

区域协方差与中值校正融合的天际线检测算法研究

涂兵^{1,2,3} 潘建武^{1,2,3} 吴健辉^{1,2,3} 曾香^{1,3} 曹旭^{1,3}

(湖南理工学院信息与通信工程学院 岳阳 414006)¹

(湖南理工学院复杂系统优化与控制湖南省普通高等学校重点实验室 岳阳 414006)²

(湖南理工学院 IIP 创新实验室 岳阳 414006)³

摘要 天际线检测在视觉导航、地理图像标注中有着重要的作用。首先采用区域协方差算法对图像进行初分割,确定天际线检测的目标区域;接着根据分析数据集中的样本图片梯度值得到的最优梯度阈值,在初分割的天际线检测目标区域,提出一种循环梯度算法来检测出图像中各列的天际线位置坐标;最后采用中值滤波算法对检测的天际线各点坐标值进行校正,消除可能存在的天际线奇异点,检测出输入图像中的天际线。所提算法在内华达大学机器视觉实验室 Web set 和 Baatz set 数据集上进行了测试,实验结果表明:提出的算法能有效地检测出数据集中输入图像的天际线,不需要对图像的边缘信息进行提取,具有良好的有效性和时效性。

关键词 视觉导航,天际线,区域协方差,梯度阈值,中值滤波

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.063

Research on Skyline Detection Based on Region Covariance and Median Filtering Algorithm

TU Bing^{1,2,3} PAN Jian-wu^{1,2,3} WU Jian-hui^{1,2,3} ZENG Xiang^{1,3} CAO Xu^{1,3}

(School of Information and Communication Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)¹

(Key Laboratory of Optimization and Control for Complex Systems, College of Hunan Province, Yueyang 414006, China)²

(Laboratory of Intelligent-Image Information Processing, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)³

Abstract Skyline detection plays an important role in visual navigation and geographical location annotation. Firstly, the input image is segmented by the region covariance algorithm to determine the target area of skyline detection. And then, the gradient values of the sample images in the data set are analyzed to obtain the optimal threshold gradient. In the skyline for initial segmentation detection target area, a cyclic gradient algorithm was proposed to detect the position coordinates. Finally, the median filtering algorithm was used to correct the coordinates of each point of the skyline for eliminating the possible skyline singular point, and eventually to detect the skyline of the input images. The proposed algorithm was tested on the Web set of the machine vision laboratory in the university of nevada. The experimental results show that the algorithm can effectively detect the skyline of input images in the data set, which is unnecessary to extract the edge information of the images. The proposed algorithm has good validity and timeliness.

Keywords Visual navigation, Skyline, Region covariance, Gradient threshold, Median filtering

天际线是指图像中空天与非天空区域(如天空与山地、天空与海洋、天空与森林)的分界线。天际线检测在视觉导航、港口安全、森林防火、沙漠图像标记中具有重要的作用^[1-5]。在天际线的检测研究方面, S. Thurrowgood 等人^[5-6]对无人机视觉导航飞行器的姿态进行了研究,提出了一种对视频图像中的天际线进行检测的算法,达到了对飞行器的姿态控制,天际线的检测采用基于视觉颜色合成和灰度信息的算法; S. M. Ettinger 等人^[2]提出一种基于区域协方差的算法检测出输入图像为直线或斜向的天际线,并将其应用到了微型飞行器的

导航上; N. S. Boroujeni 等人^[7]提出了一种基于独特光场的算法,它能快速稳定地检测出天际线为直线或斜向的情况; S. Todorovic 等人^[4]采用计算机视觉算法,提出了一种基于颜色和纹理特征的统计学图像模型建立天空与陆地的跟踪算法,最终实现了天空与陆地天际线的分离; Hung 和 Lie 等人^[8-11]针对天空与山区图片在不同的季节、不同气候等环境下的天际线提取问题,通过提取颜色、状态特征和边缘位置信息特征,采用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)算法对提取的特征训练一个分类器,然后将该分类器应用到天空与

到稿日期:2016-02-05 返修日期:2016-06-22 本文受国家自然科学基金(61201435),湖南省教育厅开放基金项目(15K051),湖南省高校科技创新团队支持计划(湘教通[2012]318号)资助。

涂兵(1983—),男,博士,讲师,主要研究方向为数字图像处理、计算机视觉、模式识别, E-mail: tu_bing@163.com; 潘建武(1981—),男,硕士生,主要研究方向为数字图像处理、计算机视觉; 吴健辉(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为图像信息处理、计算机视觉、模式识别。

