

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 8
Vol.17 No.

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8月 第17卷 第8期(总第196期)

目次

综述

可计算图像美学研究进展 王伟凝, 蚁静斌, 贺前华(893)

图像处理和编码

利用混沌 PSO 或分解的 2 维 Tsallis 灰度熵阈值分割 吴一全, 吴诗嫻, 张晓杰(902)

H. 264 并行编码中负载平衡方法 侯兴松, 刘大齐, 盛凯, 赖玉洁(911)

提升细节捕捉能力的非下采样轮廓波变换 郭洪, 李雪军(919)

SVD 域的图像高斯噪声强度估计 柳薇(923)

图像扩散去噪模型的分析与改进 傅绪加, 刘峰, 王信松(934)

小波域最小嵌入失真函数设计及其在隐写中的应用 李军, 潘峰, 杨晓元, 刘镇(946)

图像分析和识别

抗压缩的照片图像与真实感计算机图形识别 张荣, 王让定(953)

云的自适应阈值检测方法 黄茜, 王少龙, 徐道磊, 廖婷婷(960)

煤矸区分中的间隔灰度压缩扩阶共生矩阵 于国防(966)

离群样本划分的半监督模糊学习策略 宋晓宁, 杨静宇, 杨习贝(971)

多相 Chan-Vese 模型的直接对偶方法 刘存良, 潘振宽, 郑永果, 王国栋, 丁洁玉(979)

利用梯度信息快速提取直线边缘特征 夏军营, 徐小泉, 熊九龙(987)

2 维双树复小波不确定度加权融合的人脸识别 王仕民,叶继华,邓涛,王明文(995)

图像理解和计算机视觉

流形学习与非线性回归结合的头部姿态估计 范进富,陈锻生(1002)

计算机图形学

角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配 曾接贤,刘秀朋,符祥(1011)

弹性二次曲面模型下的 3 维形状表现与平滑 郝世杰,蒋建国,郭艳蓉,詹曙(1021)

医学图像处理

主动学习的白细胞图像自动分割 崔凤,潘晨,吴向平,徐军(1029)

遥感图像处理

Bregman 交替迭代遥感图像复原方法 徐焕宇,孙权森,罗楠,夏德深(1035)

基于各向异性 Markov 随机场的遥感影像亚像元尺度建筑物提取 李晓冬,凌峰,杜耘(1042)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 8 期

2012 年 8 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:010-64807995 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

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 8 August 2012

Contents

Review

Review for computational image aesthetics Wang Weining, Yi Jingjian, He Qianhua (893)

Image Processing and Coding

- Two-dimensional Tsallis gray entropy image thresholding using chaotic particle swarm optimization or decomposition
..... Wu Yiquan, Wu Shihua, Zhang Xiaojie (902)
- Load balancing for H. 264 parallel encoding Hou Xingsong, Liu Daqi, Sheng Kai, Dun Yujie (911)
- Non-subsampled contourlet transform algorithm to promote detail information capturing ability Guo Hong, Li Xuejun (919)
- Gaussian noise level estimation in SVD domain for images Liu Wei (923)
- Analysis and improvement of image diffusion denoising models Fu Xujia, Liu Feng, Wang Xinsong (934)
- Design of minimizing embedding impact function in DWT domain and its applications in steganography
..... Li Jun, Pan Feng, Yang Xiaoyuan, Liu Zhen (946)

Image Analysis and Recognition

- Anti-compression approach to distinguishing photographic images and photorealistic computer graphics
..... Zhang Rong, Wang Rangeding (953)
- Adaptive threshold approach for night-sky cloud inspection Huang Qian, Wang Shaolong, Xu Daolei, Liao Tingting (960)
- Expanded order co-occurrence matrix to differentiate between coal and gangue based on interval grayscale compression
..... Yu Guofang (966)
- Semi-supervised fuzzy learning strategy by using a way of partitioning the outlier instances
..... Song Xiaoning, Yang Jingyu, Yang Xibei (971)
- Direct dual method of Chan-Vese model for multiphase segmentation
..... Liu Cunliang, Pan Zhenkuan, Zheng Yongguo, Wang Guodong, Ding Jieyu (979)
- Fast line edge feature extraction using image gradients Xia Junying, Xu Xiaoquan, Xiong Jiulong (987)
- Two-dimensional dual-tree complex wavelet transform uncertainty weighted fusion in face recognition
..... Wang Shimin, Ye Jihua, Deng Tao, Wang Mingwen (995)

