

低慢小飞行物实时检测原理与实验研究

于凯洋 张磊 王克逸

Real-time detection principle and experimental study of low and slow small flying objects

YU Kaiyang, ZHANG Lei, WANG Keyi

引用本文:

于凯洋, 张磊, 王克逸. 低慢小飞行物实时检测原理与实验研究[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 307–313. DOI: 10.5768/JAO202344.0202002

YU Kaiyang, ZHANG Lei, WANG Keyi. Real-time detection principle and experimental study of low and slow small flying objects[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 307–313. DOI: 10.5768/JAO202344.0202002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0202002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大视场反射式施密特光学系统设计与检测

Optical design and detection for reflective Schmidt system with large field of view

应用光学. 2020, 41(2): 265–269 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201005>

大视场航空相机光学系统设计

Design of optical system for large-field of view aerocamera

应用光学. 2019, 40(6): 980–986 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601008>

基于FPGA的自适应阈值运动目标检测

Moving object detection with adaptive threshold based on FPGA

应用光学. 2017, 38(6): 903–909 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0602001>

双波段CCTV鱼镜头光学系统设计

Optical system design of dual band CCTV fish-eye lens

应用光学. 2021, 42(6): 1006–1010 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601009>

融合Retinex和离散小波奇异值分解的远距离目标图像清晰化

Remote object image enhancement of fusion Retinex and discrete wavelet singular value decomposition

应用光学. 2021, 42(4): 656–663, 754 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402004>

基于FPGA的雾霾视频图像实时复原系统研究

Research and implementation of real-time fog and haze video image restoration system based on FPGA

应用光学. 2019, 40(5): 812–817 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0502004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0307-07

低慢小飞行物实时检测原理与实验研究

于凯洋, 张 磊, 王克逸

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 飞鸟撞击飞机与无人机黑飞是威胁航班起降安全的两大隐患, 上述的飞鸟和无人机都属于“低慢小”飞行物。为保卫机场净空区的安全, 需要研制具有反低慢小功能的预警系统。对此, 设计并实现了一套低慢小飞行物实时检测系统, 基于 FPGA (field programmable gate array) 驱动相机阵列实时采集大视场天空视频, 将适于硬件操作的奇偶分流算法与帧间差分算法相结合进行运动目标检测, 系统帧率达到 17 帧/s@1 024×768 pixel, 平均检测准确率为 99.69%。采用千兆以太网、光纤和交换机将前端跑道视频传输至后端塔台指挥中心, 支持 3 km 远距离传输。相比于传统基于软件串行处理的方式, 该系统具有高实时性、低功耗与小体积的优势, 适合部署在实际应用场景中。

关键词: 反低慢小; 运动目标检测; 远距离视频传输; 大视场; FPGA

中图分类号: TN02; TP277

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202344.0202002](https://doi.org/10.5768/JAO202344.0202002)

Real-time detection principle and experimental study of low and slow small flying objects

YU Kaiyang, ZHANG Lei, WANG Keyi

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of
Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Birds strike and flight without approval of UAV are two major hidden dangers threatening the safety of flight takeoff and landing, and the above-mentioned birds and UAV are both low and slow small flying objects. In order to protect the safety of the airport clearance area, it is necessary to develop an early warning system with the function of anti-low and slow small flying objects. A real-time detection system for low and slow small flying objects were designed and implemented. Based on the field programmable gate array (FPGA) driven camera arrays, the sky videos with large field of view were collected in real time. Combining the parity shunt algorithm and inter-frame differential algorithm which were suitable for hardware operation to detect moving targets, the system frame rate reached 17 fps@1 024×768 pixel, and the average detection accuracy was 99.69%. Gigabit ethernet, optical fiber and switch were used to transmit the front-end runway video to the back-end tower command center, which supporting 3 km long-distance transmission. Compared with the traditional software-based serial processing, the proposed system has the advantages of high real-time, low power consumption and small size, which is suitable for deployment in practical application scenarios.