山区图像中的天际线检测问题中,针对天空与海洋天际线为直线的提取问题,E. Gershikov 等人^[12]对几种常用的天空与海洋水平线的提取算法进行了对比总结;杨家红等人^[13]利用天空与海洋区域在背景灰度上的渐变特性,提出了一种海天天线定位方法;桂阳等人^[14]针对海天天线的检测提出了一种基于相位编组和灰度统计的新算法;刘松涛等人^[15]采用边缘检测、形态学滤波和 Hough 变换的方法来识别红外图像中的海天天线,其用于可见光图像和红外图像配准;T. Ahamd 等人^[16]对训练样本图像中天际线边缘的关键点信息进行训练,使用关键点信息的 SIFT 特征对天空与非天空的结合区域进行天际线的检测;H FARID^[17]提出了一种针对低像素的 JPEG 图像篡改检测方法,通过局部梯度极小值能够有效区分原图与压缩图像;倪麟等人^[18]提出了二维图像的自适应中值滤波图像分割算法;陈明轩等人^[19]利用脉冲检测识别当前像素点与相邻像素点间的噪声,达到了在图像的滤波过程中有效保护图像的细节部分的目的;赵志刚等人^[20]提出了一种融合水平梯度与局部信息强度的掌纹识别算法,使用不同的均值滤波模板消除细小、不规则、不稳定的掌纹纹线特征。

目前,天际线检测的一般方法主要包括:1)采用机器学习对天空与非天空区域关键特征进行训练,建立相应的天际线识别分类器;2)结合边缘提取信息直接检测出天际线;3)采用颜色分割和边缘提取融合算法来检测出天际线。目前这些算法在“存在一条连续不断的边缘边界分割天空与非天空区域”的假设条件下能达到比较好的效果,但是在天空与非天空较复杂的情况(如:图像低对比度、烟或雾、阴影、地表情况等)下对天际线的正确检测会产生较大影响,并且在天际线是曲线(非直线、斜线)的情况下,这些算法对天际线的检测效果有限。本文在区域协方差算法的基础上,基于循环梯度算法对图像中各列的天际线坐标进行检测,并对数据集中样本图片中梯度阈值的选择进行了研究,在不同梯度阈值的条件下对天际线提取的效果进行了分析,得出了较优的梯度阈值,最后采用基于中值滤波的算法对采用循环梯度算法检测出的天际线消除存在的奇异点,平滑天际线曲线。该算法对天际线的检测不需要对图像边缘信息进行提取,并且能快速有效地检测出图像中不单是直线、斜线的天际线。

1 天际线检测流程与算法分析

1.1 天际线检测流程

天际线的检测流程图如图 1 所示。

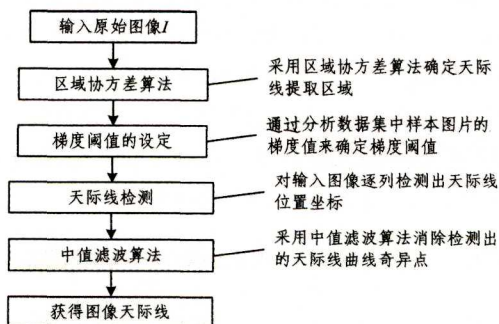


图 1 天际线检测流程图

首先对输入的原始图像 $I(i, j)$ 采用区域协方差算法进行初分割,确定天际线提取区域;接着通过数据集中样本图片各相邻梯度值,分析在不同阈值条件下的天际线检测效果,得到最优的天际线检测梯度阈值;然后采用提出的循环梯度算法对图像中各列的天际线进行检测,保存各列的天际线坐标值;最后采用中值滤波算法消除检测出的天际线奇异点。

1.2 基于区域协方差算法的天际线初分割

对于输入图像 $I_{m \times n}(i, j)$,其中 m, n 分别表示图像的行、列像素点值。设任一天空与非天空的像素点 (i, j) 的表达式写为 $X_{i,j}^s = [R_{i,j}^s, G_{i,j}^s, B_{i,j}^s]$ 与 $X_{i,j}^g = [R_{i,j}^g, G_{i,j}^g, B_{i,j}^g]$ 。其中 $R_{i,j}, G_{i,j}, B_{i,j}$ 分别表示图像 $I(i, j)$ 中对应像素点的 RGB 分量值。在输入图像上,遍历所有可能存在的天空与非天空区域的分界线,遍历过程如图 2 所示,假设图 2 中图像像素大小为 8×8 ,图 2 中的天际线存在 64 条可能的天际线曲线。对于输入图像 $I_{m \times n}(i, j)$,天际线存在的数量为 $m \times n$ 。

