respectively, in LUV color space and RGB color space. The experimental results show that in LUV color space we can obtain even better results. The data computation and operation time as well as the segmentation result of the proposed algorithm are superior, compared to the spectral clustering algorithm based on the Nyström method (SC-N).

Key words: LUV color space; Nyström method with multi-level structure; adaptive K -means; spectral clustering; color image segmentation

收稿日期: 2011-04-21; 修回日期: 2011-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671133); 中央高校基本科研业务费专项资金(GK200902015)

第一作者简介: 刘雅蓉(1986—), 女, 现为陕西师范大学计算机科学学院计算机理论与专业硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。E-mail: grace1986111@163.com

0 引言

将物理或抽象对象的集合分成由类似的对象组成的多个类的过程被称为聚类。聚类是模式识别、数据挖掘等领域的重要研究内容,目前最常用的聚类算法是 K 均值算法,模糊 K 均值算法等^[1]。 K 均值方法建立在凸样本空间分布上,所以当样本空间为凸的时候,往往能够获得更好的结果,如若样本空间不为凸,聚类算法就会陷入局部最优。此时对样本空间的凹凸性并没有限制并且收敛于全局最优解的谱聚类算法的出现,有效地解决了这一问题:谱聚类算法不要求估计数据分布的明确的模型,它只是对点与点间的相似性矩阵进行谱分析^[2]。谱聚类算法的实质就是把高维空间映射到低维空间中去,并且获得了能够使同类分布更为紧致的新的数据表示。

然而谱聚类算法还没有较好的解决如何定义参数、如何定义相似性矩阵、如何处理大规模数据以及如何自动确定最终聚类个数等问题。在参数选择的问题上,NJW^[3]算法中提出了一种全局参数选择方法:计算由相似性矩阵构造的拉普拉斯矩阵的最大特征值所对应特征向量,对其进行 K 均值聚类,根据聚类结果判断是否使用此参数,该方法需要在多次实验的基础上进行人工调整才能获得最优解。2004年,Zelnik-Manor 和 Perona 提出了一种为每一个样本点选择一个尺度参数的“Local scaling”思想^[4],称为 Self-Tuning 谱聚类算法,这是一种局部参数选择方法,并且在高维数据上的实验表现突出。2009年,卜德云等人^[5]提出一种参数选择方法:给定 n 个备选参数,获得 n 个不同的拉普拉斯矩阵,然后利用迭代的方法求解出一个新的拉普拉斯矩阵,对其进行特征值分解及 K 均值聚类,并在 UCI 数据集上获得了较好的聚类结果,但是这种参数选择方法应用在图像分割中,运算量较大,并且运算时间长。相似性矩阵的构造依赖于两个样本间的相似程度,最终使得相近的样本间相似性更高,而相异样本间的相似性更低,近年来,有学者提出不使用高斯核函数计算相似性的方法,这些方法通过求 n 个二次规划问题来求得相似性矩阵,从而降低了谱聚类算法对参数的敏感程度^[6-7]。谱聚类算法需要计算相似性矩阵的特征向量和特征值,当数据量过大时,不但运算时间长,还会引发内存溢出的问题,由此

Fowlkes 等人提出 Nyström 方法^[8]:通过采样点之间的相似性矩阵和采样点与未采样点之间的相似性矩阵来近似原相似性矩阵,然后利用该近似相似性矩阵的特征向量来近似原相似性矩阵的特征向量,即基于 Nyström 方法的谱聚类算法(SC-N)。这一方法的提出,降低了谱聚类算法的运算时间,在一定程度上解决了内存溢出,但是随着图像分辨率的增大,运算时间过长,依然可能会引发内存溢出的问题,即便没有发生内存溢出,最终的分割结果也不理想。

本文在经典谱聚类方法 Neut 算法^[9]基础上,提出一种在 LUV 色彩空间中基于多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法。首先引入 LUV 色彩空间,建立了与人的视觉统一的色彩空间。在 LUV 色彩空间中,对边缘、纹理区域的分割优势明显,有效地提高了图像的分割精度;其次与基于 Nyström 方法的谱聚类算法相比,因为采用多层次化结构对图像进行分割,相似性矩阵规模减小,使得运算的时间更短,进一步解决了当数据量过大时内存溢出的问题,同时由于相似性矩阵规模减小,从而在 Nyström 过程中,对相似性矩阵的近似更加准确,提高了分割的精度;最后,在进行 K 均值聚类的时候,本文采用自适应方法选择最终分类个数,有效减少了人工的干预。根据本文提出的方法,对较大规模的彩色图像进行分割时,取得的结果明显优于在 RGB 色彩空间中对图像进行分割取得的结果,同时也优于 SC-N 谱聚类算法分割图像的结果,并且在运算时间上优于 SC-N 谱聚类算法。