Key words: anti-low and slow small; motion target detection; long-distance video transmission; large field of view; field programmable gate array

引言

鸟击 (bird strike) 指航班在起降过程中与飞鸟

发生碰撞, 通常发生在低空空域, 是威胁航班安全的传统因素^[1]。近年来, 随着消费级无人机的快速

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金 (61935008)

作者简介: 于凯洋 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事 FPGA 视频图像处理技术研究。E-mail: ykaiyang@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 王克逸 (1962—), 男, 博士, 博导, 教授, 主要从事光电系统、微光学与信息光学技术研究。

E-mail: kywang@ustc.edu.cn

发展,无人机“黑飞”问题日益突出^[2]。相比于飞鸟,无人机的质地更加坚硬,一旦与飞机发生碰撞,会造成更严重的后果。上述的飞鸟与无人机都可以归类为“低慢小”飞行器,其特点是飞行高度在1 km以下、移动速度在200 km/h以下、雷达反射面积在2 m²以下^[3]。机场为保障航班起降安全,需要及时发现闯入净空保护区的低慢小飞行器,以采取措施预防事故发生。

目前常用的低慢小飞行器检测方法有雷达检测、无线电检测、声学检测以及光电检测^[4]。低慢小飞行物的雷达反射面积小,某些无人机由非金属材料制作而成,产生的表面电流很弱,不易被雷达发现。主动雷达会发射大功率的电磁波信号,而机场对电磁准入制度要求严格,导致雷达的使用受到制约^[5]。无线电无法检测到自主飞行和保持静默状态的无人机。声学检测受环境噪声干扰大,作用距离有限。光电检测通过摄像头对天空区域进行监视,能够在较远距离检测各种类型的目标,并且其属于被动检测,不会对航空安全造成影响。

AWARE-2和AWARE-10是美国杜克大学研制的具有10亿级像素的相机阵列检测装置,能够对大范围的空间进行成像^[6]。浙江大学采用高清云台摄像机定点巡航扫描的方式对无人机进行检测、跟踪与识别,使用的运算平台为CPU(central processing unit)和GPU(graphics processing unit)^[7]。西安电子科技大学基于FPGA(field programmable gate array)与ARM(advanced RISC machines)的异构平台对低空飞行目标进行检测与识别^[8]。

由于需要对大范围的天空进行低慢小飞行器检测,所以需要研制具有大视场的检测装置。不同于使用常规的云台转动摄像机,而选用相机阵列获得大视场。转台相机由于是在转动过程中成像,所以具有时间盲区,并且图像需要进行运动补偿,步骤繁琐,图像质量不高。相比之下,相机阵列是在设备固定状态下成像,能够对天空区域进行不间断检测,不需要运动补偿,成像质量很高。

传统的视频处理一般都是在PC(personal computer)上完成的,其CPU与GPU的架构要占用大量的空间,并且功耗很高,在一些要求小体积、低功耗和高实时性^[9]的场合难以部署。近些年来,随着芯片运算能力不断提高,利用小型嵌入式处理器搭建视频处理平台是当前研究的热点。与DSP(digital signal processing)等处理器相比,FPGA

并行操作的特点非常适合处理大量数据,具有很高的实时性;支持移植和重编程,灵活性很高;并且接口丰富,可以搭载多种外设^[10]。

为实现对大范围的天空区域进行低慢小飞行器实时检测,本文使用FPGA驱动相机阵列采集视频数据,经去噪处理与目标检测后获得运动目标,并通过人机交互界面显示目标信息。同时,为满足机场跑道至塔台控制中心的视频传输需求,采用千兆以太网、光纤和交换机的组合进行高速远程视频传输。

1 系统设计方案

系统整体的设计方案如图1所示,相机阵列由4路OmniVision的OV5640摄像头组成,前端与后端FPGA均为Xilinx的Artix-7系列,其中前端FPGA的型号为XC7A100T,后端FPGA的型号为XC7A35T,交换机为AOPRE的880GIS系列工业级交换机。前端2个FPGA通过FPC(flexible printed circuit)排线同步驱动4路摄像头,对采集到的视频数据进行运动目标检测后,通过LCD(liquid crystal display)人机交互界面显示目标信息,并将视频数据封包后通过千兆以太网线传输至4电1光发送机,发送机通过SC(subscriber cable)单模光纤传输到后端1光1电接收机,再经后端FPGA解包后通过HDMI(high definition multimedia interface)接口显示。

