

应用图像方向和宽度谱检测机场跑道

倪维平, 严卫东, 吴俊政, 张 晗, 芦 颖, 郑 刚

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 为有效解决成像制导中的机场跑道检测问题, 提出了一种基于方向和宽度谱分析的处理方法。首先归纳了机场跑道形态和灰度特性, 进而根据局部灰度特征进行跑道区域预分割, 然后以 Sobel 算子提取边缘信息, 再利用局部 PCA 计算边缘方向, 并对各方向值出现频次进行累积, 形成方向谱。通过分析方向谱的显著峰信息得到跑道的主方向, 在此基础上, 确定正交宽度谱的扫描计算模式。结合宽度谱显著峰信息的分析和跑道主方向进行跑道区域的指示和几何宽度值的计算。对机场跑道图像的处理结果显示, 文中方法具有较高的检测精度, 同时对跑道形状畸变显示出良好的鲁棒性。

关键词: 成像制导; 局部 PCA; 机场跑道; 方向谱; 宽度谱

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3655-08

Detection of airport runway based on the orientation and width spectrums of images

Ni Weiping, Yan Weidong, Wu Junzheng, Zhang Han, Lu Ying, Zheng Gang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: For the detection of airport runway in imaging guidance, a method based on the analysis of orientation and width spectrums was proposed. Firstly, the characteristics of structure and gray of runway in infrared images were analyzed, and then the runway regions were pre-segmented based on the local gray properties. Secondly, sobel operators were used to detect the edges, based on which the orientation spectrum was constructed with the edge orientations calculated with local PCA method. According to the significant peak of orientation spectrum, the main direction of runway was obtained, as well as the mode of the projection cross width spectrum construction. Thirdly, the width spectrum was calculated, from which the projection width could be obtained. With the main orientation and projection width, the geometric width of runway was then calculated, which fulfilled the detection of the runway in infrared image. Experimental results with the infrared images indicate that the method proposed has good performance for runway detection, not only with the high detection rate, but also with nice robustness for geometric distortion.

Key words: imaging guidance; local PCA; airport runway; orientation spectrum; width spectrum

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-03

基金项目: 国防预研基金; 国家 863 计划

作者简介: 倪维平(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事自动目标识别等方面的研究。Email: niweiping@nint.ac.cn

0 引言

跑道是机场区域最基本、最典型的基础设施,是识别机场的重要标志。跑道检测在精确制导等军事应用和自主导航等民用方面都具有十分重要的意义,因此,一直是计算机视觉和自动目标识别领域内的研究热点之一^[1-3]。

在航拍红外和高分辨率光学图像中,机场跑道一般呈现带状特性,具有较为明显的直线边缘;同时,跑道区域内部灰度较为均匀,且与背景具有差异性,以上特征是跑道检测算法设计的基本依据。现有跑道检测算法总体可分为两类:基于边缘特征的方法和基于灰度特征的方法。

基于边缘特征的方法主要利用跑道的带状特性,认为跑道边缘整体呈直线状,两侧边缘直线在延伸方向上的距离恒定。在处理时,通常首先进行边缘检测,然后再按照一定的策略剔除背景干扰以实现跑道边缘提取。比较典型的处理方法包括 Hough 变换法、Radon 变换法、相位编组法等^[4-10]。上述方法均能提取图像中显著边缘直线区,但难以区分背景中的长边缘与跑道边缘。为此,王昭莲^[4]提出了一种方向小波的方法,李小毛^[5]提出了一种多尺度线状目标强化的方法,王昭莲^[6]给出了链码跟踪的方法,邸男^[7]提出的三次直线连接方法,以及曹世翔^[9]提出的中心线引导方法,都是力求在边缘检测环节尽可能地抑制背景干扰,但算法整体运算复杂度较高,且未能完全实现跑道边缘的自动甄别,笔者^[10]通过引入基于正交投影宽度谱提供了新的思路,但该方法依赖跑道方向先验确定宽度谱扫描方向。

基于灰度特征的方法利用的是跑道内部像素灰度均匀,且与背景区域像素灰度间存在差异性的特点。典型的方法有阈值分割法、纹理聚类法、骨架提取法、数学形态学方法等^[11-15]。该类方法多需计算多种特征,后处理较多,且对背景干扰敏感,因此算法复杂度较高,并且,部分方法最终又归于基于边缘的处理方法,如参考文献[11]。王彪^[12]提出了一种多特征提取的机场跑道自动检测方法,首先利用阈值法进行初分割,然后利用 EM 算法估计样本模型参数实现跑道区域分割。该方法虽能有效检测跑道,但对训练样本敏感,时间复杂度较高。总体而言,基于边缘特征的机场