Image Understanding and Computer Vision

Combining manifold learning and nonlinear regression for head pose estimation Fan Jinfu, Chen Duansheng (1002)

Computer Graphics

- Representation and matching for planar curve based on corner distance matrix and concentric circles
..... Zeng Jiexian, Liu Xiupeng, Fu Xiang (1011)
- Three-dimensional shape representation and smoothing with elastic quadratic patch model
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu (1021)

Medical Image Processing

White blood cell image segmentation based on active learning Cui Feng, Pan Chen, Wu Xiangping, Xu Jun (1029)

Remote Sensing Image Processing

- Bregman alternating iterative method for remote sensing image restoration Xu Huanyu, Sun Quansen, Luo Nan, Xia Deshen (1035)
- Building extraction at the sub-pixel scale from remotely sensed images based on anisotropic Markov random field
..... Li Xiaodong, Ling Feng, Du Yun (1042)

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)08-0960-06

论文引用格式: 黄茜, 王少龙, 徐道磊, 廖婷婷. 云的自适应阈值检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(8): 960-965.

云的自适应阈值检测方法

黄茜, 王少龙, 徐道磊, 廖婷婷

华南理工大学电子与信息学院, 广州 510641

摘要: 为确保夜间自动拍摄的星空观测图像不受云污染, 须对低亮度和对比度不均的夜空图像进行检测。考虑现有云检测不准和检测精度低等问题, 文中对大量样本统计分析, 发现星体邻域出现云的概率低, 密集星体区域出现云的概率也低。根据先验概率建立了一个自适应阈值模型, 即不同图像所用阈值由模型根据星云局部背景自动计算调节。通过随机抽取以月为周期的一系列星空图像, 分析其天空背景, 证明该自适应阈值的变化与整体图像背景灰度的变化趋势相吻合。实验结果表明本文方法对夜空云检测准确度达95%以上, 较文中对比的算法有很大提高, 并投入实际应用。

关键词: 云检测; 先验知识; 自适应; 阈值

Adaptive threshold approach for night-sky cloud inspection

Huang Qian, Wang Shaolong, Xu Daolei, Liao Tingting

School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract: For auto mated interpretation of star sky images of low luminance and uneven contrast, it is necessary to ensure that the images are not corrupted with clouds. In this paper, we evaluate the problem of low precision and low accuracy of cloud inspection and cloud amount estimation. It is found that there is a low probability of cloud appearance around bright stars as well as in dense fields of stars following statistical analysis of a large number of star sky samples. An adaptive threshold segmentation model of the cloud is established based on a-priori knowledge after analysis of the priori probability. The thresholds applied to different images are adaptively tuned in the present model according to the local backgrounds of stars in an image. By randomly extracting one month period of star images and analyzing their backgrounds, it is verified that the variation of the adaptive thresholds are in accordance with the tendency of a sequence of images in which the gray value of the entire image background changes. Experimental results show that the accuracy of the proposed algorithm has reached up to ninety-five percent or more, a great improvement compared to the traditional algorithm. The proposed algorithm has also been put into practical use.

Key words: cloud inspection; priori-knowledge; adaptive; threshold

0 引言

云的分类分析识别渗透在气象和天文等遥感工程研究领域, 与日常生活密切相关, 例如地气辐射平衡、气候模式分析、天气预报、飞行安全甚至低云时

的交通安全以及天文观测等等。云自动识别包括云点识别、云状识别、云量计算和云底高计算。云点识别是基本的工作。目前的测云仪大部分采用 CCD 镜头获取天空图像, 利用可见光波段即红蓝波段的灰度值或辐射亮度, 以及由于可见光波段云的散射与波长的关系不明显而使云成白色的现象, 采用阈

收稿日期: 2011-11-11; 修回日期: 2012-03-20

基金项目: 广州市科技计划项目(2010RH-P0016B)

第一作者简介: 黄茜(1966—), 女, 副教授, 2005年于华南理工大学获计算机应用技术专业博士学位, 主要研究方向为智能信息处理及应用、图像处理、模式识别等。E-mail: eequang@scut.edu.cn