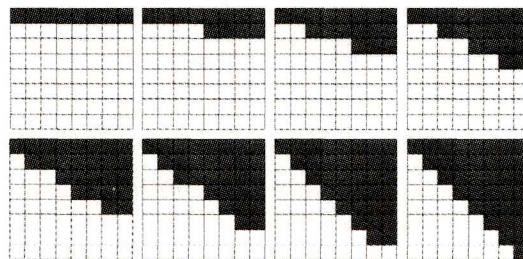


图 2 天际线遍历示意图

在每次的天际线遍历过程中,分别计算天空与非天空的协方差矩阵,计算公式如式(1)和式(2)所示:

$$\Lambda^s = E((X_{i,j}^s - \mu^s)(X_{i,j}^s - \mu^s)^T) \quad (1)$$

$$\Lambda^g = E((X_{i,j}^g - \mu^g)(X_{i,j}^g - \mu^g)^T) \quad (2)$$

其中, μ^s 与 μ^g 分别为天空与非天空的平均 RGB 分量值, μ^s 与 μ^g 的计算公式如式(3)和式(4)所示:

$$\mu^s = E(X_{i,j}^s) \quad (3)$$

$$\mu^g = E(X_{i,j}^g) \quad (4)$$

接着采用式(5)计算最大 J 值,其中, $\det()$ 为协方差矩阵 Λ^s 与 Λ^g 的行列式值, $\text{trace}()$ 为协方差矩阵 Λ^s 根的迹。

$$J = \frac{1}{\det(\Lambda^s) + \det(\Lambda^g) + \text{trace}(\Lambda^s) + \text{trace}(\Lambda^g)} \quad (5)$$

对式(5)进行优化可得到式(6)的表达式,其中 $\text{var}()$ 为方差值, Y^s 跟 Y^g 分别代表天空与非天空的亮度值。对式(6)进行简化运算得到式(7)的表达式,通过式(7)计算出最大的 J 值,最大 J 值对应的天际线即为采用区域协方差算法求得的图像初分割结果^[12]。

$$J = \frac{1}{\text{var}(Y^s) + \text{var}(Y^g) + \text{var}^2(Y^s) + \text{var}^2(Y^g)} \quad (6)$$

$$J = \frac{1}{\text{var}(Y^s) + \text{var}(Y^g)} \quad (7)$$

1.3 基于梯度循环的天际线检测算法

在采用区域协方差算法对输入图像进行初分割的基础上,对输入图像初步划分了天空与非天空区域,在非天空区域通过梯度阈值的设定,采用梯度循环算法来检测出天际线坐标位置。对于输入图像 $I(i, j)$,计算各列相邻之间的梯度值

大小,相邻梯度值记为 $D_{i,j}, D_{i,j}$ 的计算公式如式(8)所示:

$$\begin{cases} D_R = P_R(i, j) - P_R(i+1, j) \\ D_G = P_G(i, j) - P_G(i+1, j), i \in [1, M], j \in [1, N] \\ D_B = P_B(i, j) - P_B(i+1, j) \\ D_{i,j} = \sqrt{D_R^2 + D_G^2 + D_B^2} \end{cases} \quad (8)$$

其中, M, N 分别为输入图像 $I(i, j)$ 的行、列值。 P_R, P_G, P_B 分别表示对应像素点的 RGB 分量值。通过实验的方法确定梯度阈值,梯度阈值记为 D_{set} ,根据式(9)和式(10)分别计算 $D'_{i,j}, D''_{i,j}$,当 $D_{i,j} > D_{set}, D'_{i,j} > D_{set}, D''_{i,j} > D_{set}$ 时,可得天际线起始点位置坐标为 (i, j) 。

$$\begin{cases} D_R = P_R(i, j) - P_R(i+2, j) \\ D_G = P_G(i, j) - P_G(i+2, j) \\ D_B = P_B(i, j) - P_B(i+2, j), i \in [1, M], j \in [1, N] \\ D'_{i,j} = \sqrt{D_R^2 + D_G^2 + D_B^2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} D_R = P_R(i, j) - P_R(i+3, j) \\ D_G = P_G(i, j) - P_G(i+3, j) \\ D_B = P_B(i, j) - P_B(i+3, j), i \in [1, M], j \in [1, N] \\ D''_{i,j} = \sqrt{D_R^2 + D_G^2 + D_B^2} \end{cases} \quad (10)$$