跑道检测方法多于灰度特征类方法。

针对成像制导中机场跑道检测问题,文中综合利用区域灰度和边缘特性信息,提出了一种基于方向和宽度谱分析的处理方法。首先利用灰度均值和方差对含有跑道目标的图像进行预分割,在此基础上,以 Sobel 算子检测边缘,同时利用局部 PCA 方法估计边缘方向,并通过统计计算得到边缘方向谱。通过对方向谱显著峰的分析,得到跑道的主方向,从而确定宽度谱计算的扫描方向,再由宽度谱显著峰得到跑道投影宽度。结合所获取的跑道主方向和投影宽度,计算跑道几何宽度和位置的指示,即可实现机场跑道的检测。对机场跑道图像处理的结果验证了文中方法的有效性,且对几何畸变具有较好的鲁棒性。

1 算法描述

根据图像中的机场跑道目标呈现内部灰度均匀的带状特性,并结合国内外相关技术文献,图 1 给出了文中所构造的基于方向宽度谱的红外图像机场跑道检测算法处理流程。

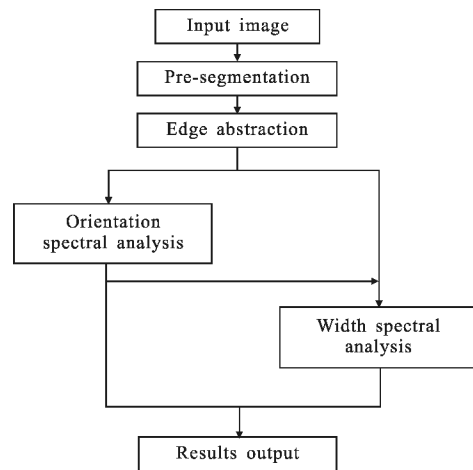


图 1 应用方向宽度谱检测机场跑道处理流程

Fig.1 Flowchart of the detection of airport runway based on orientation and width spectrum

首先输入图像,然后对其进行与分割,消除相当一部分背景干扰,进而提取边缘,再分别计算边缘图像的方向谱和宽度谱,通过对二者显著峰的分析,得到机场跑道主方向和宽度值,实现跑道目标的检测,最后输出结果。在上述处理流程中,边缘检测利用的是标准 Sobel 算子来实现,其原理将不展开介绍,而

图像预分割、方向谱分析和宽度谱分析则属于文中算法思想的重要组成部分,接下来将进行着重阐述。

1.1 利用区域灰度特性进行红外图像预分割

图 2 给出了四幅典型的机场跑道图像,可以看出,机场跑道与背景在灰度明暗和纹理等特性上具有较为明显的差异性。通常,局部方差是刻画图像灰度特性最常用的方法。跑道区域纹理较为丰富,其局部灰度方差较大,而背景区域灰度较为均匀,纹理较粗,其局部灰度方差相对较小。以 7×7 邻域窗口计算图像局部方差,结果如图 3 所示。可以看出,跑道区域局部方差整体高于背景区域,从而可利用阈值法对跑道方差图像进行处理,以实现跑道目标的预分割。通过实验,构造如下的阈值分割公式:

$$f(x,y)=\begin{cases} 1 & \sigma_{\text{local}}>k\cdot\sigma_{\text{total}} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_{total} 为图像整体灰度方差; σ_{local} 为给定像素局部方差; k 为调节系数,取值在 0~1 之间,文中取 $k=0.5$, 则对图 2 中所示图像预分割结果如图 4 所示,其中白色区域包含了机场跑道,称之为候选跑道区域。

可以看出,预分割后大部分背景区域得到了有效抑制。以预分割图像为掩模,在后续处理中仅对候选跑道区域进行处理和分析即可。此外,计算局部方差的窗口大小与图像分辨率以及目标尺寸有关,窗口太大计算量增加,窗口太小则无法检测局部纹理的变化。实验结果表明,对于文中所用图像,选用 7×7 的窗口,即可有效捕捉局部方差的差异性。

