

机场跑道异物检测系统设计与研究

李煜, 肖刚

(上海交通大学航空航天学院, 上海 200240)

摘要:对机场跑道异物 FOD (foreign object debris) 快速精确的检测与告警已经成为保障飞机飞行安全急需解决的重大问题, 一个有效的智能机场跑道安全检测系统是机场飞行安全保障体系应有的组成部分。依据 FAA 对 FOD 检测系统的性能要求, 借鉴国外现有探测系统, 提出了一种新的跑道安全检测系统方案, 重点分析 FOD 探测系统中毫米波雷达、光学系统的关键技术及其他系统间的数据交互定义, 并开展了系统软件界面设计。系统最终可以对 FOD 全天时、全天候、全自动的检测, 具有异物分类识别及告警能力, 可以有效的预防和降低跑道异物对机场跑道安全的威胁。

关键词: FOD; 机场跑道; 检测系统; 数据融合

中图分类号: TN959.1⁺7; TP391.41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.018

Study and design on FOD detection and surveillance system for airport runway

LI Yu, XIAO Gang

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Quick and precise detection and alarm to Foreign Object Debris (FOD) are significant issues for airplane's safety. An effective FOD detection and surveillance system for runway is an important part of airport security system. Based on the performance requirements of FOD detection and surveillance system and other nations' experiences, through the detail analysis of millimeter-wave radar system, optical system and their data interaction, a new FOD detection and surveillance system is presented. The interface of software is promoted. The system, which can classify and warn FOD all the time and under all-weather condition, will prevent and reduce threaten from FOD to airport runway.

Key words: FOD; airport runaway; detection and surveillance system; data fusion

1 引言

FOD 指的是任何不属于机场但出现在机场运作区域并可能对机场造成损失或者飞机造成损害的外来物品^[1]。典型的 FOD 目标有: 混凝土沥青碎块、金属器件、橡胶碎片、塑料制品、动植物。目前, 国内机场跑道监察工作主要靠道面巡查人员每天四次步行检查完成, 在道面巡查时将关闭跑道, 这使得航班通行能力大大降低。随着实时视频监控技术和计算机视觉目标识别技术日益成熟, 开发自动化的机场跑道异物检测系统已经成为可能。

为了快速检测并清除机场跑道异物, 文中提出

了一种全天时、全天候、全自动、高检测率的机场跑道异物检测系统。系统包括由毫米波雷达、可见光摄像机、红外热成像摄像机组成的探测传感器和在机场现有网络下构建的数据通讯网及 FOD 实时告警系统, 采用毫米波雷达信息, 可见光、红外图像信息多源数据融合的目标识别分类处理算法。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 60904096); 中航工业集团创新基金资助。

作者简介: 李煜 (1987 -), 男, 硕士生, 研究方向为信息融合与模式识别。E-mail: antlee1024@163.com

收稿日期: 2011-03-04

2 国外现有系统分析

2000 年 7 月,法航协和号飞机失事后,各国开始了对 FOD 探测系统的研制,比较典型的有英国开

发的 Tarsier Radar 系统、以色列开发的 FODetect 系统、美国开发的 FODFinder 系统和新加坡开发的 iFerret 系统。各系统的特点如表 1 所示。

表 1 国外检测系统分析

Tab. 1 analysis of international FOD systems

	FODFinder	FODetect	iFerret	Tarsier Radar
Nation	USA	Israel	Singapore	UK
Equipment	MW Radar; Optical camera; Infrared light	MW Radar; Optical camera; Infrared light	Visible camera	MW Radar; Optical camera; Infrared light
Detection	Radar scanning	Radar scanning	Image Processing	Radar scanning
Confirmation	Manual	Manual	Auto	Manual
Location	Vehicle	Runway edge light	Pylon	Pylon
Advantages	Detection to all airport area beside runaway	No interference from edge lights	The cost is lower than optical-radar system	The technology matured; Having several applications
Disadvantages	Manual-confirmation; Limitation of detection range	Manual-confirmation; Large scale of system	Interference under bad weather condition	Manual-confirmation