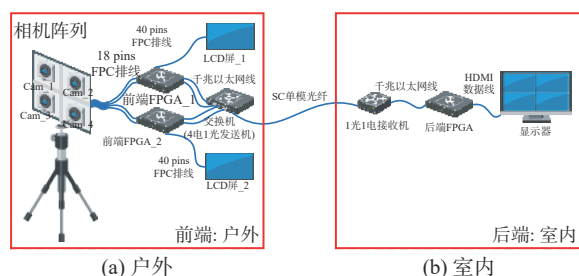


图1 系统整体设计方案

Fig. 1 Overall system design scheme

2 运动目标检测算法

运动目标检测算法在前端FPGA上完成,整个算法的具体流程如图2所示。首先,摄像头采集视频数据,经灰度化和中值滤波后,将视频流分为奇数流与偶数流两部分,分别写入DDR3存储器的2个写端口中。将2个读端口进行帧间差分,并对

结果进行二值化处理 and 腐蚀膨胀形态学滤波。然后求取最小包围框,提取包围框内的目标图像写入 Micro SD 卡中。将包围框与灰度化视频叠加通过 HDMI 接口进行本地显示,并对视频封包后通过 RJ45 千兆以太网接口远程显示。统计运动目标信息,将其显示在 LCD 屏上。最后,经过消抖处理,滤除一部分虚警,通过蜂鸣器和 LED(light emitting diode)报警提示。

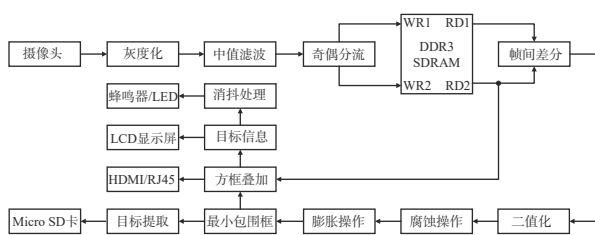


图2 运动目标检测算法流程

Fig. 2 Flow chart of motion target detection algorithm

2.1 图像预处理

摄像头采集的是自动曝光、自动白平衡与自动对焦的 RGB565 格式彩色图像,单个像素数据量为 16 bit,将其转换成 8 bit 的灰度图像可以降低数据处理量。此外,天空区域的色彩信息很少,将彩色模式转换成灰度模式,对视觉效果造成的影响较小。常规的浮点运算灰度化公式为

$$\begin{cases} Y = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \\ C_b = -0.172 \times R - 0.339 \times G + 0.511 \times B + 128 \\ C_r = 0.511 \times R - 0.428 \times G - 0.083 \times B + 128 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Y 、 C_b 与 C_r 分别为 YCbCr 格式的 3 个分量, R 、 G 与 B 分别为 RGB 格式的 3 个分量。然而,在 FPGA 中使用如(1)式所示的浮点运算方式会消耗大量的逻辑资源。为便于硬件实现,本文使用如(2)式所示的定点运算方式进行灰度化处理,其将(1)式中的系数扩大 256 倍并取整后再右移 8 bit,转换后的 Y 分量即为灰度数据。

$$\begin{cases} Y = (77 \times R + 150 \times G + 29 \times B) \gg 8 \\ C_b = (-43 \times R - 85 \times G + 128 \times B + 32768) \gg 8 \\ C_r = (128 \times R - 107 \times G - 21 \times B + 32768) \gg 8 \end{cases} \quad (2)$$

为了分析定点运算带来的误差,采用标准 RGB 彩色立方体^[11]对(1)式和(2)式中的 Y 分量进行灰度化误差分析。首先将 unit8 类型(0~255)的图像数据转换为 double 类型(0~1),使用如(3)式所示的公式计算灰度化相对误差。

$$E_{\text{grrel}} = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |Y_d(i, j) - Y_f(i, j)| / Y_f(i, j)}{M \times N} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_{grrel} 为灰度化相对误差均值; $Y_d(i, j)$ 为图像在 (i, j) 处的定点运算 Y 分量; $Y_f(i, j)$ 为图像在 (i, j) 处的浮点运算 Y 分量; M 和 N 分别为图像的宽度和高度,计算得到的相对误差均值为 0.104 3%。由此可见, FPGA 所使用的定点灰度转换公式精度很高,几乎不会对后续图像处理造成影响。

摄像头采集的图像不可避免地受噪声干扰,使用中值滤波,不仅可以去除孤立的噪声点,还可以保持图像的边缘特性,不会使图像产生明显的模糊。如图 3 所示,在 FPGA 中采用流水线操作可以快速实现中值滤波。首先,在移位寄存器中生成一个 3×3 矩阵,对矩阵的每一行排序得到最大值、中值和最小值;然后再对每一列排序,得到最大值中的最小值、中值中的中值以及最小值中的最大值;最后,取 3 个值的中值即为原矩阵的中值。