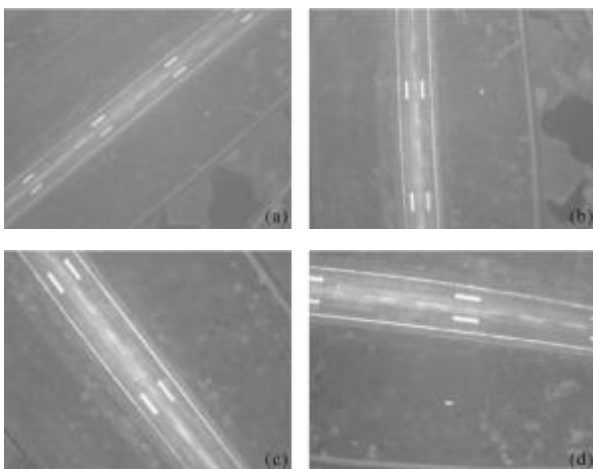


图 2 机场跑道图像

Fig.2 Images of airport runway

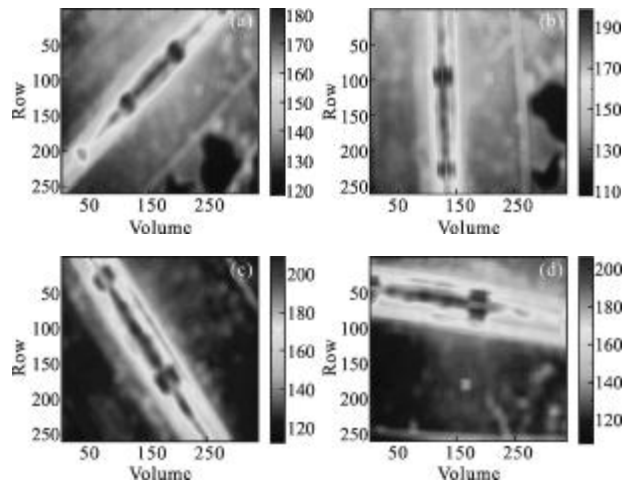


图 3 机场跑道图像局部方差

Fig.3 Variance of images of airport runway

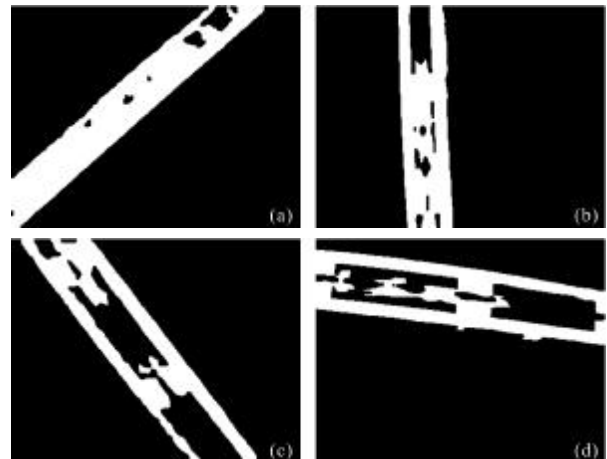


图 4 机场跑道图像预分割结果

Fig.4 Pre-segmentation of airport runway images

1.2 跑道边缘方向谱分析

跑道主方向是非常重要的特征参数,文中将采用方向谱分析方法进行处理,包括局部边缘方向估计和方向谱分析两个步骤。

(1) 基于局部 PCA 的跑道边缘方向计算

局部 PCA 是一种有效提取数据中最“主要”元素和结构的数据分析技术,可以去除噪声等干扰,从而揭示复杂数据中的简单结构^[16]。

首先定义边缘点的支撑集。对于任一边缘点 $E(x^i, y^i)$,以其为中心选取正方形掩模 Ω ,大小为 $p \times p$,则 Ω 内所有像素构成的集合称为 $E(x^i, y^i)$ 的支撑集,其中参数 p 值为奇数,其大小会影响 PCA 计算的速度和结果准确性。若图像中边缘较稀疏,则 p 可取得大些,这里取 $p=7$ 。

统计 Ω 中像素点坐标得到坐标协方差矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

设 Ω 内像素数为 N , 像素坐标为 (x_j^i, y_j^i) , 则:

$$S_{11} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j^i - x_m^i)^2 \quad (3)$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j^i - x_m^i)(y_j^i - y_m^i) \quad (4)$$

$$S_{22} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j^i - y_m^i)^2 \quad (5)$$

其中

$$x_m^i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j^i; y_m^i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j^i \quad (6)$$

计算坐标协方差矩阵的特征值 λ_1 和 λ_2 , 进而利用 Ω 内边缘的主方向 θ . 对于理想直线, 此即为直线在笛卡尔坐标系下的倾角, 其计算表达式为:

$$\theta = \arctan[(\lambda_1 - S_{11})/S_{12}] \quad (7)$$

图 5 为 Sobel 算子边缘提取结果, 图 6 为预分割掩模边缘图像. 表 1 给出了掩模前后边缘点数目对比. 显然, 掩模处理可剔除大部分背景干扰边缘点的影响, 从而说明预分割的有效性.