美国的 FODFinder 系统主打车载式移动探测平台,这种方式没有根本改变需要人为参加 FOD 检测的模式,而仅仅是使得检测清理过程机械化,这一系统比较适合小型机场。以色列的 FODetect 系统,产品体积较小,安装在跑道边灯,由 120 套子探测器覆盖整个机场跑道,这种模式可以有效的避免跑道边灯对探测系统的影响,但其工作环境紧邻飞机,受强风,油污侵蚀严重。同时子探测器规模庞大,系统的开发,维护成本较高。新加坡的 iFerret 智能检测系统使用了星光级摄像设备,摄像系统 24 h 对机场跑道进行拍摄以获取目标,这种工作模式图像处理数据量大,过程复杂,致命的缺点是可见光摄像机受光照影响很大,在跑道积水和黑夜的条件下检测效率低。英国的 Tarsier Radar 系统是目前较成熟的 FOD 检测系统,在多个国家的机场安装,其第一代产品只有毫米波雷达,安装在跑道一侧,其后产品又加入了可见光及红外灯光学摄像设备。Tarsier Radar 系统虽然加装了光学摄像机,但其仅只是方便工作人员对 FOD 进行人工识别,Tarsier Radar 系统仍然没有脱离需要人工判断 FOD 这种模式。随着可见光、红外图像融合识别技术的发展和红外热成像设备成本的降低,使用可见光摄像机与红外热成像摄像机对 FOD 目标采集图像并进行图像融合检测与识别,可实现 FOD 检测系统的全天候、全天时与全自动。

3 系统设计与研究

3.1 系统基本功能

根据 2009 年 FAA 咨询公告中给出的参考^[2],提出了 FOD 系统应具备的基本功能要求:①在各种环境条件下 24 h 对跑道进行监视;②同时对多个

FOD 目标进行检测与识别并给出不同级别的告警信号;③建立 FOD 数据库记录详细的 FOD 信息以便后期调查分析。相应的系统基本性能指标:①1.2 km 外能探测到直径 3 cm 的未经涂色的球体;②可以分辨出相距 3 m 的两个 FOD;③在 4 min 以内完成从 FOD 发现到识别与告警。

3.2 总体方案

机场跑道异物检测系统方案:由毫米波雷达实时扫描跑道检测 FOD 目标,光学摄像机拍摄 FOD 目标,使用终端数据处理计算机对毫米波雷达信息,可见光、红外图像信息进行综合处理,通过机场现有网络发出 FOD 威胁告警并将识别结果及其他信息告知监控中心和清理站,再完成处理后 FOD 数据库记录目标信息。

毫米波雷达作为现代雷达技术发展的一个重要组成部分,其高分辨率的探测能力可以精确的检测到跑道道面上的微小异物。为了能快速地提取 FOD 目标的各种特征,判断其对机场跑道的威胁等级,及时报警,加入可见光摄像机系统对 FOD 目标拍照分析。而可见光视频系统受光照,天气等因素的影响较大,因此引入红外热成像摄像机系统辅助对跑道异物目标进行检测和识别。系统由 3 个工作平台构成:监控塔,监控中心,FOD 清理工作站。三个工作平台通过机场现有网络进行数据交换与通讯。

探测传感器安装于监控塔上,监控塔安装在距跑道 200 m 处,高度 7 m^[3]。传感器塔架安装模式有很多优点,单一的塔架上空间充足,可以配置体积稍大的探测器提高其性能,可以配置探测器保护装置保护设备,同时各传感器安装比较集中,可使用同

一个终端信息计算机及时分析处理与传输数据。

系统的物理分布方案如图 1 所示,图中包含监控塔、监控中心、FOD 清理工作站 3 个主要的工作平台。表 2 为 3 个系统所对应的机场设施以及各个机场设施包含的硬件。