图 3 为天际线检测算法示意图,假设图 3 中黑色斜线为采用区域协方差算法检测出的初始天际线,且图 3 中点 $(i, 1)$ 的各循环梯度值满足式(8)一式(10),则可得点 $(i, 1)$ 为采用梯度循环算数检测出的天际线坐标值。

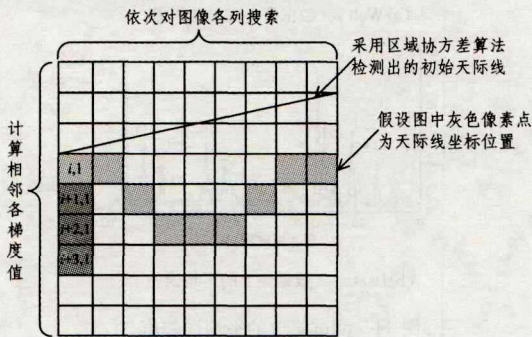


图 3 天际线检测算法示意图

1.4 基于中值滤波算法的天际线校正

中值滤波是一种典型的低通滤波器,属于非线性滤波技术中的一种,中值滤波的基本原理是把数字图像或数字序列中一点的值用该点的一个领域中各点值的中值代替。设有一个一维序列 f_1, f_2, \dots, f_n ,取窗口长度为 $m(m$ 为奇数),对此序列进行中值滤波,即从输入序列中相继抽出 m 个数: $f_{i-v}, \dots, f_{i-1}, \dots, f_{i+1}, \dots, f_{i+v}$,其中 i 为窗口的中心位置, $v = (m-1)/2$,再将这 m 个点按其数字大小排列,取其正中间的序号为作为输出。数学公式表示如式(11)所示^[17-19]:

$$Y_i = Med\{f_{i-v}, \dots, f_i, \dots, f_{i+v}\}, i \in M, v = \frac{m-1}{2} \quad (11)$$

其中, M 为中值滤波的长度,在基于循环梯度检测出天际线坐标值后,为了对可能存在的天际线奇异点坐标值进行消除,采用式(11)进行计算,其中 f_1, f_2, \dots, f_n 为提取的天际线各坐标点值,滤波窗口 M 的长度设为 21,重新对天际线各点坐标值进行校正。

2 天际线梯度阈值选择分析

天际线梯度阈值 D_{set} 的选择对天际线的正确检测具有比较重要的作用,本文根据内华达大学机器视觉实验室 Web set 数据集上给定的样本数据集上的图片,分析合适的天际线梯度阈值,图 4 是给定的数据集中样本图片及对应的天际线曲线。

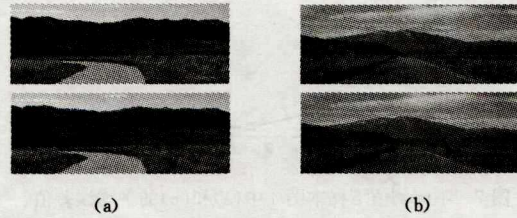


图 4 天际线样本图片及天际线曲线

选择不同的阈值,分别采用提出的循环梯度算法检测出样本图片的天际线,阈值选择 5,15,20,30,35。图 5 和图 6 分别示出了对图 4(a)和图 4(b)样图在不同阈值设置下检测出的天际线曲线。

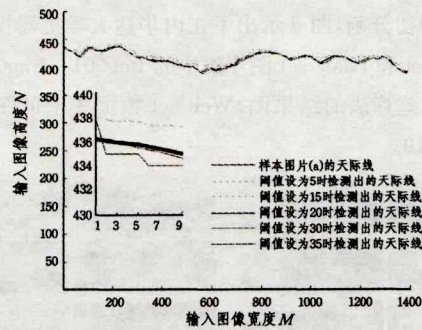


图 5 不同阈值下天际线样本图片(a)的检测效果

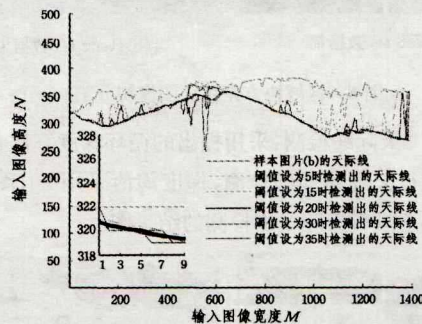


图 6 不同阈值下天际线样本图片(b)的检测效果

通过不同的阈值设置,对检测出的天际线再进行定量分析。计算检测出的天际线与实际的天际线之间的平均误差,平均误差采用欧氏距离算法,计算公式如式(12)所示, X_1 为给定的天际线曲线值, X 为检测出的天际线曲线值。