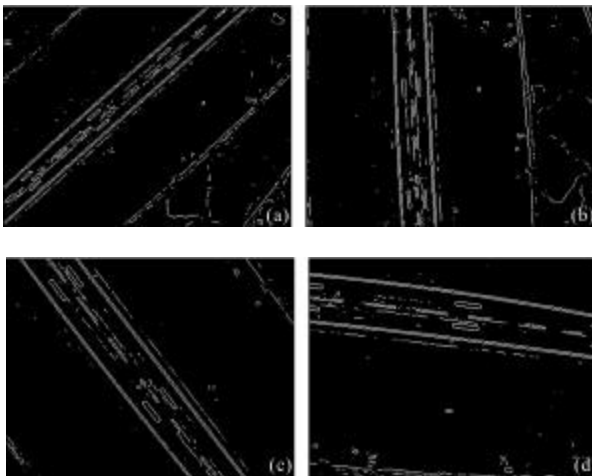


图 5 机场跑道图像边缘检测结果
Fig.5 Edge detection of airport runway images

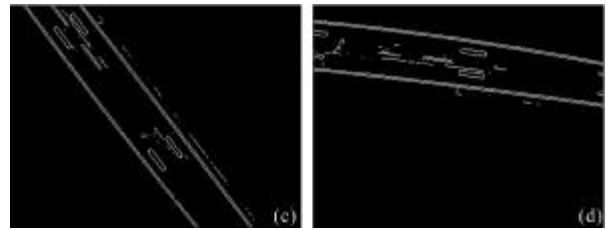
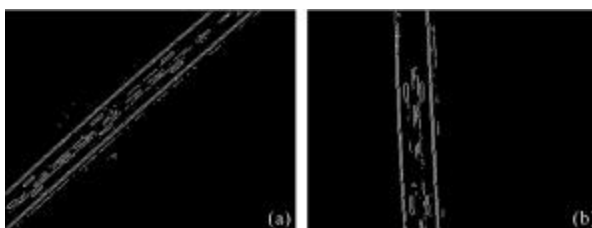


图 6 掩模处理后图像边缘检测结果
Fig.6 Edge detection of masked images

表 1 掩模前后边缘点数目
Tab.1 Edge points number before and after masking

	Edge points			
Before	2 923	2 924	2 223	2 850
After	1 979	1 806	1 550	1 898

图 7 为局部 PCA 方法边缘方向估计结果, 每幅图像右侧颜色条对应的数值表示角度值由 $0 \sim 180^\circ$ 的变化. 可以看出, 估计所得跑道主方向与实际方向具有很好的一致性, 说明该方法的有效性和鲁棒性.

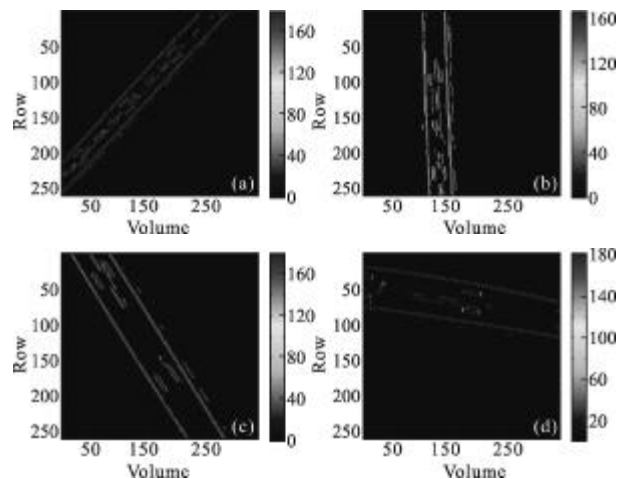


图 7 局部 PCA 方法边缘方向估计结果
Fig.7 Estimation of orientation with local PCA

(2) 方向谱计算与跑道主方向估计

定义边缘图像的方向谱 Φ_0 为:

$$\Phi_0(i) = \#(\theta(x, y) = i) \quad (8)$$

式中: $\theta(x, y)$ 为局部 PCA 估计边缘方向图; 符号 $\#(\cdot)$ 为计数操作; Φ_0 的物理意义是图像中所有边缘点方向在 $1 \sim 180^\circ$ 之间整数角度上的分布情况. 图 8 给出了图 7 对应的方向谱, 其中横坐标为方向角度值, 纵