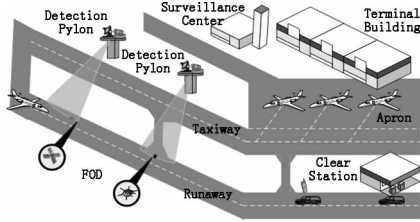


图 1 物理分布图

Fig. 1 distribution map of system

表 2 硬件设备表

Tab. 2 equipments of each station

	Equipment
Detection Pylon	MW Radar; Optical camera; Pan; Switcher; computer of FOD data processing
Surveillance center	Switcher; System server; Monitor terminal; System backup server
Clear Station	Switcher; PDA; vehicle; Clear tools

检测系统的主要工作流程如下:

Step1 系统启动,工作人员就位,硬件系统启动,软件系统自检。

Step2 监控塔毫米波雷达开始对机场跑道进行不间断扫描。

Step3 当雷达检测到异物时,启动实时警报,并将 FOD 目标距离位置信息发给光学摄像机。光学摄像机对 FOD 进行拍照,根据光学图像对 FOD 目标进行识别并给出威胁等级。

Step4 监控塔将 FOD 完成识别的数据传送给监控中心,监控中心做出决定是否需要清理,如果光学相机未能完成 FOD 识别,则监控中心可手动操控雷达和光学相机对 FOD 目标进行人工验证与确认。

Step5 收到监控中心清除 FOD 指令后,清理工作站派出工作人员回收 FOD,并把清理信息与 FOD 现场数据上传监控中心,监控中心整理数据并保存。

系统工作流程图如图 2 所示。

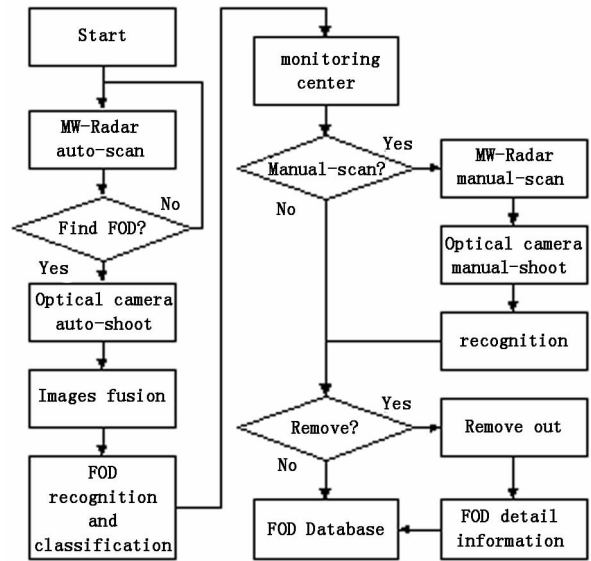


图 2 系统工作流程图

Fig. 2 flowchart of operation of system

根据智能机场异物检测系统设施及设备表,设计了该系统的网络拓扑图,整个网络采用星型网络拓扑。网络传输的介质根据监控塔与机场塔台控制中心的距离远近,使用光纤或是其他传输介质。数据处理终端处理雷达、可见光、红外图像和视频信息,并将 FOD 自动识别的结果进行集成发送给 FOD 数据处理中心。FOD 数据处理中心接收数据信息及时显示,并进行数据二次处理并存储,同时系统服务器提供传感器的控制功能,方便机场监控人员控制各个传感器或监视其的工作状态。数据备份服务器用于实时存储当前的机场跑道路 FOD 信息,监控中心将 FOD 信息传送给跑道清理人员,指导清理人员快速清理 FOD。整个系统架构如图 3 所示。