1 色彩空间的转换

RGB 色彩空间是非线性的,3 个分量之间有很强的相关性,并且由于色彩辨别阈(just noticeable difference)的存在,使得在 RGB 色彩空间上处理彩色图像很不方便。Coquin 等人发现在图像处理中,LUV 色彩空间(全称 CIE1976(L^*, u^*, v^*))优于 RGB 色彩空间^[10]。LUV 色彩空间的目的是建立与人的视觉统一的色彩空间,具备一致性和均一性且各色彩分量之间不相关,因此它被广泛应用于计算机彩色图像处理领域,并获得了较好的效果^[11-12]。

LUV 色彩空间中, L^* 表示亮度, U^* 和 V^* 表示色度坐标。对于一般的图像, L^* 的取值范围为 0 到 100, U^* 和 V^* 的取值范围为 -100 到 +100。使用欧氏距离,不同颜色的色距定义为

$$D = \sqrt{(L_a - L_b)^2 + (U_a - U_b)^2 + (V_a - V_b)^2} \quad (1)$$

它的计算公式可以由 CIEXYZ 通过非线性计算得到

$$L^* = \begin{cases} 116(Y/Y_n)^{\frac{1}{3}} - 16 & Y/Y_n > (6/29) \\ (29/3)^3 (Y/Y_n) & Y/Y_n \leq (6/29)^3 \end{cases} \quad (2)$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (3)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (4)$$

式中, u'_n 和 v'_n 是色度坐标上定义的一个白色点。

$$u' = 4X/(X + 15Y + 3Z) \quad (5)$$

$$v' = 9Y/(X + 15Y + 3Z) \quad (6)$$

2 基于 Nyström 方法的谱聚类算法

2.1 谱聚类基本理论

谱聚类方法建立在图论中的谱图理论的基础上^[13]。在谱图理论中,以图像中的数据点为顶点 V ,以边 E 的权值 W 反映数据点之间的相似程度来构造一个无向加权图 $G = (V, E)$,数据点间的边权可以结合图像的空间、光谱、纹理等特征进行设置。此时对数据点的聚类问题就转化为了在图 G 上的图划分问题。为了实现 G 的最优划分,根据求解方式的不同,主要有两类划分方法:基于相似性矩阵的方法和基于谱向量的方法。基于相似性矩阵的方法直接利用图的相似性矩阵来完成图的划分,理论上可以实现对图的良好分割,但是求解图划分准则的最优解是一个 NP-hard 问题,因此这种方法只能使用 Minimum cut 等较为简单的划分准则,对于其进一步的应用有很大的局限性。而基于谱向量的方法先求解图的相似性矩阵或拉普拉斯矩阵的特征向量以获得谱向量,然后通过对谱向量的聚类来获得最终的图像划分,即谱聚类方法,它将求解图划分的最优解这一 NP-hard 问题转换为求解矩阵的广义特征值和特征向量的问题,从而能够很好的实现对 Normalize cut 等更优的划分准则的最优解的逼近。

2.2 Nyström 谱聚类算法

采用基于谱聚类的方法处理分辨率在 256×256 以上的图像时,会引发计算机内存溢出以及运算时间过长等问题,因此有学者提出了 Nyström 方法^[8]。

Nyström 方法通过采样点之间的相似性矩阵和采样点与未采样点之间的相似性矩阵来近似原相似性矩阵,然后利用该近似相似性矩阵的特征向量来近似原相似性矩阵的特征向量。即对 N 个数据点

进行采样,得到 n 个点,分别计算 n 个采样点之间的相似性矩阵 A 以及 n 个采样点与其余 $N - n$ 个未采样点之间的相似性矩阵 B, C 为 $N - n$ 个未采样点间的相似性矩阵,因此,原相似性矩阵可表示为

$$W = \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbf{R}^{(N-n) \times n}$, $C \in \mathbf{R}^{(N-n) \times (N-n)}$ 。