坐标为谱强度。表 2 给出了由图 8 方向谱显著峰所得跑道主方向和手工测量结果。

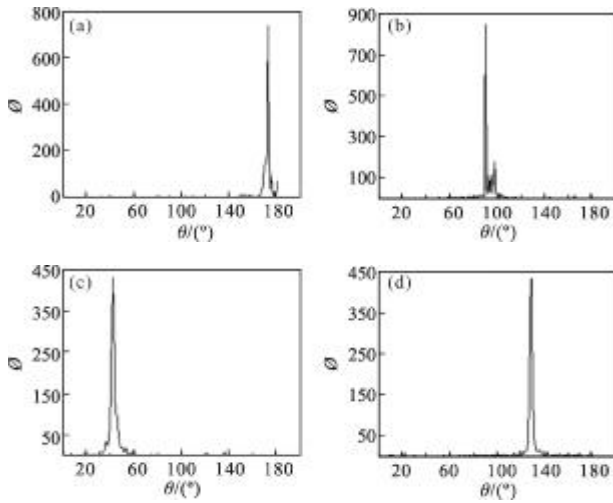


图 8 边缘图像方向谱

Fig.8 Orientation spectrum of edge image

表 2 跑道主方向估计值与手工测量值的对比
Tab.2 Orientation estimated and measured value

		Value			
Estimated	43	91	130	174	
Measured	43	91	129	174	

可以看出,在方向谱中均含有一个显著的峰,该峰所在位置所对应的刻度即为相应图像中跑道主方向,并且,跑道方向估计值与测量值二者之间是非常一致的,从而说明了利用局部 PCA 方法可以准确地估计跑道主方向。

1.3 跑道宽度谱分析

(1) 投影宽度谱计算

跑道宽度也是非常重要的特征参数,文中利用宽度谱的方法对其进行估计^[10]。

首先,给出水平投影宽度谱的定义:

$$\Phi_w^h(\Delta l_h) = \#(E(i, j) \oplus_h(\Delta l_h + \delta_j)) \quad (9)$$

式中: \$\Delta l_h\$ 为水平方向坐标差值; \$\oplus_h\$ 表示水平“与”操作,即

$$E(i, j) \oplus_h(\Delta l_h + \delta_j) = \begin{cases} 1 & E(i, j) = E(i, j + \Delta l_h + \delta_j) = 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

常数 \$\delta_j\$ 取值为 \$\{-3, -2, \dots, 2, 3\}\$, 用于消除边缘检测等带来的不确定性。类似的,可以定义竖直方向

的投影宽度谱:

$$\Phi_w^v(\Delta l_v) = \#(E(i, j) \oplus_v(\Delta l_v + \delta_i)) \quad (11)$$

投影宽度谱的物理意义是将边缘图像中水平或竖直方向上的边缘点对,按坐标差值统计其分布。显然,当跑道接近水平时,其水平投影宽度谱是无效的,竖直情况类似。因此需要对跑道主方向进行判断,然后采取不同的计算策略:

$$\Phi_w(\Delta l) = \begin{cases} \Phi_w^v(\Delta l_v) & \text{if } \theta \in [45, 135] \\ \Phi_w^h(\Delta l_h) & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

式中: \$\theta\$ 由方向谱分析得到,取值范围是 \$[1, 180]\$; \$\Delta l\$ 为跑道宽度先验,用以降低背景干扰。文中取 \$\Delta l \in [15, 120]\$。图 9 为图 7 预分割掩模边缘图的宽度谱,投影宽度谱显著峰的横坐标即为跑道投影宽度。表 3 中投影宽度估计值与测量值是一致的,说明宽度谱分析方法的有效性。

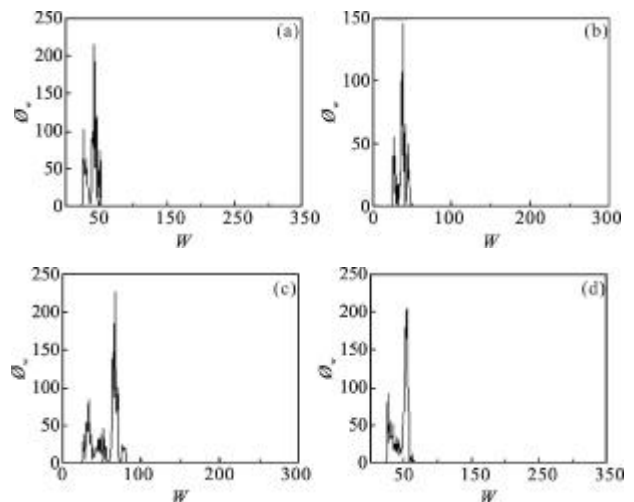


图 9 边缘图像投影宽度谱

Fig.9 Projection width spectrum of edge image

表 3 跑道投影宽度估计值与测量值对比

Tab.3 Projection width estimated and measured value

Direction	Vertical	Horizontal	Horizontal	Vertical
Estimated	43	39	67	55
Measured	43	39	67	55

图 10 给出了基于投影宽度的跑道边缘点提取结果,对其进行最小二乘拟合,结果如图 11 所示。若计算检测得到的跑道边缘点坐标均值,则可用于攻击点选择(十字标记)。