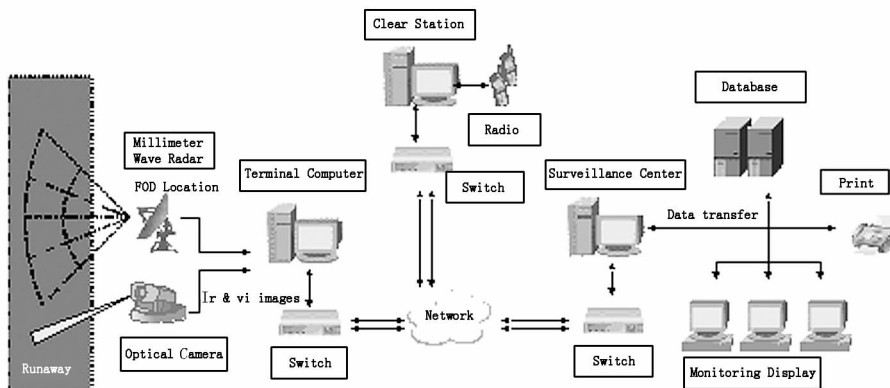


图 3 网络拓扑图

Fig. 3 structure of system

3.3 探测系统

3.3.1 毫米波雷达

毫米波雷达相对于微波雷达天线和微波元器件较小,很适合安装在机场跑道附近。毫米波雷达主要功能是在自动巡视状态下全天不间断的对跑道进行扫描,检测到 FOD 时触发警告,绘制 FOD 机场位置图,将 FOD 的距离和坐标信息发送给光学摄像机。在手动操作时,响应 FOD 监控中心进行远程操控。

毫米波雷达测量的距离分辨率和测量距离的两个重要性能指标^[4]。

雷达的距离分辨率正比于匹配滤波后的接受脉冲宽度,反比于带宽,公式为:

$$\Delta R = \frac{c\Delta\tau}{2} \quad (1)$$

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2)$$

式中, ΔR 为距离单元长度; c 为光速; $\Delta\tau$ 为匹配接受的脉冲宽度; $B = 1/\Delta\tau$ 为发射信号的带宽。实际雷达需要的距离分辨率的高低是相对于目标的。当 FOD 目标沿雷达视线方向的尺寸 L 大于等于 ΔR 时,雷达即可分辨,并将其视为一个点目标或面目标。

毫米波雷达系统采用收发公用一台天线,下式为雷达的探测距离的估算公式:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t A_t^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_r^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中, R_{\max} 为雷达探测的最远距离; σ 为目标散射面积(RCS); P_t 为雷达发射功率; A_t 为接受天线的有效面积; G 为天线增益; S_{\min} 为雷达可检测到的最小回收信号功率。两公式可通过天线增益和有效面积之间的关系 $G = 4\pi A/\lambda^2$ 来转换,而且公式未考虑设备的实际损耗,环境噪声等因素,方程中目标有效散射面积 σ 和最小可检测信号 S_{\min} 可通过大量现场实验求得经验数据。

式(3)、式(4)中除了 σ 散射面积其他参数均与雷达有关,FOD 目标种类繁多,不同属性的 FOD 目标,其散射面积 σ 计算方法不同而且比较复杂^[5],但典型的 FOD 目标是厘米级的物体,尺寸远大于毫米波雷达的波长,处在光学区,其散射面积就是其几何光学投影面积。

毫米波雷达根据自身探测性能和探测的目标需要配备相应的转动平台。处在自动工作模式时,毫

米波雷达全天对跑道进行扫描检测,为了保证飞机在跑道上的安全,毫米波雷达对整个跑道的扫描时间应该低于两架次飞机通过跑道的的时间。根据不同机场航班起降的频繁程度可调整雷达转动平台的转动速度。

雷达扫描速度的公式为:

$$\text{转动扫描速度} = \frac{\text{航班起降间隔时间}}{180^\circ} \quad (5)$$

3.3.2 光学摄像机

光学摄像机系统由可见光摄像机与红外摄像机组成,主要功能是在接收到毫米波雷达系统给出的 FOD 目标距离坐标信号后对 FOD 目标进行拍摄。

可见光摄像机主要用于光照和天气条件较好的环境下拍摄。FOD 目标环境图像、FOD 目标精确图像对后期 FOD 目标的检测和识别有很重要的作用,因此可见光摄像机具备同时拍摄广角整体场景图像和窄角局部精细图像的能力,选用变焦能力较强的镜头即可满足要求。镜头焦距与镜头视场角的关系为:镜头焦距越长,其镜头的视场角就越小。在镜头焦距一定的情况下,镜头规格与镜头视场角的关系为:镜头规格越大,其镜头的视场角也越大。因此在镜头物距一定的情况下,随着镜头焦距的变大,拍摄到的画面范围就越小,但画面细节越来越清晰,反之亦然。