令 A 可对角化为 $A = UAU^T$, \bar{U} 表示 W 的特征向量的估计,则

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} U \\ B^T U A^{-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

\bar{U} 必须经过正交化才能使用。

本文中使用的是欧氏距离,因此 A 是正定的。令 $A^{1/2}$ 为对称且正定的矩阵 A 的平方根,定义 $S = A + A^{1/2} B B^T A^{-1/2}$,把 S 正交化为 $S = U_S A_S U_S^T$,则 \hat{W} 可正交化为

$$\hat{W} = V A V^T \quad (9)$$

式中, $V = \begin{bmatrix} A \\ B^T \end{bmatrix} A^{-1/2} U_S A_S^{-1/2}$ 。

此时 V 包含了所需要的主特征向量。经过变换^[8]后,将矩阵 V 的前 K 个特征向量存放在 $N \times K$ 的矩阵 E 中,则 E 中的行向量分别对应采样后的图像的像素点,此时使用 K 均值算法对 E 的行向量聚类,把采样后的元素还原到原来的位置就实现了对原图像的分割。

3 LUV 空间中基于多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类

3.1 基于多层次化结构的 Nyström 方法

采用谱聚类方法的彩色图像分割,其特征值的分解需要消耗大量的时间并且占用大量内存。目前针对这一问题所进行的研究主要分为两类:一类是基于 Nyström 思想的方法;另一类是建立在层次化结构基础上的方法。Nyström 方法能够降低运算的时间,但是随着图像分辨率的提高,还是会发生内存溢出的情况,而建立在多层次化结构基础上的方法,则会导致图像的轮廓和形状模糊,从而不利于后续的分割。

本文提出一种基于多层次化结构的 Nyström 方法,即先对图像进行均匀采样,当图像分辨率低于 300×300 的时候(处理分辨率在 2000×2000 以下的彩色图像,分辨率保持在 300×300 左右的时候,

能够较好保留图像的轮廓特征), 对此时的图像使用 Nyström 方法, 这样不仅保留了图像的轮廓特征也降低了运算的时间, 同时避免了内存溢出。

3.1.1 图像采样

对输入图像进行下采样的过程为: 沿着水平方向, 每隔一个像素采样一个点, 在竖直方向上同样每隔一个像素采样一个点。这样就得到了一个分辨率较小的图像, 但是此时的图像仍然保持了原始图像的轮廓。本文处理分辨率在 $2\,000 \times 2\,000$ 以下的彩色图像, 分辨率保持在 300×300 左右的时候, 能够较好保留图像的轮廓特征, 因此对于分辨率较大的图像, 应当按照需要进行若干次的下采样。

3.1.2 谱聚类参数的选择

选用 Zelnik-Manor 和 Perona 提出的局部参数选择方法^[4]: 即此时并不是为整个样本集 N 选择一个参数 σ , 而是为样本集中的每一个样本点 x_i 选择一个参数 σ_i :

$$\sigma_i = d(x_i, x_k) \quad (10)$$

式中, $d(x_i, x_k)$ 表示为点 x_i 和 x_k 间的欧氏距离, K 表示 x_i 的第 K 个近邻, 一般取 $K=7$ 时效果最佳^[4]。

3.1.3 相似性矩阵的构造

针对彩色图像的分割, 选用多个特征来构造相似性矩阵会得到更好的效果。因此这里选择了光谱和空间两个特征来构造相似性矩阵。光谱和空间特征分别对应参数 σ_c 和 σ_p , 因此相似性矩阵定义为

$$A = \exp(-d^2(x_{ei} - x_{ej})/2\sigma_{ci}\sigma_{cj} - d^2(x_{pi} - x_{pj})/2\sigma_{pi}\sigma_{pj}) \quad (11)$$

3.2 自适应 K 均值聚类

假设 n 阶相似性矩阵 A_n 包含 K 个簇, 将其特征值按照降序排列, 得到 $d_1 \geq d_2 \geq d_3 \geq \dots \geq d_n$, 如果 d_k 严格大于 d_{k+1} , 那么可以在 K 维子空间中近似表示这些超边^[14], d_k 与 d_{k+1} 间的差值称为特征间隙 (eigengap)^[15]。在理想状态下, 即 A_n 包含 K 个彼此分离的类, 并且 A_n 中的数据按照类别依次排列, 则 A_n 的前 K 个特征值都为 1, d_{k+1} 严格小于 1。因此最佳聚类个数的选取实质是选择能够实现对数据准确划分的最佳特征数^[16]。

