

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2003027

基于 RTK 定位的图像差分跑道异物检测*

张 怡 孙永荣 刘梓轩 鲁海枰 赵 伟
(南京航空航天大学 导航研究中心 南京 211106)

摘 要:机场跑道异物是威胁航空器飞行安全的重要因素之一,开展跑道异物的自动检测研究是有效保障航空器飞行安全的必然要求。针对异物检测问题,首先提出了基于 DGPS(differential GPS)定位的图像差分异物检测方法,通过载波相位差分(RTK)技术获取道面图像的高精度位置信息,对同一位置的两幅图像进行对齐操作以满足图像差分的条件,接着采用直方图规定化的方法来完成亮度矫正,再通过差分实现异物检测,最后进行了实验验证。实验结果表明,该方法可有效检测尺寸不小于 2 cm×2 cm 的异物。

关键词:异物检测;图像差分;RTK 技术;图像对齐;亮度矫正

中图分类号: TN06;V351.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Image difference detection of FOD based on RTK positioning

Zhang Yi Sun Yongrong Liu Zixuan Lu Haiping Zhao Wei
(Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Foreign object debris is one of the important factors that threaten the flight safety of the aircraft. To carry out automatic detection research of foreign object debris is an inevitable requirement to effectively ensure aircraft flight safety. Focus on detection of FOD, firstly an image difference method based on DGPS was proposed, this method used RTK to obtain high-precision position information of the image of runway and aligned two images in the same place to meet the conditions of image difference. Histogram for specification was also developed to complete brightness correction. Then FOD could be detected by image difference. Finally, experimental verification was carried out. Experimental results show that the method can effectively detect foreign objects debris on airport runways with no less than 2 cm×2 cm.

Keywords: detection of FOD; image difference; RTK; image alignment; brightness correction

0 引 言

机场跑道异物泛指散落在跑道上的、极有可能对航空器造成损伤的外来物质^[1],如飞机上掉落的零部件等。目前,我国绝大多数机场采用人工排查的方式对机场跑道、停机坪等区域进行巡查,该方法费时费力、效率低^[2],而且某些小体积异物(如螺钉等)在跑道上肉眼不易察觉,一旦被发动机吸入将会对航空器造成致命的伤害,甚至危及机上人员的生命^[3]。因此,跑道异物的自动检测研究是有效保障航空器飞行安全的必然要求^[4-5]。

国外对于异物检测的研究大多集中在毫米波雷达方面,其典型产品包括 FODFinder、FODetect 以及 Tarsier^[6]。基于光学摄像机的异物检测是当前研究的热点,而背景差分法是较为常用的方法^[7-11],该方法将当前帧图像与相应的背景模型进行差分^[12],若像素点差值的绝对值大于设定的阈值则认为该像素点属于前景图像。该方法可提供目标的完整特征描述,但是需要在跑道两侧架设塔台以及摄像机组来覆盖整条跑道,成本过高。除此之外,国内外也采用车载式检测的方法^[7],将相机搭载于移动平台在跑道上进行监测,根据图像特征来提取异物,该方法实时性较高,对硬件的要求较低,但是该方法在检测过



程中相机会发生抖动,特征提取的精度较低,从而影响了异物检测效果。

本文提出基于高精度位置信息的图像差分检测方法,该方法区别于传统意义上的背景差分法,融入了车载式检测的思想,在获得较高检测精度的同时,降低成本、提高实时性。如何在检测过程中为当前帧图像匹配到合适的背景图像并进行图像对齐是本文的研究重点。

1 基于载波相位差分 (RTK) 定位的图像差分

对图像进行差分的方法是像素级变化检测方法中应用最为广泛的一种,主要利用两幅图像中对应像素点的灰度差值与门限值进行比较^[13],以突出图像中变化的部分,其数学公式描述如下。