值判别法识别和分割云点。云点识别技术方法目前可大致分 3 类:第 1 类是物理法,利用红外辐射仪器获取图像,采用辐射传输模式计算分割阈值,如 Smith^[1] 利用天顶角和云透射率有关的阈值表达式分割云点;第 2 类为背景法,基于对天空背景分析建立阈值,如 Shields 等人^[2] 采用固定的红蓝对比阈值,不考虑天顶角变化;Yamashita 等人^[3] 提出用天空指数来表述天空图像,根据固定指数判别晴空与云点;Souza-echer 等人^[4] 则利用天空色彩的色调、亮度和饱和度(HIS 域)采用平行六面体识别云点;第 3 类则针对上述方法普遍存在的云点识别不太准确问题,研究自适应阈值方法,如杨等人在 Otsu 全局阈值的基础上用插值法获得局部阈值^[5] 的方法,以及采用计算复杂度较高的遗传算法^[6]、联合神经网络^[7] 等方法进行云点分类识别,或辅之以模糊纹理特征分类的阈值方法等^[8]。此外,从分割的角度看,云检测可用模糊 C 均值(FCM)聚类算法^[9] 以及 Kass^[10] 提出的主动轮廓模型实现,Zhang^[11] 结合了边界和区域两种模型,提出一种新的轮廓模型,但是该方法需要选取初始轮廓,确定合适的能量函数和收敛条件。文献[12]提出了一种改进的图谱理论阈值分割法,改进了算法中的权值计算。上述方法均有应用针对性,特别是固定阈值法,由于同时受到星体、云层位置以及稀薄程度多变性的影响,很难对大量不同图像取得好的云分割效果。文献[13]对全天空日间测云技术现状做了系统的综述。

夜晚的星空图像背景受大气污染、月光以及黄道带光(zodiacal light)等的影响,不断变化,固定阈值法显然无法适用不同时间和日期的云检测。提出的自适应阈值方法是在统计分析了大量星空图像后,建立了一种基于星体和其背景的先验概率和可信度阈值分割模型,对夜晚星空图像进行星云分割。针对自动望远镜获取的观星图像,提出夜空图像的云检测算法,自动过滤系统保存的图像,确保系统自动存储的每幅图像都不存在云雾遮挡。

1 星体目标识别与提取

1.1 星体信号特征

天文望远镜主要拍摄夜晚的星图,其中光学 CCD 镜头拍摄的星空图中发光的星体,类似点光源,具有如下 3 个特征,即近似无穷远、微弱光并带有一定光谱特性。单个星体在 CCD 镜头拍摄到的

图像视场中一般约为 5~12 个像素大小。星体邻域的能量具有对称性,且呈近似高斯分布。单星体的灰度分布是关于光学系统和图像平面结构构成的光学点扩散函数。星体越亮,对应星体位置的点扩散函数的中心灰度的尖峰值越高。

1.2 星体目标识别和提取

设计星体识别和提取程序,具体步骤为

1) 图像去噪,用 3×3 中值滤波去噪。

2) Tophat 变换,为保留图像中那些略高于邻近点的孤立点,采用 Tophat 变换,即从原图 $f(x, y)$ 中减去开运算后的图像

$$\text{Tophat}(f) = f - (f \circ g) \quad (1)$$

式中, \circ 为开运算算子。

3) 二值化,对式(1)结果图二值化

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) > E \\ 0 & f(x, y) \leq E \end{cases} \quad (2)$$

由于 Tophat 变换后保留了大量孤立点,这些点与变换后的背景存在灰度差,取适当阈值可将其分离出来,经大量实验后确定取值 14 进行二值化分离。图 1(b) 是经上述步骤处理后得到孤立点,与原图 1(a) 比较,看出图 1(b) 中除星体外还包含很多噪声点。