在彩色图像中, 由像素点构成的相似性矩阵并非理想状态, 因此前 K 个特征值并非都为 1, 此时将特征值按照降序排列, d_k 与 d_{k+1} 的特征间隙越大, 得到的 K 维子空间就越稳定。由于随着特征值的减小, 其所对应的特征向量对聚类划分所起到的作用也

在减小, 当特征值减小到某一数值时, 其后的特征值所对应的特征向量对聚类的划分不再具有意义, 所以只用求出在 K 尽可能小的情况下, d_k 与 d_{k+1} 的特征间隙的极大值, 此时的 K 就是我们要求的聚类的个数。

3.3 图像的还原

在图像分割过程中, 由于使用了多层次结构的方法, 最终获得的是一个较小的分辨率上的分割图像, 因此还需将此时的图像还原到原始的分辨率上, 完成最终的图像分割结果。由于相邻点间具有相似性, 因此可以根据相邻点间的相似性原则对采样空间上的点进行还原。具体方法是: 按照取 4 邻域上的点的权重的 $1/2$, 取 8 邻域上的点的权重的 $1/4$ 来计算。根据采样层次的多少, 逐层还原。

本文算法分割分辨率在 $2\,000 \times 2\,000$ 以下的彩色图像, 最多对图像进行 3 次下采样, 在还原过程中, 按照上述方法, 能够有效改善直接对图像采取最近邻原则进行还原的过程中发生的锯齿状边缘情况, 取得理想的还原结果。

4 LUV 空间中基于多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法

本文算法如下:

1) 对具有 S 个点的图像进行若干次下采样 (具体下采样次数视图像的大小而定, 本文处理分辨率在 $2\,000 \times 2\,000$ 以下的彩色图像), 得到 N 个数据点, $Q = \{x_i\}_{i=1}^N$;

2) 对数据 Q 进行均匀采样 100 个点记为矩阵 A , 其余数据记为 C ;

3) 根据式 (1) — (6) 转换色彩空间;

4) 根据式 (10) 计算矩阵 A 的光谱局部尺度参数 σ_{cAi} 、空间局部尺度参数 σ_{pAi} , 矩阵 C 的光谱局部尺度参数 σ_{cBi} 、空间局部尺度参数 σ_{pBi} 。其中 c 表示光谱信息, p 表示空间信息, A 、 C 分别代表采样点矩阵和非采样点矩阵;

5) 根据式 (11) 构造采样点间的相似性矩阵 A_1 , 以及采样点和未采样点间的相似性矩阵 A_2 ;

6) 使用 Nyström 方法计算相似性矩阵的特征值和特征向量, 找出其前 K 个最大特征值所对应的特征向量 v_1, v_2, \dots, v_k , 然后构造矩阵 $V = [v_1, v_2, \dots, v_k] \in \mathbf{R}^{n \times k}$, 其中特征向量按列存储。 K 值根据 3.2 节中的方法确定;

7) 对 V 的行向量进行归一化, 记为 Y , $Y_{ij} =$

$$V_{ij} / \left(\sum_j V_{ij}^2 \right)^{1/2};$$

8) 把 Y 的每一行看作为空间 \mathbf{R}^K 中的一个点, 然后将这些点用 K 均值算法进行聚类;

9) 把原始的样本点 x_i 划分为第 j 聚类当且仅当采样矩阵的第 i 行被划分为第 j 聚类;

10) 将剩余的 $S - N$ 个数据点按照 3.3 节中的方法进行分类。

5 仿真实验及其结果

整个实验是在 Matlab7.0 的平台上进行仿真的。分辨率为 481×321 的图像来自 Berkeley 彩色图像库^[17]。电脑配置: Inter Core2 CPU, 1 G 内存。