图 7 示出了不同阈值条件下的平均误差值,通过图 7 可以得出,当阈值设定为 30 时取得最小平均误差。梯度阈值的选择将直接影响下一步中值滤波校正效果,最终对天际线像素坐标位置的准确检测有着重要的影响。梯度阈值的选择主要通过实验方法分析得到,通过采用不同梯度阈值下检测的

最终天际线像素坐标值位置,进行实验分析得到最优的梯度阈值。本文分别在梯度阈值为 5,15,20,30,35 时进行实验分析,通过实验分析得到梯度阈值对天际线检测的精度呈现先增大后下降的趋势,并且在梯度阈值在 30 时能获得最小的平均误差。

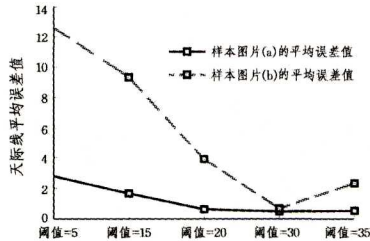


图 7 不同阈值下样本图 4 中(a)和(b)的平均误差值

$$d = \sqrt{\sum_{j=1}^N (X_{1(j)} - X_{(j)})^2} \quad (12)$$

3 天际线检测实验步骤与结果分析

3.1 天际线检测算法实验步骤

步骤 1 天际线初分割:对输入的图像 $I(i, j)$ 采用区域协方差进行初分割,图 8 示出了在内华达大学机器视觉实验室的 Web set 和 Baatz set 图片集中的 Img001—Img008 上运行区域协方差算法的结果图,Web set 数据集上的图片大小为 1388×519 。

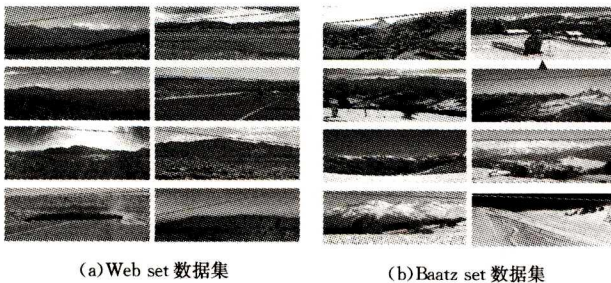


图 8 区域协方差算法图像初分割

步骤 2 天际线检测:采用提出的循环梯度算法在步骤 1 的基础上进行天际线的细检测,梯度阈值采用 30,图 9 为在图 8 的基础上进行天际线细检测的结果图。

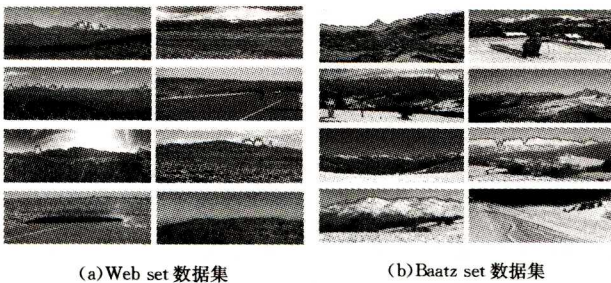


图 9 基于循环梯度的天际线细检测结果图

步骤 3 天际线校正:对图 9 中天际线的检测效果采用中值滤波消除可能存在的奇异点值,中值滤波长度设置为 21。图 10 为采用中值滤波对图 9 中的天际线检测结果进行校正的结果。

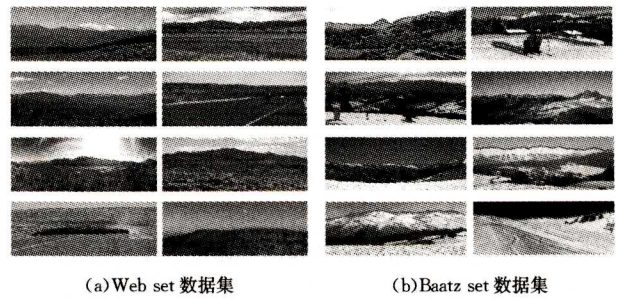


图 10 天际线检测最终结果图

3.2 算法误差对比分析

本算法在 Web set 和 Baatz set 图片测试集上进行了测试,其中 Web set 测试集上共 0 张图片,Baatz set 测试集上总共有 100 张图片,分别运行文献[9,11]中的 4 种算法对检测的天际线结果进行量化对比分析,主要从平均误差、误差最大值、误差最小值进行定量分析。图 11 为提出的算法在测试集上得出的平均误差值,平均误差采用式(12)进行计算。