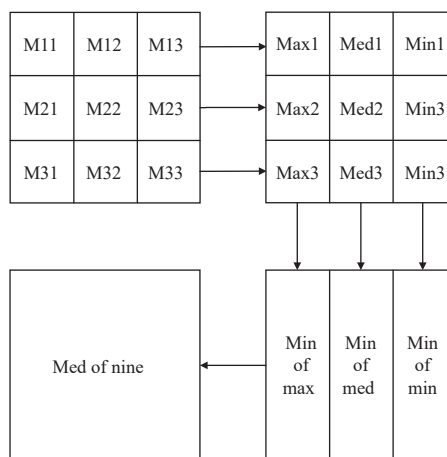


图3 FPGA 中值滤波

Fig. 3 FPGA median filtering

2.2 帧间差分

常用的基于连续帧图像的目标检测算法有光流法^[12]、背景差分法^[13]以及帧间差分法^[14]。光流法对光照变化十分敏感,容易受环境噪声的干扰,并且计算量大、耗时长,不适用于实时系统。背景差分法的性能依赖于所使用的背景建模技术。当建模方法十分复杂时,就增大了系统开销,降低了运行效率。另外,当光照、天气等突然发生变化时,如果背景得不到及时更新,就会出现误检的情况。帧间差分法的优点是算法简单、速度快,便于硬件实现,并且对环境变化不敏感,但其不能检测出完整的运动目标。反低慢小系统要求实时地对

空中目标进行检测,重点在于判断有没有目标进入视场,而对检测到的运动目标完整性并不作要求,因此本文选用帧间差分法作为目标检测算法。

帧间差分检测算法的关键在于相邻2帧图像的存储,为便于硬件实现,本文提出奇偶分流算法。与隔帧缓存法^[15]相比,奇偶分流算法具有图像连贯性佳和信号易同步的优点。奇偶分流算法的具体步骤是设置一个单bit的奇偶变化标志位,初始值为1'b0,摄像头每采集一帧,标志位自加1'b1。当第1帧来的时候,1'b0+1'b1=1'b1;当第2帧来的时候,由于标志位为单bit,造成1'b1+1'b1溢出,结果仍为1'b0。系统在工作时,奇偶变化标志位会在1'b0和1'b1之间进行跳变,仿真图如图4(a)所示。因此,可以使用标志位为1'b1表示1、3、5等的奇数帧,用1'b0表示2、4、6等的偶数帧,仿真图如图4(b)所示。

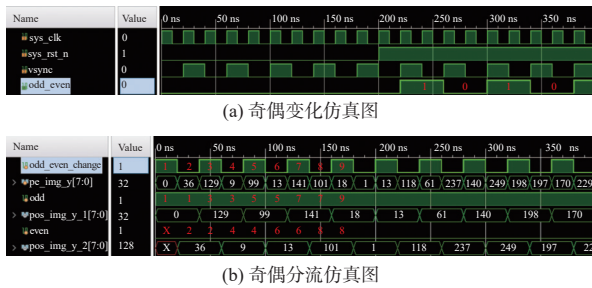


图4 帧间差分仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of inter-frame difference

奇偶分流算法的数学表达式为

$$\begin{cases} F_o^m = 2 \left\lfloor \frac{m-1}{2} \right\rfloor + 1, (m = 1, 2, 3, \dots) \\ F_e^n = 2 \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, (n = 2, 3, 4, \dots) \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_o^m 为奇数帧的第 m 帧; F_e^n 为偶数帧的第 n 帧; 符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整函数, 等号右边为原始视频的帧数。由于偶数帧的第1帧为不定值, 所以从第2帧开始, 对于每1帧, 奇偶帧之间始终相差1帧, 以此完成帧间差分。

2.3 目标检测

系统所使用的前端FPGA中内置存储器的容量为4.8 Mbit, 对于分辨率为1 024×768 pixel的灰度图像, 大小为6 Mbit, 因此图像只能存储在外部的DDR3存储器中。同时, 为了避免图像数据出现错乱, 存进DDR3的数据需要进行乒乓缓存, 然后从2个读端口读取奇偶帧数据进行帧间差分。在帧间差分之前, 还需要判断2帧图像对应位置像素