使用本文算法, 分别在 RGB 色彩空间和 LUV 色彩空间对图像进行分割, 分割结果如图 1 所示。

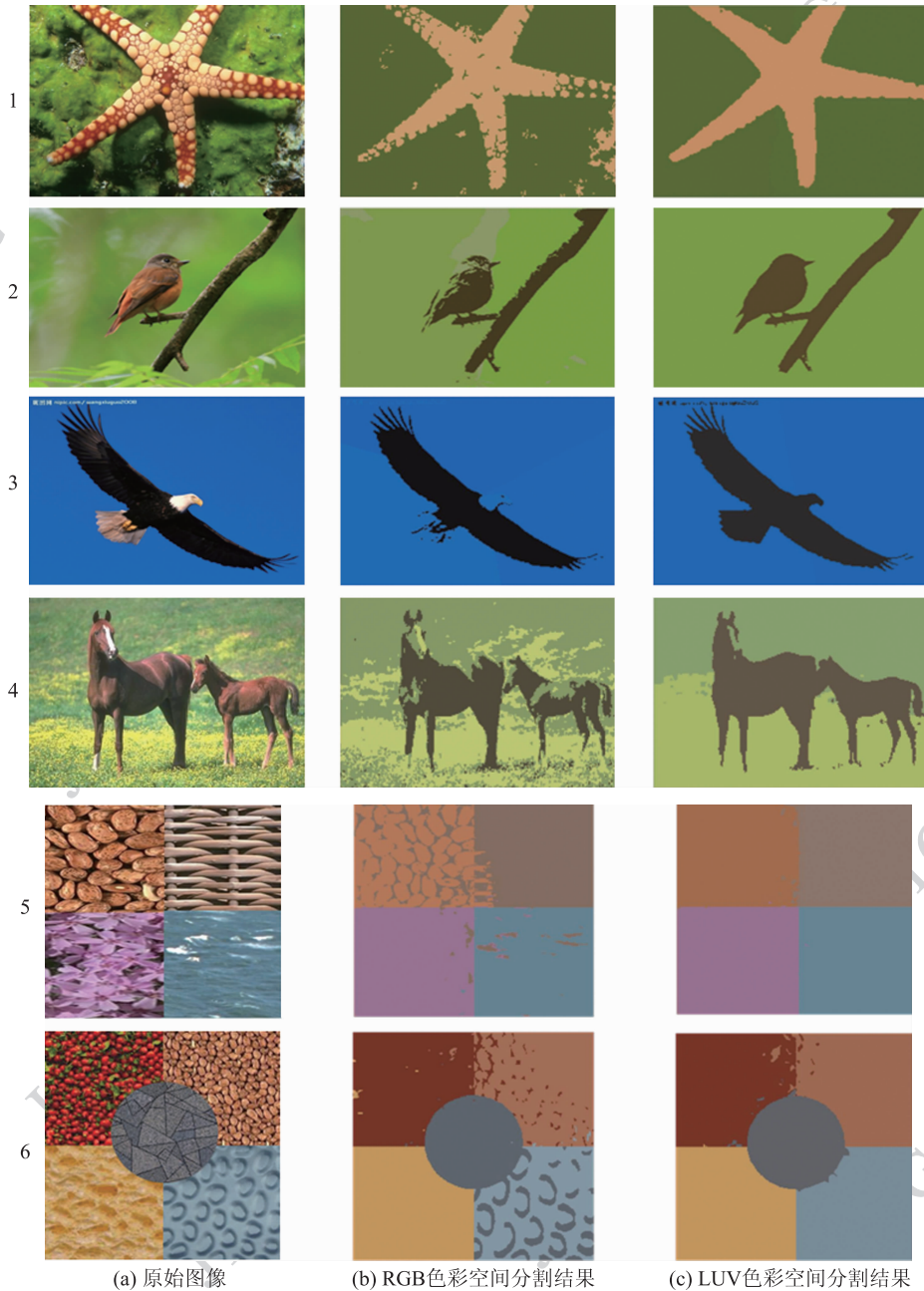


图1 使用本文提出的方法分别在 RGB 和 LUV 色彩空间中进行图像分割

Fig. 1 The proposed method were used in the RGB and LUV color space for image segmentation

由图 1 (c)1、2、4 看出, LUV 色彩空间对边缘部分的分割效果更好, 可以明显地看出在 LUV 色彩空间中得到的分割结果优于 RGB 色彩空间。从图 1 (b)3 中可以看出, 在 RGB 色彩空间中, 白色的区域较小, 没有成功的分割出来, 而这一点在图 1 (c)3, 即 LUV 色彩空间中却分割得非常好。