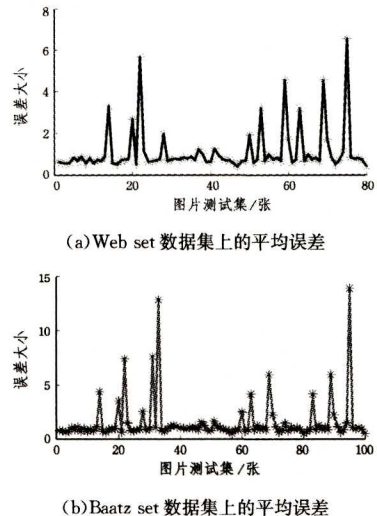


图 11 测试集上的平均误差值

4 种天际线检测算法的误差对比数据如表 1 与表 2 所列,分别统计其平均误差、误差最大值和误差最小值。

表 1 4 种检测算法在 Web set 测试集上的结果对比

| 方法 | 平均误差 | 误差最大值 | 误差最小值 |
|--------------------------------|---------|----------|--------|
| Lie 等(Edges) ^[9] | 9.1500 | 93.0241 | 0.3796 |
| Gradient Info ^[9] | 11.8641 | 121.4883 | 0.1489 |
| SIFT+HOG Edges ^[11] | 0.8698 | 7.0555 | 0.4270 |
| 本文算法 | 0.8568 | 6.5689 | 0.3769 |

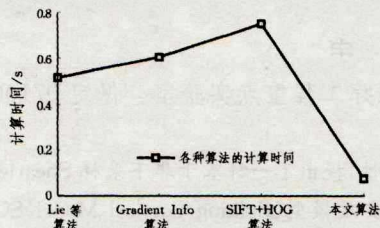
表 2 4 种检测算法在 Baatz set 测试集上的结果对比

| 方法 | 平均误差 | 误差最大值 | 误差最小值 |
|--------------------------------|---------|----------|--------|
| Lie 等(Edges) ^[9] | 10.1500 | 95.2786 | 0.7562 |
| Gradient Info ^[9] | 12.7546 | 141.9861 | 0.4086 |
| SIFT+HOG Edges ^[11] | 1.8698 | 16.8576 | 0.5296 |
| 本文算法 | 1.6437 | 14.7147 | 0.4769 |

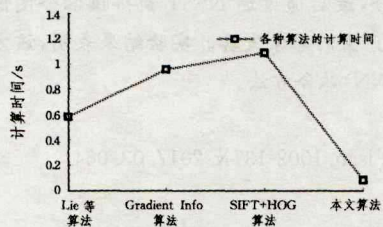
3.3 算法计算时间的对比

将提出的算法与另外 3 种天际线检测算法在 Matlab2013a 上进行了算法仿真实验,算法运行的计算机硬件环境为 CPU T7700,内存 4GB,分别统计 Web set 和 Baatz set

测试样本图片集上的运行时间,得到每张图片的平均计算时间,计算结果如图 12 所示,从图 12 中可以看出所提算法的计算速度优于其他 3 种算法。



(a) Web set 数据集上的平均计算时间



(b) Baatz set 数据集上的平均计算时间

图 12 平均每张图片的计算时间

3.4 算法的局限性分析

由于本文采用了中值滤波算法,中值滤波在消除奇异点时对滤波窗口的大小有较高要求,如果窗口太小或太大,会导致天际线像素奇异坐标点的平滑效果较差;在背景图像较复杂的情况下,采用循环梯度算法检测出的天际线初始坐标值的准确性对后续中值滤波算法的处理效果有较大的影响。如果初始检测出的天际线初始坐标存在较大偏差,将会直接影响到天际线坐标值的最终精度。

3.5 算法结果讨论

由表 1 和表 2 可知,提出的算法对天际线的检测有较好的效果,在测试集上的平均误差和误差最大值均优于其他 3 种算法,而误差最小值略高于文献[9]中的 Gradinet 算法,由于本文中梯度阈值的选择对天际线的检测具有较重要的作用,当非天空区域与天空区域中背景颜色较接近或者非天空区域存在较大的色差时容易导致天际线像素点的误检,如图 13 中由于非天空区域与天空区域中颜色较近或非天空区域的背景颜色差异较大,因此导致了天际线像素点的误检。