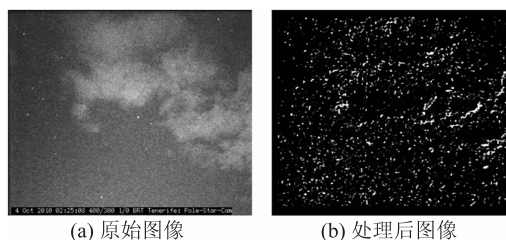


图 1 原始与处理后的图像

Fig. 1 Original and processed images

4) 基于面积的伪星点去除

星体的面积一般为 5~12 个像素。将连通区域内面积的像素点大于 12 或小于 5 个像素点作伪目标去除。

5) 基于辨差阈的伪星点去除

为去除其他伪星体,通过视觉生理学的辨差阈在原图上进行处理。生物视觉神经系统的明暗对比感知分辨实验表明,在均匀背景光 L 中央附加一簇刺激的光亮 ΔL 的目标,能够察觉的最小亮度差 ΔL 与背景强度 L 成正比。若满足对比度大于辨差阈,视觉系统可以感知目标。

$$\frac{O_i - B_i}{B_i} > \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

式中, O_i 为星体的平均灰度, B_i 为其局部背景的平均灰度, 见图 2, 方框中 O_i 对应原图框中的星体, 其灰色外环为星体向外扩一定距离形成该星体的外环区域, 定义为该星体的局部背景区域。文中考虑既要使局部背景反映该星体的背景情况, 星体间又不互相影响, 选择距离参数为 5 个像素。将满足式(3)的目标点判为星体, 其他作为伪目标去除。

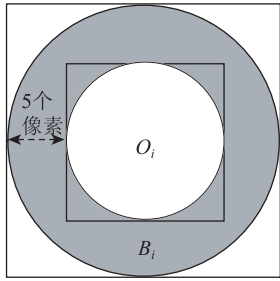


图 2 基于局部对比的检测
Fig. 2 Inspection by local contrasting

1.3 星空图像星云分布特征分析

分析大量星空图像发现, 夜晚星云之间存在着以下先验知识:

- 1) 星体的邻域出现云的概率低;
- 2) 星体越密集, 有云的概率越低。

图像样本来自英国 Bradford 天文望远镜^[14] 近两年拍摄的图像, 随机选取其中 468 幅, 人工剔除了受外界光源干扰太多的图像。用上述算法识别和提取了 1 500 多个星体。

设星体周围出现云的概率为 P_i , 输入图像为 $f(x, y)$, 提取的星体数为 n , 图像中天空背景的最低灰度值为 Min , 定义第 i 颗星体周围是云的概率为

$$P_i = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ \frac{B_i - Min}{B_i + Min} & n > 0 \end{cases} \quad (4)$$

当 $n = 0$ 时, 即没有星体, 云层覆盖天空, 这时云出现的概率 $P_i = 1$ 。当星体局部背景的平均灰度接近天空最低灰度值, 即 P_i 接近 0 时, 星体周围没有其他较亮物体, 说明云出现的概率很低。

对实验的 468 幅图像的星体提取结果进行统计分析, 发现约有 82.53% 以上的星体外环局部背景出现云的概率是在 20% 以下, 如图 3 所示, 纵坐标为星体数, 横坐标是星体周边出现云的概率, 曲线为对应的星体数累计概率, 该结果直观地给出了星云分布的先验概率, 符合星云分布第 1 条先验特征。

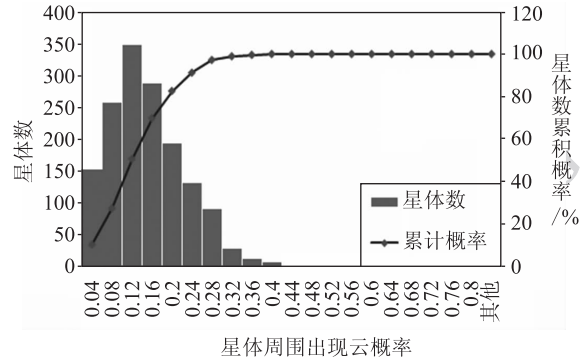


图 3 概率直方图
Fig. 3 Probability histogram

由于星体周围出现云的概率小。将各星体周边出现云的概率看成独立事件, 假设在某一区域检测到 n 颗星体, 各星体周围出现云的事件是 n 个独立事件 A_1, \dots, A_n , 概率分别是 $P(A_i) (i = 1, \dots, n)$, 则该区域出现云的概率为

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1) \times P(A_2) \times \dots \times P(A_n) \quad (5)$$