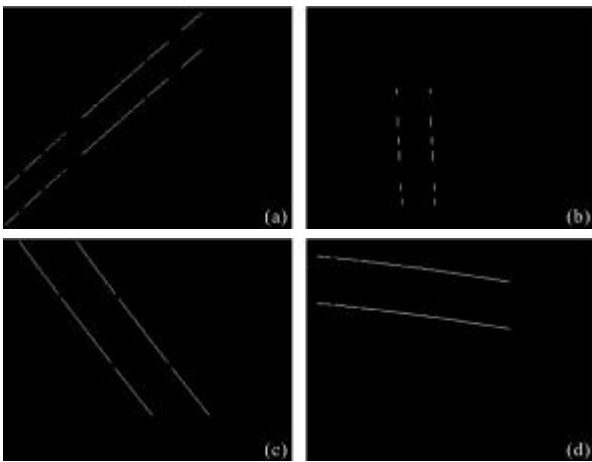


图 10 跑道边缘提取结果

Fig.10 Results of runway edge abstraction

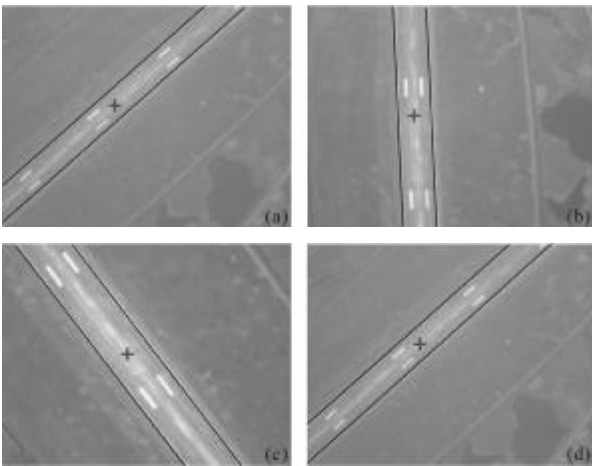


图 11 跑道检测结果

Fig.11 Detection results of runway

2 实验结果与分析

为评估文中所给出的方向和宽度谱分析方法在机场跑道检测方面的实际性能，笔者利用获取的序列图像进行实验验证。

图 12 和图 13 和表 4 给出了部分实验结果,其中,图 12 为待处理图像,图 13 为跑道目标检测结果;表 4 则给出了处理所得跑道参数信息。作为对比,图 14 和图 15 分别给出了参考文献[6,15]所述方法对图 12 的处理结果。

可以看出,王昭莲^[6]所用方法本质上属于 Hough 变换的变形,未能有效解决直线参数空间特征峰值的自适应检测问题,且难以有效获取跑道目标的宽度信息,而曲延云^[15]所用方法,在图像分辨率较高时,SVM 分类所用 8 维特征并不能有效区分跑道和背

景区域,且对训练样本的选择依赖性较高。相比之下,文中方法对不同方向角、不同宽度,甚至存在局部几何畸变或局部遮掩的图像中的跑道目标(图 12 右上角图像)均具有较好的检测性能,从而说明文中算法检测跑道目标的有效性,且对目标局部畸变具有鲁棒性。