假设 $f_A(x, y)$ 为图像 A 对应像素点的灰度值, $f_B(x, y)$ 为图像 B 对应像素点的灰度值,将两幅图对应像素点的灰度值做差值,得到差分后的灰度值 $S_k(x, y)$ ^[14],即:

$$S_k(x, y) = |f_A(x, y) - f_B(x, y)| \quad (1)$$

设定一个门限值 T ,对上述差值按像素点进行如下二值化处理。

$$S_k(x, y) = \begin{cases} 0, & S_k(x, y) \leq T \\ 255, & S_k(x, y) > T \end{cases} \quad (2)$$

其中灰度值为 0 的均为两幅图像的相似内容,其余为变化部分。

由于差分法需要将背景图像与当前帧图像作差,因此要求背景图像与当前帧图像中除异物外的其余内容基本相同。本文所采集道面图像的展现形式为图像序列,且相机一直处于运动状态,因此需要以两幅待匹配图像的位置信息为基准进行匹配,其中关键的一步就在于如何在动态检测过程中找出当前帧图像所在位置的背景图像,即如何准确获取每一帧图像的位置信息,并进行位置匹配。由于小车轨迹、云台角度的偏差,无法找到与当前帧图像处于完全相同位置的背景图像,因此,本文选择背景图像序列中距离当前帧图像所在位置最近的图像作为其对应的背景图像。

GPS 差分定位技术中的 RTK 技术^[15-16]可用于获取图像的高精度位置信息,将移动站和相机安装在小车上,这样在获得机场跑道图像的同时,便可以根据移动站的位置通过线性插值解算得到此时图像所在的经纬度等高精度位置信息,并以当前帧图像所在位置为基准,通过计算经纬度的欧氏距离,在背景序列中寻找与其距离最近的背景图像。

2 图像对齐与矫正处理技术

由于当前帧图像和背景图像进行差分,两帧图像

存在位置误差,而且拍摄的角度、时间都不同,因此在差分前必须进行图像的对齐和亮度处理。

2.1 基于特征的图像对齐

上文通过当前帧图像和背景图像的位置匹配,找出了与当前帧图像距离最近的背景图像,由于存在位置误差以及拍摄角度的不同,在进行差分之前还需要进行图像对齐。

图像对齐指的是同一目标的两幅或两幅以上的图像在空间位置的对准,简单来说,就是找出源图像像素与待配准图像像素之间的空间映射关系,主要分为以灰度为基础的匹配和以特征为基础的匹配^[17]。

目前被广泛使用的是基于特征的匹配方法,如图 1 所示,主要分为 3 个步骤,为特征点提取、特征匹配和图像变换,其中提取特征点的部分是图像对齐的核心与基础。

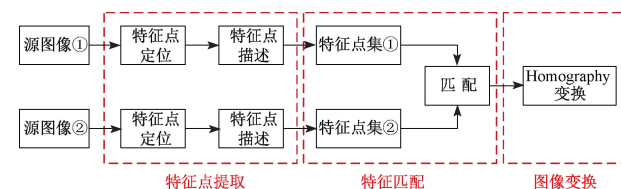


图 1 特征匹配流程

Fig. 1 Feature matching flow

考虑到异物检测对实时性有一定的要求,本文选用 ORB (oriented FAST and rotated BRIEF) 特征点进行匹配。ORB 特征点是一种局部不变二值特征,结合了 FAST 特征点检测算法和 BRIEF 描述子^[18],FAST 关键点用于检测局部像素灰度变化明显的地方,假设图像中存在一点 P ,其灰度值为 I_p ,以点 P 为中心,选取一定半径的圆,将圆上 16 个像素点的灰度值与 I_p 进行比较,若连续 N 个差值的绝对值大于设定阈值 T ,则认为该点 P 为特征点^[19]。

为了解决原始 FAST 特征点检测方法不满足尺度不变性的问题,ORB 算法构建图像金字塔,在金字塔的每一层上检测关键点。在获取关键点的基础上,通过灰度质心法为角点定向^[20],解决 FAST 算子不具有方向性的问题。完成特征点的检测后,ORB 算法通过 BRIEF 描述子对每一个检测到的特征点进行描述,根据特征点的主方向建立旋转矩阵,为每个特征点解算得到一个二进制编码作为其描述子。