的灰度值大小, 以防止直接相减出现负值。

视频数据经帧间差分检测后可以通过二值化处理将目标和背景分离开来。由于天空背景干净、色调单一, 因此为了便于硬件实现, 本文使用的是运算量小、速度快的按键加减可变阈值进行二值化处理。为了适应不同的环境, 可以通过2个按键经消抖处理后加阈值和减阈值。阈值太低会产生大量噪声, 而太高又会造成漏检。在实际使用中, 应通过实验寻找合适的阈值, 并通过按键控制选择相应的阈值。同时本着“宁虚勿漏”的原则, 宁愿存在一些虚警, 也不要造成目标漏检, 所以二值化的阈值不可设置过高。

二值化后的图像依然会存在一些噪声, 通过开运算形态学滤波可以在消除细小突出物、去除孤立小区域和平滑物体轮廓的同时, 不明显改变物体的面积。开运算形态学滤波就是先进行腐蚀操作后进行膨胀操作, 在FPGA中通过将移位寄存器和“位与”运算相结合来完成腐蚀操作:

$$P = P_{11} \& P_{12} \& P_{13} \& P_{21} \& P_{22} \& P_{23} \& P_{31} \& P_{32} \& P_{33} \quad (5)$$

式中: P 为腐蚀运算结果; P_{11} 到 P_{33} 为3×3移位寄存器中的9个二值化数据。同时, 采取如(6)式所示的“面积换速度”方式来获得更高的运算速度。

$$\begin{cases} P_1 = P_{11} \& P_{12} \& P_{13} \\ P_2 = P_{21} \& P_{22} \& P_{23} \\ P_3 = P_{31} \& P_{32} \& P_{33} \\ P = P_1 \& P_2 \& P_3 \end{cases} \quad (6)$$

与腐蚀操作类似, 将(6)式中的“位与”运算(&)替换成“位或”运算(|)即可完成膨胀操作。

经形态学滤波后的图像去除了大部分噪声, 接下来可以使用最小包围框算法^[16]获得运动目标的位置。在实际环境中, 运动目标一般不止一个, 往往是多个目标同时出现。为了应对鸟群和无人机蜂群, 需要进行多目标检测。图像分割算法^[17]是多目标检测中的一种方式, 其将整个图像分为几个子图像, 分别在几个子图像中同时进行最小包围框检测, 相比于连通域标记算法^[18]具有运算简单、速度快的优点。本文将单个摄像头的视场分为4个子图像, 并将4个摄像头组合在一起, 可以同时检测16个目标, 能够应对一般情况。

2.4 目标显示

为了直观地显示检测结果, 将检测到的最小包围框以红色形式叠加在灰度图像上, 并使用绿色十字标指示目标中心, 通过HDMI接口进行本地

显示。在实际使用中,相机阵列一般放置在机场跑道附近,在塔台内进行操作,所以视频需要进行一段远距离传输。以淮安机场塔台与跑道最远水平距离 1745 m 为例^[19],本文所使用的千兆以太网、光纤和交换机支持 3 km 远距离视频传输,满足使用需求。

在检测到运动目标后,将包围框内的目标图像写入 Micro SD 卡中进行本地备份。使用包围框的中心像素坐标代替运动目标的中心,将目标数量、中心坐标、运动方向和出现时间等信息实时显示在 LCD 屏上,并采用异步 FIFO(first input first output)解决 HDMI 屏到 LCD 屏的多 bit 跨时钟域数据传输问题。

虽然经过前面的中值滤波和开运算形态学滤波能够在一定程度上去除噪声,但是由于设备地基不稳、风吹平台晃动等原因依然会出现一些虚警。为了进一步降低虚警发生率,需要对运动目标信号进行消抖处理。具体步骤是在有运动目标时,连续统计后续 30 个时钟周期内的目标信号。如果都为 1'b1,则认为确实存在运动目标,这时才将信号往后传,并通过蜂鸣器鸣笛和 LED 灯闪烁的方式进行报警提示。

3 实验结果与分析

系统的实际结构如图 5 所示,相机阵列的底座可以灵活调节,能够在水平和竖直方向上进行旋转。前端 2 个 FPGA 采用架空式设计,减少了占地空间,同时也便于散热。交换机具有 10 M/100 M/1 000 bit/s 自适应、三级防雷和过电保护功能,可以应对户外恶劣环境。对于一路摄像头的灰度图像,当处理速度为 17 帧/s@1 024×768 pixel 时,带宽为 102 bit/s,四路摄像头的总带宽为 408 bit/s,千