根据机场跑道背景相对简单的特点,根据经验信息要实现 FOD 目标 3 cm × 3 cm 大小物体在可见光图像中的检测,一般来说需要 4 × 4 像素,而要达到目标识别,需要 15 × 15 像素。

空间分辨率是一个相机所能分辨的最小角尺度,它对相机的探测能力极为重要,可以通过下式得出空间分辨率:

$$\alpha = \frac{d}{f} \quad (6)$$

式中, α 为相机某一方向上的空间分辨率(mrad); d 为探测器与 α 同一方向上的像元尺寸(μm); f 为相机镜头的焦距(mm)。

而相机某一方向上的像元尺寸又与所选相机的成像 CCD 靶面尺寸和相机成像像素有关:

$$d = \frac{W}{N_1} \quad (7)$$

$$d = \frac{H}{N_2} \quad (8)$$

式中, d 为探测器与 α 同一方向上的像元尺寸(μm); W, H 为相机 CCD 靶面尺寸(μm); N_1, N_2 为相机成像的像素。

根据相机常用的探测和识别能力判定准则,在目标图像有足够对比度的情况下,可以由下式得出相机对特定目标的探测和识别距离。

$$L = \sqrt{\frac{ab}{\alpha\beta n_1 n_2}} \quad (9)$$

式中, L 为相机的作用距离(km); a, b 为目标水平、垂直尺寸(m); α, β 为相机的水平、垂直空间分辨率(mrad); n_1, n_2 为目标水平、垂直像素数。

由式(9)可以得出FOD目标成像像素数与摄像机参数,目标自身参数的公式:

$$n_1 n_2 = \frac{N_1 N_2 f^2}{WH} \cdot \frac{ab}{L^2} \quad (10)$$

公式的右边第一项是摄像机相关参数,右边第二项是目标相关参数。例如采用2000 mm焦距镜头,4.8 mm×3.6 mm成像CCD,1600×1200像素的光学摄像机在1.2 km外检测3 cm×3 cm大小的FOD目标成像像素为277,可以达到FOD的检测与识别。

红外热成像摄像机是被动接受目标自身的红外热辐射,与气候条件无关,无论白天黑夜均可以正常工作,红外线的波长较长,克服雨、雪、雾的能力较高。在完全无光时对物体成像,也可以在浓厚的烟幕、云雾中探测FOD目标。在可见光图像中类似沥青碎块等FOD目标与背景跑道几乎没有差别,单一可见光探测器将会很难完成检测和识别任务,而在热成像摄像机中分辨的是FOD目标与跑道的热辐射差异,因此红外图像中很容易从跑道背景检测出目标^[6-7]。

热成像相机中依然要考虑镜头、CCD尺寸、成像像素等因素,选择的依据与可见光相机的相同,一般情况,热成像相机的CCD像元较大。对于单一的热成像红外图像,目标成像2×2像素以上即可判为可以检测,成像5×5像素即可判为可以识别。

光学摄像机配备特制的转动平台,摄像机在毫米波雷达检测到FOD目标后对其瞄准拍照。为了后期的FOD目标识别算法及信息综合处理能有充裕时间,需加速光学摄像机云台的转动速度。毫米波雷达可以精确的测量FOD目标的距离和坐标信息,因此预先在系统中建立一个雷达位置坐标(X, Y)与光学摄像机转台俯仰水平角度(θ, φ)的函数表,同时也建立一个雷达探测距离 l 与相机焦距 f 的函数表,使用查找法快速瞄准和聚焦拍摄FOD。同时考虑到在一次雷达扫描过程中,可能检测到多个FOD,光学摄像机将对这些目标进行逐一拍摄,然而跑道上不同位置的FOD其威胁等级也是不同