找到可以用于匹配的特征后,利用汉明距离来度量两个特征描述之间的相似性,从而完成特征点的粗匹配,再利用 RANSAC 算法对错误匹配点进行剔除,得到最佳匹配点,并根据相似度较高的最佳特征匹配点对计算图像的单应性矩阵,采用 Homography 变换方法对待对齐图像进行补偿,完成图像的对齐。

2.2 图像亮度矫正

本文的视频检测涉及到像素级背景差分,因此对光



照的变化十分敏感,当相机处于光照不足的场景下会导致图像出现曝光不足的问题,从而影响异物的检测。为此,本文通过求解图像直方图的形式来判断图像是否属于曝光不足的情况,如图 2 所示,图 2 分别给出了曝光正常与曝光不足情况下图像的直方图。

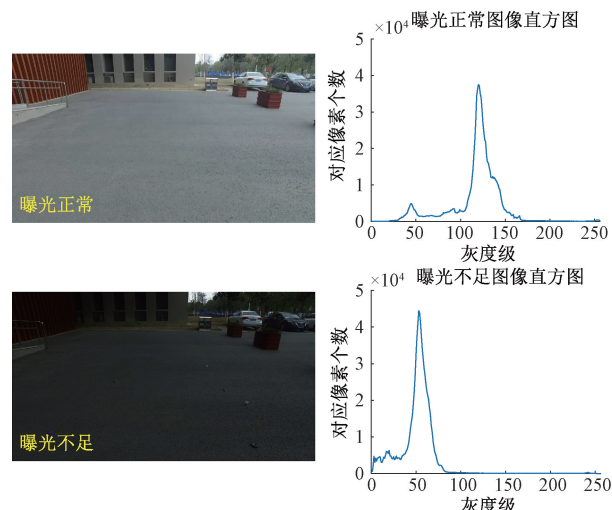


图 2 图像亮度及其直方图

Fig. 2 Image brightness digram and histogram

从曝光不足状态下的图像直方图可以看出,大部分灰度集中在直方图的左半段,而曝光正常的直方图中大部分灰度集中分布在中间段部分,因此,本文设定阈值 $I_{\min}$ 用于对图像的质量进行分析判断,若直方图中数量最多的灰度值小于 $I_{\min}$,则认为该图像的质量较差,需要对亮度进行调整,本文根据经验值取 $I_{\min} = 80$ 。

为了减少光照对于异物检测的影响,本文利用直方图规定化的方法,对待处理图像的直方图做出调整使其逼近规定直方图,对目标图像进行亮度矫正。

首先对目标图像和模板图像进行直方图均衡化处理^[21],得到目标图像的灰度变换函数 T 和模板图像的灰度变换函数 G ,其中函数 T 可表示为:

$$s = T(t) = (L - 1) \sum_{i=0}^{L-1} P_i(t_i) \quad (3)$$

式中: t 和 s 分别表示目标图像的输入灰度级与输出灰度级; $P_i(t_i)$ 指的是目标图像的灰度分布概率密度函数; L 为灰度级的数量。

模板图像的灰度变换函数 G 可表示为:

$$s' = G(m) = (L - 1) \sum_{j=0}^{L-1} P_m(m_j) \quad (4)$$

式中: m 和 s' 分别表示模板图像的输入灰度级与输出灰度级; $P_m(m_j)$ 指的是模板图像的灰度分布概率密度函数。

对目标图像的直方图进行规定,需要 $s = s'$, 可以得到:

$$m = G^{-1}(s') = G^{-1}(s) = G^{-1}[T(t)] \quad (5)$$

式(5)即为目标图像与模板图像之间的像素映射关系,根据该映射关系对目标图像进行逆变换,则可使目标图像的直方图分布逼近模板图像,从而减弱亮度的影响。

选取实验过程中一幅曝光不足的图像和一幅曝光正常的图像进行规定化操作,结果如图 3 所示。

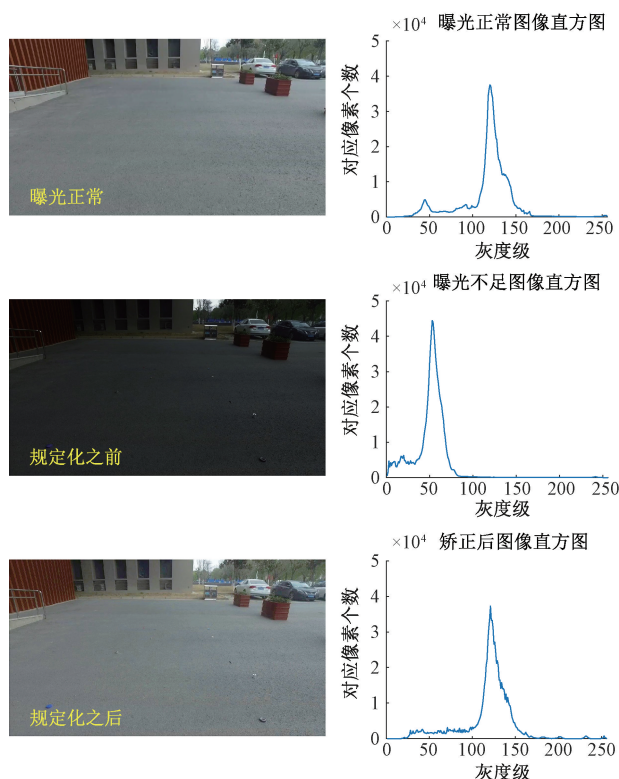


图 3 直方图规定化结果对比

Fig. 3 Results comparison chart of histogram specification

从图 3 可以看出,经过规定化操作,原本曝光不足的图像变得清晰,更适合用于检测分析。

3 实验测试与数据分析

3.1 数据采集系统硬件结构

本文设计的系统硬件结构主要包括移动平台(小车)、云台相机、卫星接收机和车载显示器等设备,如图 4 所示。

该系统主要分为图像采集与异物检测两个模块,其工作流程如图 5 所示,首先将云台相机与 RTK 定位设备固定在移动小车上,并连接基站与移动站,在跑道无异物的状态下循迹采集一组道面图像作为背景图像序列,然后在飞机起降前,在相同轨迹下以相同的速度对跑道进行检测,利用 RTK 差分定位技术为当前帧图像寻找与其位置最近的一张无异物背景图像,再利用特征匹配和直方图方法对当前帧图像进行补偿和矫正,并将背景图像与补偿后的图像进行差分运算以检测出异物。

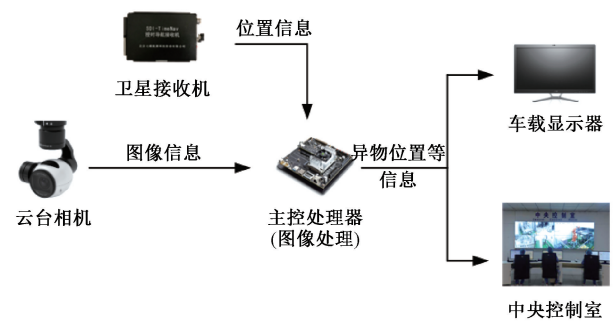


图 4 异物检测平台硬件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of FOD detection hardware platform

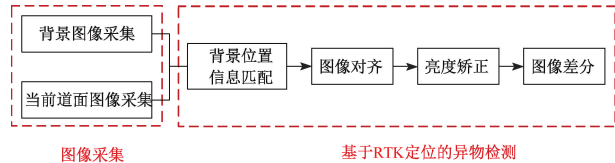


图 5 系统工作流程

Fig. 5 System workflow

3.2 测试与分析

本文的实验背景是机场跑道路面,一般为平坦的水泥路面或是柏油路面,由于场地限制,选择材质相近的路面进行实验,共两个实验场景,如图 6 所示。



图 6 实验场景

Fig. 6 Experimental scene

本文选取 20 个异物,包括金属、塑料、石子、植物等不同材质。按照投影面积的大小分为 3 类:1) $<2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$; 2) $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \sim 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$; 3) $>4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$, 如图 7 所示。异物检出处理效果如图 8 所示。