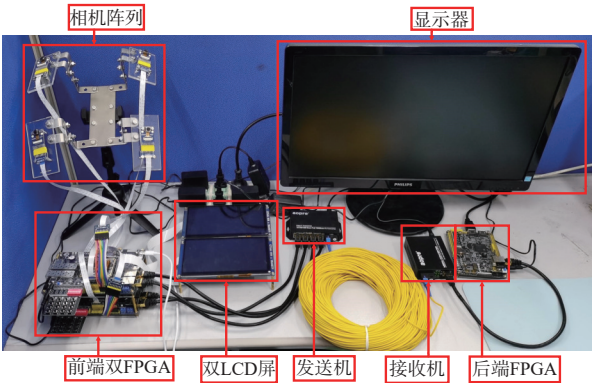


图 5 系统实物图

Fig. 5 Physical drawing of system

兆以太网满足带宽要求。SC 单模光纤的模间色散很小而带宽很高,适用于远距离视频传输。此外,由图中可以看出交换机体积小巧,便于后续集成;还可以选择更多接口的交换机,便于后续扩展。

3.1 低慢小飞行物检测实验

为了确定相机阵列中 4 个摄像头的间距与夹角大小,将相机阵列放置在窗台上,对天空区域进行成像。当 4 个摄像头的视场均处于重合与分离的临界状态时,相机阵列的整体视场角为 81.74°×62.51°,上下摄像头间距为 16.25 cm,底座夹角为 149.58°;左右摄像头间距为 17.86 cm,底座夹角为 132.40°。

在不同目标数量与观测距离的情况下,使用反低慢小系统对无人机进行检测实验,如图 6 所示。其中,图 6(a) 为室内 2 架无人机同时出现在同一个摄像头视场中的情况;图 6(b)~6(d) 分别为室外不同观测距离的情况。

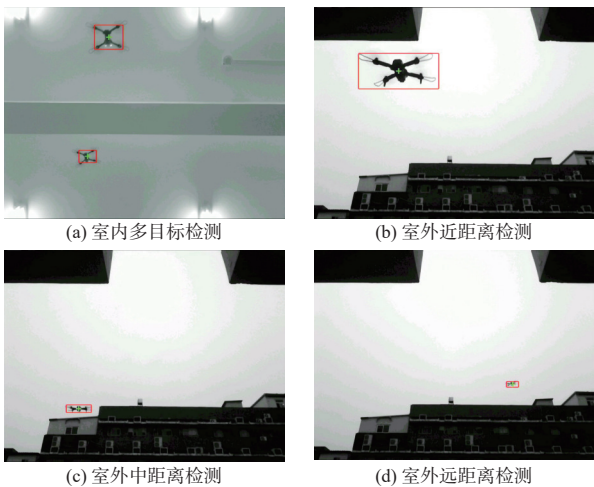


图 6 运动目标检测结果

Fig. 6 Detection results of motion target

如图 7 所示,LCD 屏提供人机交互界面,实时显示当前目标数量、中心像素坐标、运动方向、出

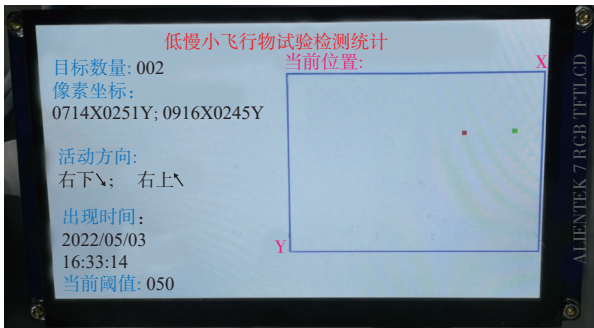


图 7 LCD 屏人机交互界面

Fig. 7 Human-machine interaction interface of LCD screen

现时间以及二值化阈值,并以图形的形式显示当前目标在 HDMI 屏中的位置。

3.2 检测准确率与系统性能评估

为了客观评价目标检测的准确率,本文使用基于中心位置偏移误差的评价算法和基于区域统计重叠度的评价算法进行评估^[20]。中心位置偏移误差是指检测区域中心坐标与真实区域中心坐标之间的偏差,其相对误差计算公式为

$$E_{\text{drel}} = \sqrt{\left(\frac{x'_i - x_i}{X_{x,y} T_y}\right)^2 + \left(\frac{y'_i - y_i}{Y T}\right)^2}, i \in [1, N] \quad (7)$$