的。对于处在高威胁区域的FOD应该优先处理。光学摄像机云台控制系统建立一个待拍摄FOD的队列,每次有新的拍摄任务时,预先对新FOD的位置信息进行预判,如果位置威胁等级高,则插入到队列头,光学摄像机中断当前拍摄优先拍摄高威胁区域的FOD。

3.4 数据处理系统

3.4.1 基于图像融合的FOD检测与识别

目标检测与识别算法是机场跑道异物检测系统数据处理的核心,在总体方案设计时为了能在各种光照和天气条件下检测和识别目标,使用了可见光摄像机和热成像相机两套独立的传感器。然而机场跑道异物检测系统有明确的时间性能要求,因此融合识别的算法必需综合考虑算法识别概率与算法识别速度^[8],现提出融合算法策略如图4所示。

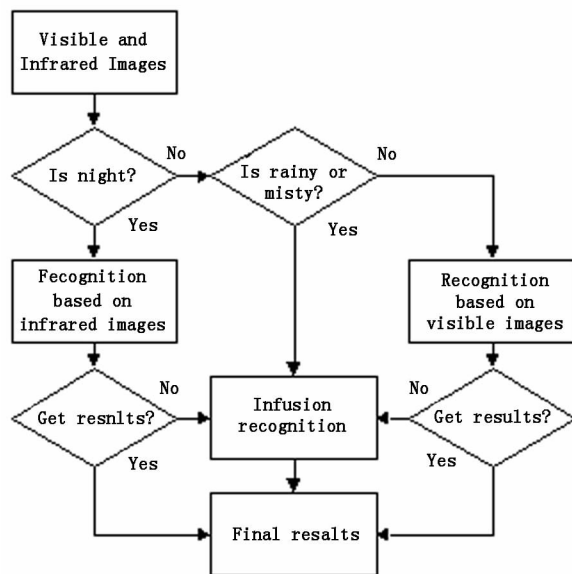


图4 融合算法策略

Fig.4 strategy of infusion and recognition algorithm

白天使用可见光图像信息识别,黑夜使用红外图像信息识别,当单传感器信息拒绝给出识别结果时,使用融合识别。其中单传感器的识别算法使用有监督的机器学习机制的神经网络算法。利用大量的FOD目标样本图像对识别算法进行训练,还可将在应用过程中出现的FOD目标对分类器进行再学习。可见光、红外图像融合使用决策级的融合算法。这一识别算法策略的优势是通过大量的先验信息来加快算法的识别速度。

3.4.2 目标分类与告警

系统根据FOD目标识别的结果给出相对应的告警等级,辅助工作人员做出决策。FOD目标的种类和大小决定其威胁程度,中国民航总局机场司民

航局安全技术中心给出了常见 FOD 目标的威胁等级^[1], 现再根据 FOD 目标在跑道的位置, 给出系统的参考告警等级与处理策略, 如表 3 所示。

表 3 FOD 威胁等级

Tab.3 level of hazard FOD

FOD	Midway of runway	Ends of runway
Metal fragment	High	Medium
Plastic fragment	High	Medium
Paper Product	Medium	Low
Rubber Product	Low	Low
Stone fragment	Medium	Low
Plant and Animal	Low	Low

安装在 FOD 监控中心的远程监控显示系统根据接收到的数据等级做出适当的显示与警告, 如表 4 所示。FOD 目标显示高中低不同威胁等级时, 界面用红黄绿三种灯告警, 使用不同频率声音告警。监控中心根据计算机提供的自动告警信息与建议处理措施, 可以立即做出决策通知清理目标, 也可调用光学摄像机提供实时画面, 进一步确认后做出决策。