图 1(a)5、6 对纹理图像进行分割, 从图 1(b)5、6 中可以看出, 颜色相似却并不是同一类的点被错分为同类, 而从图 1(c)5、6 中可以看出, 由于各分量之间相互独立, 这一现象的发生明显减少, 进一步表明了本文方法在 LUV 色彩空间中分割图像的优势。聚类正确率见表 1。

表 1 本文方法分别在 RGB 空间和 LUV 空间中的聚类正确率
Table 1 The proposed method's clustering accuracy in RGB and LUV color space

图 1(a)	分辨率	本文方法在 RGB 空间中的聚类正确率/%	本文方法在 LUV 空间中的聚类正确率/%
5	512 × 512	92.82	99.47
6	400 × 400	92.4	99.01

使用自适应 K 均值聚类对合成纹理图 1 (a) 5、6 最终的聚类个数分别为 4、5, 与真实类别个数相同。其余彩色图像的聚类个数, 也与真实情况相符合。

将本文方法与基于 Nyström 方法的谱聚类(SC-N)方法做比较。SC-N 方法不对图像进行多层次化结构的处理, 因此处理的图像的大小非常有限, 并且 Nyström 过程中进行随机采样。在本文算法 Nyström 过程中, 采用均匀采样的方式, 如果随机采样, 会导致部分类别未被采样, 使得结果不准确并且不稳定。实验中 SC-N 方法的 K 均值聚类个数由人工给定。算法运行时间是从输入图像到最后完成图像还原整个过程的时间。结果见表 2。

表 2 本文方法与 SC-N 方法比较
Table 2 The proposed method compared with SC-N method

图 1(a)	分辨率	SC-N 方法运行时间/s	采样次数	本文方法运行时间/s
1	481 × 321	73	1	15
2	2 669 × 2 013	内存溢出	3	24
3	1 024 × 768	内存溢出	2	28
4	481 × 321	72	1	16
5	512 × 512	内存溢出	1	25
6	400 × 400	80	1	22

LUV 色彩空间中, 对图 2 (a) (对其余图像使用 SC-N 算法发生内存溢出, 无法做对照实验) 使用 SC-N 方法和本文方法的分割结果如图 2 所示。