式中: E_{drel} 为目标检测相对误差; (x'_i, y'_i) 为第 i 帧检测区域中心坐标; (x_i, y_i) 为第 i 帧真实区域中心坐标; XT 为 X 方向的像素总数,这里为 1 024 pixel; YT 为 Y 方向的像素总数,这里为 768 pixel; N 为帧总数。

区域统计重叠度是指检测区域与真实区域的重叠度,计算公式为

$$\begin{cases} R_{\text{FP}} = \frac{S_{\text{FP}}}{S_{\text{FP}} + S_{\text{TN}}} \times 100\% \\ R_{\text{FN}} = \frac{S_{\text{FN}}}{S_{\text{FP}} + S_{\text{TN}}} \times 100\% \\ P_{\text{WC}} = \frac{S_{\text{FP}} + S_{\text{FN}}}{S_{\text{TP}} + S_{\text{FP}} + S_{\text{TN}} + S_{\text{FN}}} \times 100\% \\ R_{\text{SP}} = \frac{S_{\text{TN}}}{S_{\text{FP}} + S_{\text{TN}}} \times 100\% \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_{TP} 为真阳,指该区域本身是目标,同时也被检测为目标; S_{FP} 为假阳,指该区域本身是背景,但被错认为目标; S_{FN} 为假阴,指该区域本身是目标,但被错认为背景; S_{TN} 为真阴,指该区域本身是背景,同时也被检测为背景。评价指标中的 R_{FP} 为假阳率, R_{FN} 为假阴率, P_{WC} 为误检率,这 3 个是负相关指标,数值越小,准确率越高;而 R_{SP} 为特异率,是正相关指标,数值越大,准确率越高。

目标真实区域的边界是通过 LabelImg 软件手动标注的,在其生成的 xml 文件中可以得到目标的上下左右 4 个边界。实验对不同观测距离均匀采样的 100 帧图像进行了误差分析,结果如表 1 所示,综合平均准确率为 99.69%。

在相同分辨率 1 024*768 pixel 下,对前端 2 个 FPGA 和 PC 机进行对比。其中,PC 机的配置为 Intel Core i3-4170 CPU 与 12 GB 内存,在 PC 机中使用 MATLAB 软件处理一路视频。结果如表 2 所示,可以看出 FPGA 具有高实时性、低功耗与小体积的优点。

表 1 检测准确率评价结果

Table 1 Evaluation results of detection accuracy %

评价指标	最大值	最小值	中值	平均值
E_{drel}	2.4974	0.0916	0.8834	0.875 8
R_{FP}	2.663 7	0.000 0	0.0609	0.134 4
R_{FN}	1.2396	0.0000	0.0932	0.141 4
P_{WC}	2.692 2	0.025 4	0.1848	0.267 6
R_{SP}	100.000 0	97.3363	99.939 1	99.865 6

表 2 不同平台性能对比

Table 2 Performance comparison of different platforms

平台	帧率/(帧/s)	功耗/W	尺寸/cm ³
双FPGA	17	19.72	16.04×11.57×7.26
PC机	4	65.09	46.72×18.76×43.45

4 结论

为应对低慢小飞行物带来的威胁,本文研制了一套反低慢小预警系统。基于双 FPGA 平台并行驱动相机阵列同步采集大视场天空视频,使用奇偶分流算法与帧间差分算法对多个目标进行检测。与传统软件串行处理的方式相比,该系统提高了检测速度,同时降低了功耗。采用千兆以太网、光纤与交换机的组合实现高速远程视频传输,交换机具有较高的集成度与扩展性。本文验证了 FPGA 并行处理的优势与远程视频传输能力,为下一步开展大视场复眼系统研究奠定了基础。

与此同时,该系统的图像分辨率较低,摄像头数目较少,下一步可采用 MIPI(mobile industry processor interface)摄像头接口与 Xilinx Virtex-7 系列高端 FPGA 以获得更高的分辨率与实时性,同时使用更多的摄像头实现 360°×180°的全空域检测。在某些复杂环境中,如树木晃动和云层移动等,本文所使用的传统算法处理效果并不理想,后续可采用深度学习等智能算法来进一步去除环境噪声,提高目标检测准确率。

最后,反制低慢小飞行物,尤其是无人机黑飞,技术只是一方面,还需要与宣传教育、政策监管相结合,来达到更好的防治效果。

参考文献:

- [1] 王维,项洪达. 鸟击风险计算方法研究[J]. 中国民航大学学报, 2019, 37(5): 21-24.