表 4 FOD 告警系统

Tab.4 alerts and alarms of the system

Threaten Level	Color Warning	Sound Warning	Solution and Suggestion
High	Red	High-frequency	Close runaway and remove FOD immediately
Medium	Yellow	Mid-frequency	Close runaway and remove FOD later
Low	Green	Low-frequency	Ignored

3.4.3 数据通讯

当终端计算机完成对 FOD 目标的分析识别后, 将把 FOD 目标的图像与识别结果信息发送给监控中心, 监控中心根据识别结果向雷达或摄像机系统发送指令, 这些信息数据量不大, 现有局域网带宽可

以满足要求。然而机场跑道系统的一个重要功能是为监控中心的管理人员提供实时的跑道异物视频, 摄像机采集的每帧数据为 752 × 582 × 24 位, 每秒 25 帧, 及每秒采集的数据量在 30 M 字节左右, 普通的 10/100 M 局域网带宽不能满足需求。为了获得高压缩率和高质量的 FOD 监控视频, 系统采用 Divx MPEG-4 对采集视频压缩编码。MPEG-4 是基于第二代压缩编码技术制定的国际标准。它以视听媒体对象为基本单元, 采用基于内容的压缩编码。以实现数字视音频、图形合成应用及交互式多媒体的集成。MPEG-4 标准带宽的适应能力强, 编码效率高, 具有良好的兼容性、伸缩性和可靠性。

3.4.4 数据管理

FOD 数据信息是整个系统工作的基础, 建立完善可靠的 FOD 数据库是为准确发现威胁源提供了数据保障, 通过查询分析历史数据采取针对性措施可预防 FOD 的损伤危险。

目标识别与分类算法中选取适当的计算机视觉特征和阈值系数可以有效地对 FOD 进行分类, 在监控塔的处理终端上建立 FOD 视觉特征数据库, 预先根据实验样本建立基础数据库, 每发现一个 FOD 可更新一次数据库使得目标识别算法不断完善更加有效。

监控中心的 FOD 数据处理中心上建立 FOD 基础信息数据库和 FOD 处理结果数据库。基本信息包含每个 FOD 目标的详细信息, 包括时间、位置、大小、类别等。FOD 处理结果数据库记录清理 FOD 后得到的反馈, 包括处理时间, 处理人员, 是否有损伤以及 FOD 真实信息等, 通过 FOD 处理结果数据库及时修订 FOD 基本信息和改善识别算法分类器。

机场跑道异物检测系统数据库结构如图 5 所示。

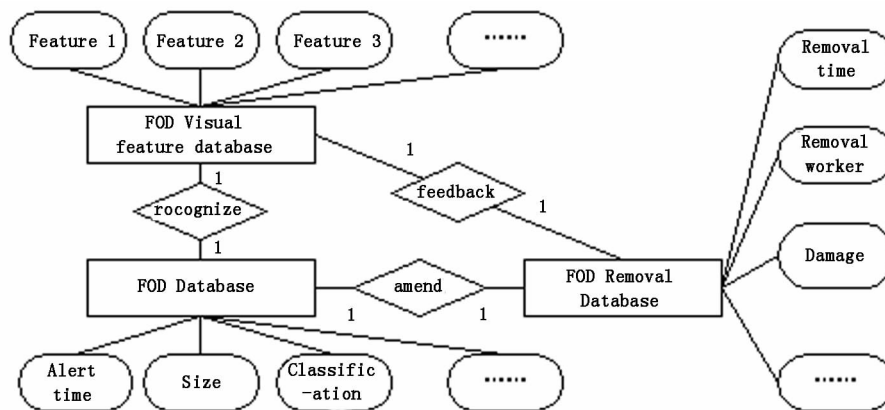


图 5 系统数据库结构

Fig.5 structure of database

3.4.5 软件界面

系统软件采用 Visual C++ , SQL Server 及 OpenCV 库联合开发。监控塔软件系统包括:主控模块、雷达模块、光学相机摄像机模块、图像处理模块、数据通讯模块。监控中心软件系统包括:主控模块、监报告警模块、数据通讯模块、数据存储模块。监控塔软件系统界面如图 6、图 7 所示。