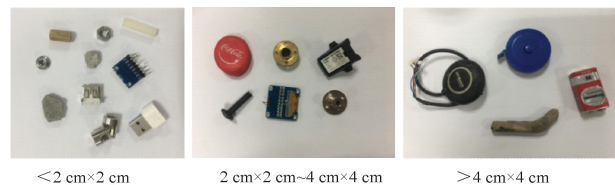


图 7 异物分类示意图

Fig. 7 FOD classification diagram

通过大量的试验,异物检测统计结果如表 1 所示。由表 1 数据可知,本文研究的算法可完全检测出 $>4\text{ cm} \times$

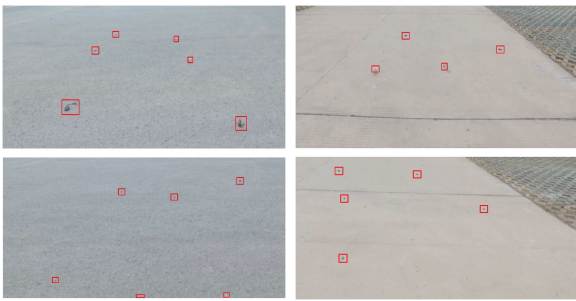


图 8 异物检测场景效果

Fig. 8 Effect of FOD detection

表 1 异物检测实验统计结果

Table 1 Statistical results of FOD detection experiments

异物大小	场景 1 下的异物检出率/%	场景 2 下的异物检出率/%	异物平均检出率/%
$<2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	62.0	34.0	48.0
$2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \sim 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$	97.0	90.0	93.5
$>4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$	100.0	100.0	100.0

4 cm 的异物且对于 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \sim 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的异物的检测效果较好,但由于实验条件的限制,采集背景图像与当前帧图像时的小车轨迹以及拍摄角度偏差过大,从而导致为当前帧图像匹配到的背景图像误差增加,对尺寸 $<2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的异物检出率产生较大影响,检测效果一般。因此,本文提出的基于 RTK 定位的图像差分跑道异物检测算法适用于尺寸 $\geq 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的异物。

本文采用的异物检测算法是在传统背景差分法的基础上融入车载式检测的思想,在一定程度上改善了背景差分法成本过高以及动态检测方法中由于特征提取精度较低而影响检测效果等问题。图 9 与 10 所示分别对比了 3 种检测方法在不同场景下的异物检出率,其中动态检测方法以运用较多的基于视觉显著性模型 (ITTI) 的异物检测算法为例。