WANG Wei, XIANG Hongda. Research on the calcula-

- tion method of bird strike risk[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2019, 37(5): 21-24.
- [2] FLOREANO D, WOOD R J. Science, technology and the future of small autonomous drones[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 460-466.
- [3] 张建伟, 郭会明. 低空慢速小目标拦截系统研究[J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(7): 2874-2878.
ZHANG Jianwei, GUO Huiming. Research on low altitude slow speed small target interception system[J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(7): 2874-2878.
- [4] SHI X, YANG C, XIE W, et al. Anti-drone system with multiple surveillance technologies: architecture implementation and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(4): 68-74.
- [5] 陈唯实, 黄毅峰, 陈小龙, 等. 机场净空区飞鸟与非合作无人机目标识别[J]. *民航学报*, 2020, 4(3): 27-33.
CHEN Weishi, HAUNG Yifeng, CHEN Xiaolong, et al. Identification of flying birds and non-cooperative UAV targets in airport clearing areas[J]. *Journal of Civil Aviation*, 2020, 4(3): 27-33.
- [6] KITTLE D S, MARKS D L, SON H S, et al. A testbed for wide-field, high-resolution, gigapixel-class cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(5): 386-389.
- [7] 谢家阳, 王行健, 史治国, 等. 动态云台摄像机无人机检测与跟踪算法[J]. *智能系统学报*, 2021, 16(5): 858-869.
XIE Jiayang, WANG Xingjian, SHI Zhiguo, et al. Dynamic gimbal camera UAV detection and tracking algorithm[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2021, 16(5): 858-869.
- [8] 常昊. 低空飞行目标检测系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
CHANG Hao. Design of low altitude flight target detection system[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [9] TANG J W, SHAIKH H N, SHEIKN U U, et al. FPGA-based real-time moving target detection system for unmanned aerial vehicle application[J]. *International Journal of Reconfigurable Computing*, 2016, 2016: 1-16.
- [10] AMIR H R, TABERNER A J, NASH M P, et al. Suitability of recent hardware accelerators (DSPs, FPGAs, and GPUs) for computer vision and image processing algorithms[J]. *Signal Processing Image Communication*, 2018, 68: 101-119.
- [11] 冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理[M]. 第3版. 阮秋琦, 阮宇智, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017: 254-257.
RAFAEL C G, RICHARD E W. Digital image processing [M]. 3rd ed. RUAN Qiuqi, RUAN Yuzhi, et al, Translated. Beijing: Electronic Industry Press, 2017: 254-257.
- [12] LI B, ZAN S S, JING Q Y, et al. Detection and tracking method for maneuvering targets using improved gradient-based optical flow field[C]. Nanchang: 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019: 1421-1425.
- [13] POLMOTTAWEGEDARA S S, MUNASINGHE R, DAVARI A. Tracking moving targets[C]//Symposium on System Theory. IEEE, 2006.
- [14] LIPTON A J, FUJIYOSHI H, PATIL R S. Moving target classification and tracking from Real-time video[C]//Applications of Computer Vision, 1998. WACV '98. Proceedings. Fourth IEEE Workshop on. IEEE, 1998.
- [15] 陈科成, 苏成悦, 何雷, 等. 基于ZYNQ架构的运动物体检测系统[J]. *信息技术与信息化*, 2020(3): 63-66.
CHEN Kecheng, SU Chengyue, HE Lei, et al. ZYNQ architecture-based moving object detection system[J]. *Information Technology and Informatization*, 2020(3): 63-66.
- [16] 王俊龙. 基于FPGA的运动目标检测系统的设计[D]. 太原: 中北大学, 2021.
WANG Junlong. Design of FPGA-based motion target detection system[D]. Taiyuan: North Central University, 2021.
- [17] 邢凯. 基于FPGA的多运动目标检测技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
XING Kai. Research on FPGA-based multi-motion target detection technology[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2020.
- [18] 戴万. 基于FPGA的星载舰船目标检测系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
DAI Wan. Design and implementation of FPGA-based target detection system for starboard ships[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [19] 张涛. 机场管制塔台通视能力评估方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
ZHANG Tao. Research on the evaluation method of airport control tower visibility capability[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017.
- [20] GOYETTE N, JODOIN P M, PORIKLI F, et al. Changedetection. net: A new change detection benchmark dataset[C]//Computer Vision & Pattern Recognition Workshops. IEEE, 2012.