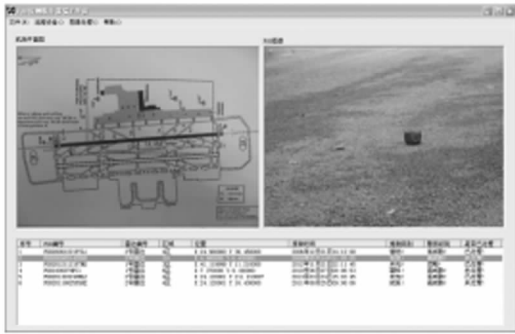


图 6 主控端界面

Fig.6 interface of system



图 7 光学摄像机控制界面

Fig.7 interface of optical camera

4 结论与展望

目前机场跑道异物检测系统正向两个方向发展,一方面,是以毫米波雷达系统或光学摄像机系统为基础的 FOD 单一传感器目标检测与识别,目前国外已开始了对典型 FOD 目标毫米波雷达一位距离像以及 SAR 图像的特性研究,同时星光级的光学摄像设备用于 FOD 探测系统,复杂背景下弱小目标的识别算法也在不断改进,精度也在不断提高。另一方面,结合毫米波雷达与光学摄像机的多传感器探测系统已成为目前机场跑道异物检测的主流模式,多传感器系统利用多种探测方法,发挥各系统优势,有效整合各种数据,快速对 FOD 目标做出反应,提出告警,尽可能的降低 FOD 对飞机安全的威胁。

毫米波雷达技术,红外热成像技术以其独特的优势,被越来越广泛的应用于民用领域。在机场跑

道异物检测系统中,它可以在各种天气条件下正常工作,提供可靠的 FOD 目标信息。通过调研和实验,设计了基于毫米波雷达信息、可见光、红外图像信息多源信息融合技术的检测系统。该系统是集成传感器网络,计算机网络,多源数据获取、处理与融合,FOD 目标检测与识别的复杂信息处理系统,可成为机场安全监控中的重要组成部分。

参考文献:

- [1] Security & technology center of department of airport CAAC. FOD precaution manual[R]. 2009;1-5. (in Chinese)
国家民航总局机场司民航局安全技术中心. FOD 防范手册[R]. 2009;1-5.
- [2] FAA. AC 150/5220-24. Airport Foreign Object Debris Detection Equipment[R]. 2009;1-13.
- [3] MH 5001-2000. Technical standards for airfield area of civil airports[S]. 2007;8-25. (in Chinese)
民用机场飞行区技术标准[S]. 2007;8-25.
- [4] Ding Lufei, Geng Fulu, Chen Jianchun. Theory of radar [M]. 4th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2009; 219-232. (in Chinese)
丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 4 版. 北京:电子工业出版社,2009;219-232.
- [5] M Ferri, G Giunta, A Banelli, et al. Millimeter wave radar applications to airport surface movement control and foreign object detection[J]. Proceedings of the 6th European Radar Conference. Roma, Aug, 23-26, 2009; 1-8.
- [6] An Chengbin, Zhang Xining, Chen Ying, et al. Calculation of function range of infrared image system[J]. Laser and Infrared, 2010, 40(7): 716-720. (in Chinese)
安成斌,张熙宁,陈盈,等. 红外成像系统作用距离计算[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 716-720.
- [7] Gong Min, Huan Kewei, Shi Xiaoguang, et al. Determination of temperature contrast of cooperative target and background[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 34(2): 242-244. (in Chinese)
龚民,宦克为,石晓光,等. 合作目标与背景温度对比度的确定[J]. 红外与激光工程, 2009, 34(2): 242-244.
- [8] Jing Zhongliang, Xiao Gang, Li Zhenghua. Image fusion—theory and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007; 194-215. (in Chinese)
敬忠良,肖刚,李振华. 图像融合——理论与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2007;194-215.