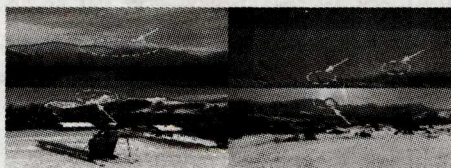


图 13 天空与非天空过渡区域背景颜色近似的图片

结束语 为准确检测出图像中的天际线,本文将区域协方差算法应用到图像的初分割上,首先将图像分割成天空与非天空区域,确定天际线检测的范围;同时通过实验分析选择合适的天际线检测梯度阈值;接着提出一种基于循环梯度的算法对非天空区域进行天际线的细检测;然后采用天际线中值滤波算法对检测出的天际线进行奇异点的消除,达到对输

入图像中天际线的准确检测;最后在内华达大学机器视觉实验室 Web set 和 Baatz set 数据集上运行了 4 种天际线检测算法,通过对比这 4 种检测算法可知,所提算法对天际线的检测准确度高,时效性较好,并且无需对图像的边缘信息进行提取。

参考文献

- [1] CROON G C H E D, REMES B D W, WASZAK C D, et al. Sky Segmentation Approach to Obstacle Avoidance[C]//IEEE Aerospace Conference, 2011, 1-16.
- [2] ETTINGER S M, NECHYBA M C, IFJU P G, et al. Vision-guided flight stability and control for micro air vehicles[J]. Advanced Robotics, 2002, 3(7): 2134-2140.
- [3] MCGEE T G, SENGUPTA R, HEDRICK K. Obstacle Detection for Small Autonomous Aircraft Using Sky Segmentation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 4679-4684.
- [4] TODOROVIC S, NECHYBA M C, IFJU P G. Sky/ground modeling for autonomous MAV flight[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003, 1(1): 1422-1427.
- [5] THURROWGOOD S, SOCCOL D, MOORE R J D, et al. A vision based system for attitude estimation of UAVs[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Thurrowgood, Saul, 2009: 5725-5730.
- [6] THURROWGOOD S, MOORE R J D, BLAND D, et al. UAV Attitude Control using the Visual Horizon[C]//Proceedings of the 2010 Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2010).
- [7] BOROUJENI N S, ETEMAD S A, WHITEHEAD A. Robust Horizon Detection using Segmentation for UAV Applications [C]//2012 Ninth Conference on Computer and Robot Vision, 2012: 346-352.
- [8] HUNG Y, SU C, CHANG Y, et al. Skyline localization for mountain images[C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2013: 1-6.
- [9] LIE W, LIN T C I, LIN T, et al. A robust dynamic programming algorithm to extract skyline in images for navigation[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(2): 221-230.
- [10] VERBICKAS R, WHITEHEAD A. Sky and Ground Detection Using Convolutional Neural Networks[J]. International Conference on Machine Vision and Machine Learning, 2014, 64(4): 1-10.
- [11] YAZDANPANAHA P, REGENTOVA E E, MANDAVA A K, et al. Sky Segmentation by Fusing Clustering with Neural Networks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2013, 8034: 663-672.
- [12] GERSHIKOV E, LIBE T, KOSOPAPOV S. Horizon Line Detection in Marine Images; Which Method to Choose[J]. International Journal on Advances in Intelligent Systems, 2013, 6(1/2): 79-88.