由于独立事件 A_1, A_2, \dots, A_n 发生的概率 $P(A_i) \in [0, 1]$, 则 $P(A_1 A_2 \dots A_n)$ 小于等于 $P(A_i)$, 即说明在某一区域检测的星体越多出现云的概率也越低。

2 单阈值云检测

2.1 夜空背景灰度的估算

基于星体局部背景的云的先验概率, 对夜空背景灰度值进行估算, 即

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \Gamma_i B_i}{\sum_{i=1}^n \Gamma_i} \quad (6)$$

定义 Γ_i 为第 i 颗星的局部背景灰度为夜空背景灰度值的估算提供的可信度, 有 $0 \leq \Gamma_i \leq 1$ 。从式(6)看出, 星体的 Γ_i 值即为该星局部背景 B_i 的权重, 它由每颗星的局部环境所决定。

2.2 星体局部背景的可信度

由分析知, 影响可信度 Γ_i 的因素有两方面:

- 1) 星体的灰度值与星体局部背景的平均灰度值 B_i 的差别。差值越大, 即星体与其局部背景对比度大, 该星看起来就越亮, 出现云的概率也越小。则该星的背景灰度对夜空背景灰度的估算影响较大。
- 2) 星体越密集, 间距越短, 云越少, 即较小的星体距离和将使 Γ_i 取较大值。这里用 $\sum_j L_{ij} (j = 1, \dots, n \text{ 且 } j \neq i)$

$j \neq i$)来表示第 i 颗星到其他星体之间的欧氏距离之和。

因此,建立计算可信度

$$\Gamma_i = k \frac{O_i - B_i}{255} + (1 - k) \left(1 - \frac{\sum_j L_{ij}}{(n - 1)L} \right) \quad (7)$$

式中, L 为光学摄像头采集的图像的对角线长度, $k \in [0, 1]$ 为加权系数。权系数 k 调节局部背景和星体间距离两个因素可信度 Γ_i 影响程度。经过多次试验后, k 取 0.6 较合适。

2.3 云分割阈值

式(6)给出的夜空背景灰度的估算值 T 介于最小的星体局部背景平均灰度和最大局部背景平均灰度值之间,实际的分割阈值通常要比星体的局部背景平均灰度值略高才能准确分割云,因此在式(6)上加一个分割因子 ΔT ,有

$$T' = T + \Delta T \quad (8)$$

ΔT 取值略高于背景估计值 T ,不宜取得过大,通常 ΔT 可取值 5,表示阈值将比各不同图像的背景估计值高 5 个灰度等级。

2.4 算法实现步骤

云检测算法步骤如下:

1) 输入的星空图 $f(x, y)$, 提取星体;

2) 获取每个星体的中心坐标

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{1}{N} \sum x_i, \\ y_c &= \frac{1}{N} \sum y_i \end{aligned} \quad (9)$$

式中, (x_i, y_i) 为星体区域的横纵坐标, N 为星体域内的像素个数;

3) 对每个星体进行局部背景估算,得到图像中各个星体的局部背景的平均灰度值 $B_i (i \in 1, \dots, n)$;

4) 计算星体 $i (i \in 1, \dots, n)$ 到其他星体间的欧氏距离之和,根据式(7)求出各星体对背景的可信度 $\Gamma_i (i \in 1, \dots, n)$;