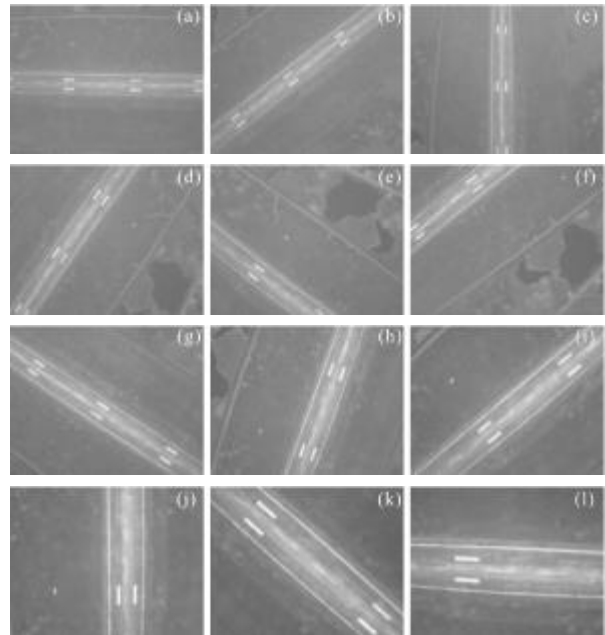


图 12 待处理图像

Fig.12 Images to be processed

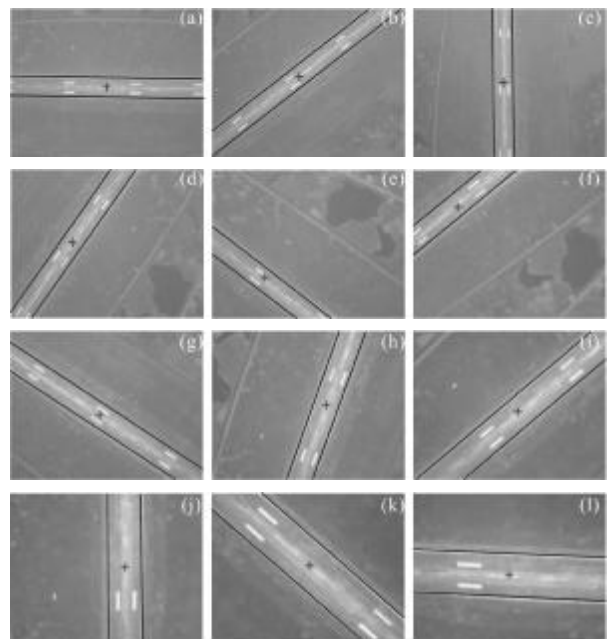


图 13 跑道目标检测结果

Fig.13 Results of runway detection

表 4 跑道检测结果

Tab.4 Results of runway detection

Orientation angle/(°)	Projection direction	Projection width	Geometric width
180	Vertical	34	34
39	Horizontal	44	34
90	Horizontal	34	34
55	Horizontal	42	34
142	Vertical	48	38
40	Vertical	51	39
146	Vertical	50	41
68	Horizontal	46	43
41	Vertical	70	53
90	Horizontal	60	60
139	Vertical	103	78
179	Vertical	79	79

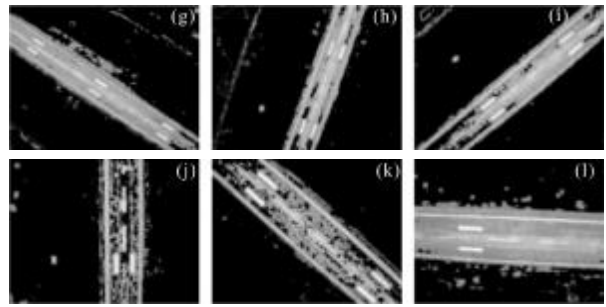


图 15 参考文献[15]所述方法的跑道目标检测结果

Fig.15 Runway detection results of Ref.[15]

3 结论

针对红外图像中机场跑道检测问题,文中提出了一种基于方向和宽度谱分析的处理方法。首先基于对图像进行灰度统计特性的计算,实现跑道目标区域与背景的初步分离,然后利用 Sobel 算子检测边缘,再通过统计计算得到跑道目标边缘方向谱,进而由方向谱的显著峰获取跑道主方向,以确定投影宽度谱扫描计算方向。结合宽度谱显著峰所对应的投影宽度和方向谱显著峰所对应的跑道主方向,完成跑道几何宽度的计算,从而实现红外图像中跑道目标的检测。对某型弹载红外成像探测器工作过程中获取图像序列数据集的处理结果表明,文中算法具有良好的检测性能,同时对几何畸变表现出良好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] Wu Jianxin, Li Cuihua, Wu Xiaonong, et al. A fast method of airport runway detection in aerial images [J]. Pa & Ai, 2006, 19(2): 262-265. (in Chinese)
吴健新, 李翠华, 吴晓农, 等. 航拍图像中机场跑道的快速检测[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(2): 262-265.
- [2] Fan Peilei, Yang Tao, Zhang Xiaojin, et al. Tracking method for the runway in image sequences of terminal sensitive projectiles [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(6): 887-889. (in Chinese)
范培蕾, 杨涛, 张晓今, 等. 末敏弹图像序列中跑道线目标的跟踪方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 887-889.
- [3] Wang Xin, Wang Bin, Zhang Liming. Airport detection based on Salient areas in reomte sensing images [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2012, 24

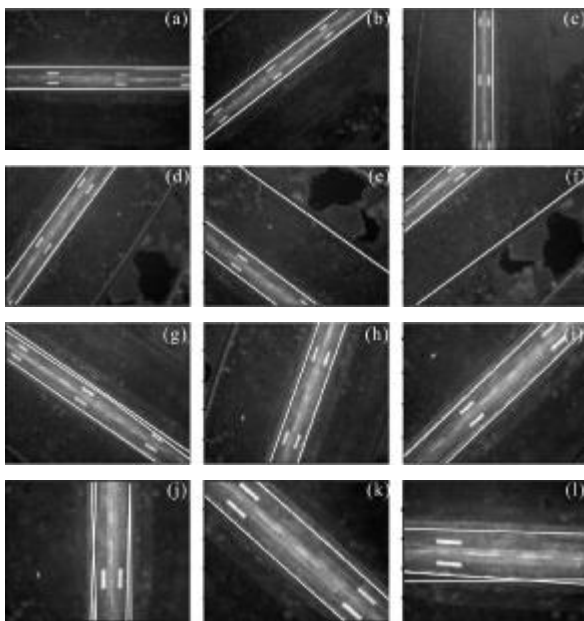
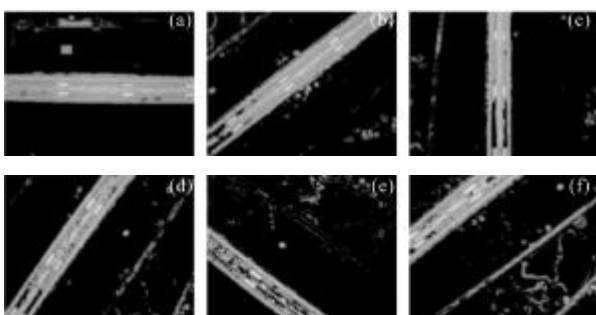