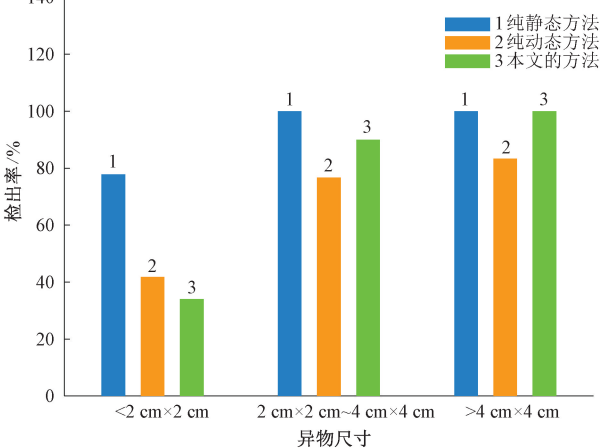


图 9 场景 1 下的异物检出率对比

Fig. 9 Comparison chart of FOD detection rate under scene 1

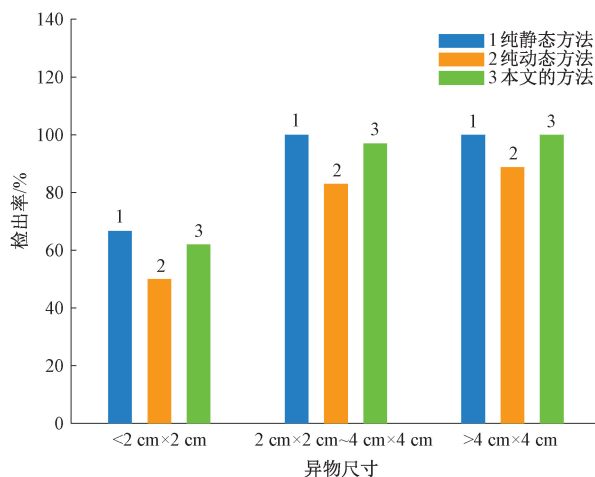


图 10 场景 2 下的异物检出率对比

Fig. 10 Comparison chart of FOD detection rate under scene 2

从图 9、10 可以看出,对于尺寸 $\geq 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的异物,本文的方法相较于基于特征提取的动态检测方法更有优势。除此之外,图中背景差分法的异物检出率最高,但是该方法将相机安装在跑道两侧,每一部相机的覆盖范围有限,需要多部相机共同运作,成本较高且资源利用率较低,而车载式检测通过在跑道上循迹扫描的方式可依靠一部相机完成对整条跑道的检测。

因此,从检出率、覆盖范围、成本的角度综合考虑,采用本文提出的基于 RTK 定位的图像差分跑道异物检测算法来检测机场跑道上的外来物更具优势。

4 结 论

本文对机场跑道异物的检测算法进行研究,提出了基于高精度位置信息的图像差分异物检测方法。本文首先介绍了基于 RTK 定位的差分方法的关键,即以位置为基准的图像匹配,然后介绍了实现待检测图像与背景图像对齐的方法和受光照影响较大时采用的矫正方法,最后本文对以上提出的算法进行了实验的验证,并与传统的背景差分法及基于视觉注意机制的动态检测算法在异物检出率、相机覆盖区域、成本三方面进行了对比。实验结果表明,该算法可以实现对尺寸 $\geq 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的异物的有效检测。

参考文献

[1] ZHONG Q, ZHANG ZH J, YAN D Q, et al. Airport runway FOD detection based on LFM CW radar using interpolated FFT and CLEAN [C]. IEEE International Conference on Computer & Information Technology, 2012, DOI:10.1109/CIT.2012.160.

[2] ÖZTÜRK S, KUZUCUOĞLU A E. A multi-robot

coordination approach for autonomous runway foreign object debris (FOD) clearance [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 75: 244-259.

[3] PATTERSON J R J. Foreign object debris (FOD) detection research [J]. International Airport Review, 2008(2): 22-27.

[4] YONEMOTO N, KOHMURA A, FUTATSUMORI S, et al. Broad band RF module of millimeter wave radar network for airport FOD detection system [C]. International Radar Conference-surveillance for A Safer World, IEEE, 2009:1-4.

[5] 李俊锋,牛合利. 基于 OpenCV 的机场跑道异物检测系统设计与研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(9): 2736-2738,2744.

LI J F, NIU H L. Design and research of airport runway foreign body detection system based on OpenCV [J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(9): 2736-2738,2744.

[6] 李煜,肖刚. 机场跑道异物检测系统设计与研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(8): 909-915.

LI Y, XIAO G. Study and design on FOD detection and surveillance system for airport runway [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(8): 909-915.

[7] 高宏伟,王慧科,李卓. 一种改进的机场跑道异物检测算法研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(S1): 205-208.

GAO H W, WANG H K, LI ZH. Investigation of improved FOD detection algorithm [J]. Computer Science, 2015, 42(S1): 205-208.

[8] 郭保青,杨柳旭,史红梅,等. 基于快速背景差分的高速铁路异物侵入检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1371-1378.

GUO B Q, YANG L X, SHI H M, et al. High-speed railway clearance intrusion detection algorithm with fast background subtraction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1371-1378.