5) 将权重系数 $k = 0.6$, 分割因子 $\Delta T = 5$ 代入,得到阈值 $T' = T + \Delta T$ 。

3 检测结果与数据验证

3.1 检测结果分析

对多幅不同的星空图进行检测对比。检测的结果如图 4 所示。

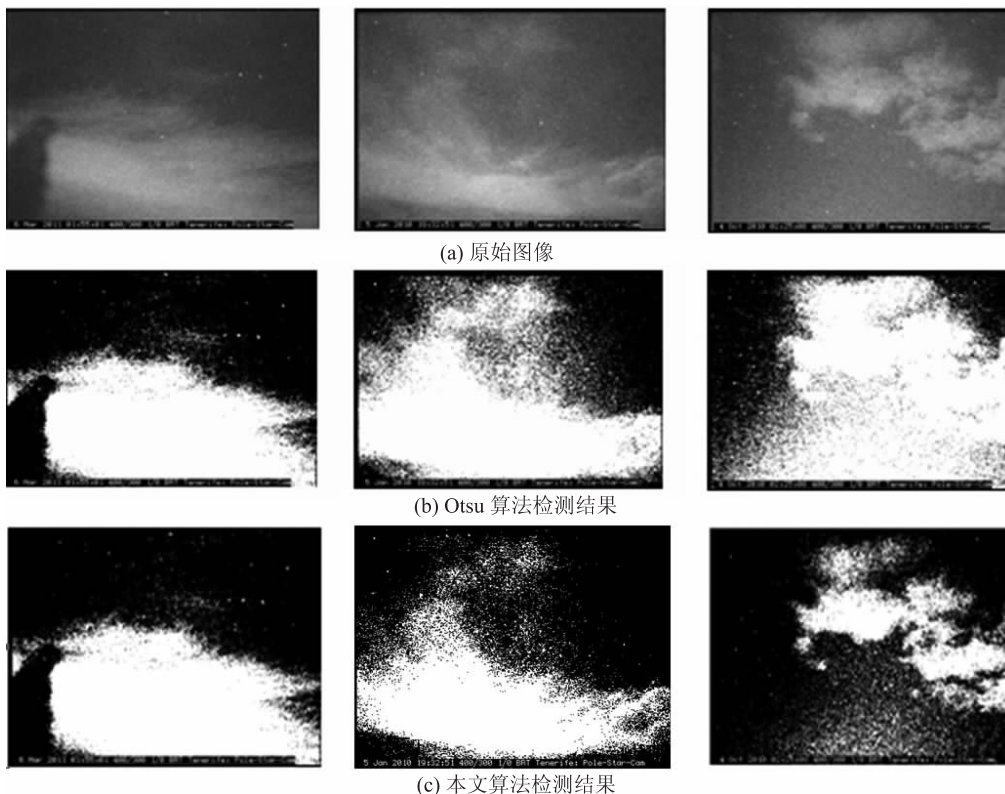


图 4 Otsu 算法和本文算法的检测结果对比
Fig. 4 The segmentation result comparison between Otsu algorithm and this proposed algorithm

从检测的效果对比发现,无论星空图灰度值分布均匀与否,论文提出的基于局部背景信息的先验统计算法都能获得良好的效果。虽然,Otsu 算法在光照均匀的情况下也能获得比较理想的结果,但是,它在光照不均匀或者在云层稀疏、厚薄不均的场景下,检测精度不高,见图 4(b) 右边两幅图。提出的阈值模型与星体的局部背景信息相关联,且星体呈离散分布,遇到光照不均的局部区域,阈值也能一定程度上反映该区域的灰度不均。因此,即使光学摄像头成像系统受外部光源干扰,例如黄道带光,即由尘埃对太阳光的散射而在黄道面上形成的银白色光锥,通常比较微弱,见图 4(a) 中右图底部所示略微偏白的部分。本文算法仍能取得良好的效果。

目前,该算法已经成功地在英国 Bradford 大学的 Bradford Robotic Telescope^[14] 全自动天文台系统中运用。

3.2 算法数据验证

不同的夜晚,以及一夜间不同时刻,作为背景的天空并非保持相同灰度不变,为验证算法的合理性和可靠性,在一个夜晚用光学摄像头对星空以每 5 min 为一间隔进行连续拍摄,得到从晚上 8 点到早晨 6 点的时间序列图像,用本文算法的阈值公式算出一系列阈值,如图 5 中实线所示,将对应的同时刻没有云的理想天空背景的平均灰度值与之对比,X 轴即表示从晚上 8 点到早晨 6 点以 5 min 为间隔的观测时间点。

为了合理计算背景变化趋势,对连续一个月的夜晚采样,将一月中同一时刻得到的无云背景求平均值,如图 5 中虚线所示。从数据的对比看,理想天空的灰度值和本文算法求出的阈值曲线趋势一致,分割模型的计算值的自适应变化情况符合实际应用中的现实情况,因此本文算法的云分割效果也较好。