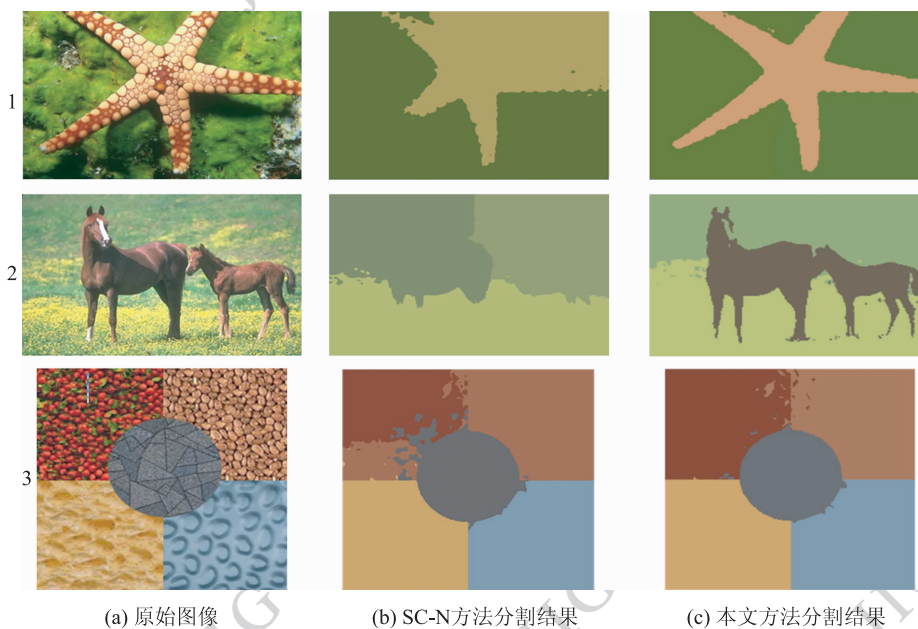


图 2 使用 SC-N 方法和本文方法分别对图像进行分割

Fig. 2 Using SC-N method and the proposed method to segmented the image

图 2 (a) 的分辨率均大于 300×300 , 对这 3 幅图像直接采用 SC-N 方法进行分割, 虽然不会发生内存溢出现象, 但是运算时间较长, 并且分割效果较差, 而采用本文方法则能获得理想的分割结果, 图 2 (a)3 的聚类正确率见表 3。这是由于本文使用 Nyström 方法需要对图像采样 100 个点, 如果不对图像进行多层次化结构的处理, 直接分割图像, 图像中的像素点太多, 采样的 100 个点可能无法包含图像中的所有类别信息^[7], 此时采样点间的相似性矩阵和采样点与非采样点间的相似性矩阵就不能很好地近似出原相似性矩阵。

表 3 LUV 色彩空间中 SC-N 方法的聚类正确率和本文方法的聚类正确率

Table 3 The clustering accuracy of SC-N method and the proposed method in LUV color space

图 2(a)	分辨率	SC-N 方法的 正确率/%	本文方法的 正确率/%
3	400×400	92.37	99.01

6 结 论

提出一种在 LUV 色彩空间中基于多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法, 对于分辨率在 $2\,000 \times 2\,000$ 以下的图像, 可以取得较好的分割结果, 有效改进了谱聚类算法在较大规模数据处理上的不足。本文算法在数据运算量上高于经典 Ncut 算法, 在分割效果、运行时间上也优于 SC-N 算法, 并且所有的参数都是自适应的选择, 具有较为广泛的适用性。虽然谱聚类算法的性能已经得到了很大的改善, 但是在处理海量数据和流数据等问题上, 还有待进一步的研究。

参考文献 (References)

[1] Bezdek C. Pattern Recognition With Fuzzy Objective Function Algorithms [M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1981.

[2] Ulrike L. A tutorial on spectral clustering [J]. Statistics and Computing, 2007, 17 (4): 395-416.

[3] Ng A Y, Jordan M I, Weiss Y. On spectral clustering: analysis and an algorithm [C] //Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems Cambridge: MIT Press, 2001, 14:849-856.

[4] Zelnik-manor L, Perona P. Self-tuning spectral clustering [C] // Proceedings of the Conference on Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2005: 1601-1608.

[5] Bo D Y, Zhang D Q. Adaptive spectral clustering algorithm [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(5):22-26. [卜德云, 张道强. 自适应谱聚类算法研究 [J]. 山东大学学报:工学版, 2009, 39(5):22-26.]

[6] Gong Y, Chen C. Locality spectral clustering [C] // Proc of the 21st Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence. Amsterdam Netherlands :ELSEVIER, 2008: 348-354.

[7] Wang F, Zhang C. Label propagation through linear neighborhoods [C] //Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning. Pennsylvania, 2006: 985-992.

[8] Fowlkes C, Belongie S, Chung F, et al. Spectral grouping us in the Nyström method [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(2):214-225.

[9] Shi J, Malik J. Normalized cuts and image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8):888-905.

[10] Coquin D B, Ionescu P B. Dissimilarity measures in color spaces [C] // Proc of 16th International Conference on Pattern Recognition. USA:IEEE, 2002, 1: 612-615.

[11] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5):564-577.

[12] David R M, Charless C F, Jitendra M. Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color, and texture cues [J]. IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(5): 530-548.

[13] Chung F R K. Spectral Graph Theory: CBMS Regional Conference Series in Mathematics [M]. NY: AMS Bookstore, 1997.

[14] Xu S, Lu Z M, Gu G C. Two spectral algorithms for ensembling document Clusters [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(7): 997-1002. [徐森, 卢志茂, 顾国昌. 解决文本聚类集成问题的两个谱算法 [J]. 自动化学报, 2009, 35(7): 997-1002.]

[15] Wu Z, Leahy R. An optimal graph theoretic approach to data clustering: theory and its application to image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15 (11):1101-1113.

[16] Zhong Q L, Cai Z X. Adaptive spectral clustering algorithm for color image segmentation [J]. Application Research of Computers, 2008, 25:3697-3699. [钟清流, 蔡自兴. 用于彩图分割的自适应谱聚类算法 [J] 计算机应用研究, 2008, 25: 3697-3699.]

[17] Fowlkes C, Martin D, Malik J. The Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark [EB/OL]. [2010-12-28]. <http://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/grouping/segbench/>.