- [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(7): 2864-2875.
- [7] MIAO Q G, WANG B S. Novel Algorithm of Multi-sensor Image Fusion Using Contourlet [J]. *Computer Science*, 2008, 35(5): 231-235. (in Chinese)
苗启广, 王宝树. 基于 Contourlet 的图像融合新方法 [J]. *计算机科学*, 2008, 35(5): 231-235.
- [8] QU X B, YAN J W, XIAO H Z, et al. Image fusion algorithm based on spatial frequency-motivated pulse coupled neural networks in nonsubsampling contourlet transform domain [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(12): 1508-1514.
- [9] GENG P, WANG Z Y, ZHANG Z G, et al. Image fusion by pulse couple neural network with shearlet [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 067005-1-067005-7.
- [10] YANG Y C, WANG X M, DANG J W, et al. Method of medical image fusion based on nonsubsampling Contourlet transform [J]. *Computer Science*, 2013, 40(3): 310-313. (in Chinese)
杨艳春, 王晓明, 党建武, 等. 基于非下采样 Contourlet 变换的医学图像融合方法 [J]. *计算机科学*, 2013, 40(3): 310-313.
- [11] LIU S Q, HU S H, XIAO Y, et al. SAR Image Edge Detection Based on Local Hybrid Filter [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(5): 8-18. (in Chinese)
刘帅奇, 胡绍海, 肖扬, 等. 基于局部混合滤波的 SAR 图像边缘检测 [J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(5): 8-18.
- [12] LIU S Q, HU S H, XIAO Y. Image separation using wavelet-complex shearlet dictionary [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2014, 25(2): 314-321.
- [13] LIU S Q, HU S H, XIAO Y, et al. Bayesian shearlet shrinkage for SAR image denoising via sparse representation [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2014, 25(4): 683-701.
- [14] EASLEY G, LABATE D, LIM W Q. Sparse directional image representation using the discrete shearlets transform [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2008, 25(1): 25-46.
- [15] GUO D, YAN J W, QU X B. High quality multi-focus image fusion using self-similarity and depth information [J]. *Optics Communications*, 2015, 338(1): 138-144.
- [16] KONG W W, WANG B H, LEI Y. Technique for infrared and visible image fusion based on non-subsampling shearlet transform and spiking cortical model [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71: 87-98.
- [17] WANG N Y, MA Y D, ZHAN K. Spiking cortical model for multifocus image fusion [J]. *Neurocomputing*, 2014, 130(3): 44-51.
- [18] WANG J J, LI Q, JIA Z H, et al. A novel multi-focus image fusion method using PCNN in nonsubsampling contourlet transform domain [J]. *Optik*, 2015, 126(20): 2508-2511.
- [19] KUTYNIOK G, LIM W Q. Compactly supported shearlets are optimally sparse [J]. *Journal of Approximation Theory*, 2011, 163(11): 1564-1589.
- [20] MA Y D, LIN D M, ZHANG B D, et al. A novel algorithm of image enhancement based on pulse coupled neural network time matrix and rough set [J]. *International Conference on Fuzzy Systems & Knowledge Discovery*, 2007, 3: 86-90.
- [21] LIU S Q, ZHU Z H, LI H Y, et al. Multi-focus image fusion using self-similarity and depth information in nonsubsampling shearlet transform domain [J]. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2016, 9(1): 347-360.

(上接第 317 页)

- [13] YANG J H, LI C H, WEI D Y, et al. Sea-sky-line locating algorithm based on complicated sea-sky background row-mean curve [J]. *Laser and Infrared*, 2012, 42(12): 1346-1350. (in Chinese)
杨家红, 李翠红, 危德益, 等. 基于复杂海空背景行均值曲线的海天定位算法 [J]. *激光与红外*, 2012, 42(12): 1346-1350.
- [14] GUI Y, LI L C, WANG K P, et al. A new method of sea-sky-line detection based on region variance and RANSAC algorithm [J]. *Laser and Infrared*, 2008, 38(4): 638-641. (in Chinese)
桂阳, 李立春, 王鲲鹏, 等. 基于区域方差和 RANSAC 的海天线检测新方法 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(4): 638-641.
- [15] LIU S T, ZHOU X D, WANG C G. Robust sea-sky-line detection algorithm under complicated sea-sky background [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(8): 5-10. (in Chinese)
刘松涛, 周晓东, 王成刚. 复杂海空背景下鲁棒的海天线检测算法研究 [J]. *光电工程*, 2006, 33(8): 5-10.
- [16] AHMAD T, BEBIS G, REGENTOVA E, et al. A Machine Learning Approach to Horizon Line Detection Using Local Features [M]. *Advance in Visual Computing*. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 181-193.
- [17] FARID H. Exposing digital forgeries from JPEG ghosts [J]. *IEEE Trans on Information Forensics and Security*, 2009, 4(1): 154-160.
- [18] NI L, GONG Q, CAO L, et al. Two-dimensional Otsu image segmentation algorithm based on adaptive weighted median filter [J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(2): 588-590. (in Chinese)
倪麟, 龚劬, 曹莉, 等. 基于自适应加权中值滤波的二维 Otsu 图像分割算法 [J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(2): 588-590.
- [19] CHEN M X, ZHOU Y L, ZHANG Q Z. Directional weighted filter with 12 directions to remove random valued impulse noise [J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(5): 1584-1587. (in Chinese)
陈明轩, 周亚丽, 张奇志. 基于 12 个方向的方向加权滤波算法去除随机值脉冲噪声 [J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(5): 1584-1587.
- [20] ZHAO Z G, WU X, ZHANG W Z, et al. Palmprint recognition algorithm of integrating horizontal gradient and local information intensity [J]. *Computer Science*, 2015, 42(6): 317-321. (in Chinese)
赵志刚, 吴鑫, 张维忠, 等. 融合水平梯度与局部信息强度的掌纹识别算法 [J]. *计算机科学*, 2015, 42(6): 317-321.