图 14 参考文献[6]所述方法的跑道目标检测结果

Fig.14 Runway detection results of Ref.[6]



- (3): 336-344. (in Chinese)
王鑫, 王斌, 张立明. 基于图像显著性区域的遥感图像机场检测 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 336-344.
- [4] Wang Zhaolian, Wu Lehua, He Shibiao. A speedy algorithm of airport recognition based on directional feature of the runway[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(1): 67-69. (in Chinese)
王昭莲, 吴乐华, 何世彪. 基于机场跑道方向特征的快速识别方法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(1): 67-69.
- [5] Li Xiaomao, Tang Yandong, Xiao Yingjie. Automatic airport runway recognition based on multi-scale linear object enhancement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(6): 733-736. (in Chinese)
李小毛, 唐延东, 肖颖杰. 多尺度线状目标的机场跑道识别[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 733-736.
- [6] Wang Zhaolian, Wu Lehua, Yang Wan. An effective algorithm of runway recognition based on edge map [J]. Electro-optic Technology Application, 2008, 23 (1): 70-81. (in Chinese)
王昭莲, 吴乐华, 杨琬. 一种有效的基于边缘图像的机场跑道识别算法[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 70-81.
- [7] Di Nan, Zhu Ming, Wang Yinan. Real-time detection of airport runway by extracting line feature [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2336-2341. (in Chinese)
邸男, 朱明, 王毅楠. 提取直线特征实现机场跑道实时检测[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2336-2341.
- [8] Dong Yinwen, Yuan Bingcheng, Shi Zhaoming, et al. Runway recognition algorithm in aerial image based on straight line characteristics [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(4): 876-879. (in Chinese)
董银文, 苑秉成, 石钊铭, 等. 基于直线特征的航拍图像机场跑道自动识别算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 876-879.
- [9] Cao Shixiang, Jiang Jie, Zhang Guangjun, et al. Airport runway detection based on long linear structure [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1078-1082. (in Chinese)
曹世翔, 江洁, 张广军, 等. 长线状特征下机场跑道检测方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1078-1082.
- [10] Ni Weiping, Xu Gangfeng, Li Biao, et al. Detection of band object based on the characteristics of cross-projection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 408-411. (in Chinese)
倪维平, 徐刚锋, 李彪, 等. 基于正交投影特性的带状目标检测[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 408-411.
- [11] Wang Yifan, Niu Zhaodong, Chen Zengping. Runway recognition in forward looking infrared image based on self-adaptive Gaussian filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S): 326-330. (in Chinese)
王一帆, 牛照东, 陈曾平. 基于自适应高斯滤波的红外机场跑道识别方法 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 326-330.
- [12] Wang Biao, Jiang Zhiguo, Zhao Danpei. Automatic target detection of airfield runway in remote sensing image by multi-feature extraction [J]. Chinese Journal of Stereology and Mage Analysis, 2009, 14(2): 120-124. (in Chinese)
王彪, 姜志国, 赵丹培. 基于多特征提取的遥感图像机场目标自动检测 [J]. 中国体视学与图像分析, 2009, 14(2): 120-124.
- [13] Xu Gangfeng, Wang Ping, Shen Zhenkang. Recognition of main-runway of airport based on skeleton [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 718-721. (in Chinese)
徐刚锋, 王平, 沈振康. 基于骨架特征的机场主跑道识别 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 718-721.
- [14] Wu Panlong, Zhang Ke, Li Yanjun. Automatic identification algorithm of airport runway detection algorithm based on mathematical morphology [J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(7): 21-23. (in Chinese)
吴盘龙, 张科, 李言俊. 基于数学形态学的机场跑道自动识别方法[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(7): 21-23.
- [15] Qu Yanyun, Zheng Nanning, Li Cuihua. Airport detection algorithm based on support vector machine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(6): 709-713. (in Chinese)
曲延云, 郑南宁, 李翠华. 基于支持向量机的机场检测算法[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(6): 709-713.
- [16] Hu Zhengping, Yang Su, Wang Chengru. Improved Hough transform hierarchical line detection method with parameter restriction based on local PCA [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11): 2747-275. (in Chinese)
胡正平, 杨苏, 王成儒. 基于局部 PCA 的参数约束 Hough 直线分层检测 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2747-275.