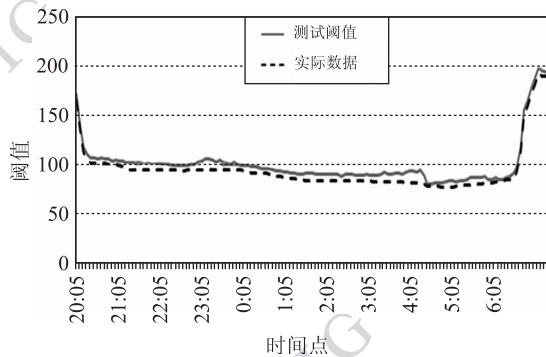


图 5 算法阈值与天空背景数据比较

Fig. 5 Threshold algorithm compared with the sky background data

4 结 论

根据夜空星云存在的客观实际探讨了一种新的检测云的方法,且比较了不同方法的检测效果。实验结果表明,与传统 Otsu 检测算法相比,本文算法在检测星空云的精度有很大的提高,并且对光照不均的星空云检测也有明显的效果。但识别一些形态多变和稀薄云时,其精度仍有待进一步提高。考虑到天空云图的复杂性,到目前为止仍没有一种方法能对各种环境下的云获得理想的检测识别效果,云检测将仍然是吸引研究者们深入探讨的研究课题。

参考文献 (References)

- [1] Smith S, Toumi R. Measuring cloud cover and brightness temperature with a ground based thermal infrared camera [J]. *Journal of Applied Meteorol Climital*, 2008, 47(2): 683-693.
- [2] Shields J E, Johnson R W, Karr M E, et al. Daylight visible / NIR whole sky imagers for cloud and radiance monitoring in support of UV research programs [C] // *Proceedings of SPIE*, San Diego, USA: SPIE Press, 2003, 5156: 155-166.
- [3] Yamashit A M, Yoshimura M, Nakashizuka T. Cloud cover estimation using multitemporal hemisphere imageries [C] // *Proceedings of 7th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS04)*. Istanbul Turkey: ISPRS Congress, 2004: 818-821.
- [4] Souza-echer M P, Pereir A E B, Bins L S, et al. A simple method for the assessment of the cloud cover state in high latitude regions by a ground based digital camera [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2006, 23(3): 437-447.
- [5] Yang J, Lv W T, Ma Y, et al. An automatic ground-based cloud detection method based on the local threshold interpolation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(6): 1007-1017. [杨俊, 吕伟涛, 马颖, 等. 基于局部阈值插值的地基云自动检测方法[J]. *气象学报*, 2010, 68(6): 1007-1017.]
- [6] Cazorla A, Olmo F J, Alados A L. Development of a sky imager for cloud cover assessment [J]. *J Opt Soc Am A*, 2008, 25(1): 29-39.
- [7] Linfoot A, Alliss R J. A cloud detection algorithm applied to a whole sky imager instrument using neural networks [C] // *Proceedings of the 19th Conf. on Probability and Statistics Sixth Conf. on Artificial Intelligence Applications to Environmental Science*, New Orleans. LA: AMS, 2008: 760-773.
- [8] Sun X J, Liu L, Gao T C, et al. Cloud classification of the whole sky infrared image based on the fuzzy uncertainty texture spectrum [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(2): 157-163. [孙学金, 刘磊, 高太长, 等. 基于模糊纹理光谱的全天空

- 红外图像云分类[J].应用气象学报,2009,20(2):157-163.]
- [9] Wang J Z, Kong J, Lu Y H, et al. A modified FCM algorithm for MRI brain image segmentation using both local and non-local spatial constraints[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2008, 32(8):685-698.
- [10] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snake: active contour models [J]. International Journal of Computer Vision, 1987, 1(4): 321-331.
- [11] Zhang K H, Song H H, Zhang L. Active contours with selective local or global segmentation: a new formulation and level set method [J]. Journal of Image and Vision Computing, 2010, 28(4):668-676.
- [12] Zhang Y, Wang R G, Wu H, et al. Improved image threshold method based on graph spectral theory [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(6):960-967. [张勇, 汪荣贵, 吴昊, 等. 改进的图谱理论阈值分割方法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6):960-967.]
- [13] Gao T C, Liu L, Zhao S J, et al. The actuality and progress of whole sky cloud sounding techniques [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(1): 101-109. [高太长, 刘磊, 赵世军, 等. 全天空测云技术现状及进展[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 101-109.]
- [14] University of Bradford. Bradford Robotic Telescope [EB/OL] [2011-10-15]. <http://www.telescope.org>.