[9] 任克强,高晓林. 基于五帧差和二维 Renyi 熵的运动目标检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1179-1186.

REN K Q, GAO X L. Moving object detection based on five-frame difference and two-dimensional Renyi entropy [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1179-1186.

[10] ENEZETH Y, JODOIN P M, EMILE B, et al. Comparative study of background subtraction algorithms [J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(3): 033003.

[11] BRUTZER S, HOFERLIN B, HEIDEMANN G, et al.



- Evaluation of background subtraction techniques for video surveillance [C]. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2011: 1937-1944.
- [12] 郑浦, 白宏阳, 李政茂, 等. 抖动干扰下运动目标精准检测与跟踪算法设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 90-98.
- ZHENG P, BAI H Y, LI ZH M, et al. Design of accurate detection and tracking algorithm for moving target under jitter interference [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 90-98.
- [13] 赵军香, 梁兴东, 李焱磊. 一种基于图像差值的跑道异物检测算法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 17-23.
- ZHAO J X, LIANG X D, LI Y L. FOD detection approach based on image difference [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(9): 17-23.
- [14] 闵永智, 岳彪, 马宏锋, 等. 基于图像灰度梯度特征的钢轨表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 220-229.
- MIN Y ZH, YUE B, MA H F, et al. Rail surface defects detection based on gray scale gradient characteristics of image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 220-229.
- [15] 马松辉, 芦永超, 刘可佳, 等. 基于小型无人机的高精度天线测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 36-42.
- MA S H, LU Y CH, LIU K J, et al. Accurate antenna measurement method based on micro UAV [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2019, 40(5): 36-42.
- [16] 谢俊宇, 周严. 基于 GPS 的地震勘探差分定位系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 150-154.
- XIE J Y, ZHOU Y. Design of seismic exploration difference positioning system based on GPS [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(8): 150-154.
- [17] 陈丽芳, 刘渊, 须文波. 改进的归一互相关法的灰度图像模板匹配方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(26): 181-183.
- CHEN L F, LIU Y, XU W B. Improved normalized correlation method of gray image template matching method [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(26): 181-183.
- [18] 丁小艳, 王婷. 基于交叉检验 ORB 和 MCC 的图像模板匹配算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 39-45.
- DING X Y, WANG T. Image template matching algorithm based on cross-check ORB and MCC [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(5): 39-45.
- [19] 张倩, 吕丽平. 基于 ORB 与局部仿射一致性约束的快速人脸特征配准[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 38-44.
- ZHANG Q, LV L P. Fast face feature registration based on ORB and local affine consistency constraints [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 38-44.
- [20] 张磊, 郑子健, 张殿明, 等. 一种改进的 ORB 图像匹配算法[J]. 现代电子技术, 2020, 43(3): 27-30, 35.
- ZHANG L, ZHENG Z J, ZHANG D M, et al. An improved ORB image matching algorithm [J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(3): 27-30, 35.
- [21] 谭东杰, 张安. 基于局部直方图规定化的红外图像非均匀性校正[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 325-328.
- TAN D J, ZHANG AN. Non-uniformity correction based on local histogram specification [J]. Infrared Technology, 2013, 35(6): 325-328.

作者简介



张怡, 2019 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与视觉导航技术。

E-mail: zy152097@163.com

Zhang Yi received her B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2019. Now she is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interest includes image processing and navigation technology.



孙永荣, 分别在 1991 年于南京航空学院获得学士学位, 1997 年和 2004 年于南京航空航天大学获得硕士学位和博士学位, 现为南京航空航天大学教授, 主要研究方向为惯性导航与组合导航、图像/视觉导航技术。

E-mail: sunyr@nuaa.edu.cn

Sun Yongrong received his B. Sc. degree from Nanjing Aeronautical Institute in 1991, M. Sc. and Ph. D. degrees from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1997 and 2004, respectively. Currently he is a professor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include inertial navigation and combination navigation, visual navigation technology.