

# 基于 FPGA 的运动目标实时检测系统设计

刘汝卿, 李 锋, 蒋 衍, 朱精果

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100094)

**摘要:** 目标识别是智能安防监控视频处理系统中重要内容, 为了满足安防系统小型化实时性等应用需求, 设计了一种基于 FPGA 平台的运动目标识别系统; 该系统采用 CMOS 摄像头作为视频采集器, SDRAM 作为视频流缓存及存储介质, 利用 FPGA 可并行处理特点, 采用流水线技术进行分模块化设计, 对视频流进行灰度化和帧差法算法处理, 并将结果传输至显示器终端, 从而实现图像采集和目标识别实时跟踪和显示; 测试结果表明, 该系统在一定测距范围内可有效稳定地跟踪运动目标物体, 可实时显示、小型化且功耗低, 可进一步应用于安防领域中。

**关键词:** FPGA; 实时目标检测; 帧差法

## Design of Real-Time Target Recognition System Based on FPGA

LIU Ruqing, LI Feng, JIANG Yan, ZHU Jingguo

(Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Target recognition and tracking is an important part of intelligent security monitoring video processing system. In order to satisfy requirements for real time miniaturization, a target recognition and tracking system based on FPGA platform is designed. The CMOS digital camera is used to collect original video data in the system, and the off-chip SDRAM is taken as the video stream buffer and storage medium. The image processing part is completed by FPGA, including gray processing, inter-frame difference method, and the results are transmitted to the display terminal to realize the video acquisition, target recognition, tracking and display. The test results show that the whole system can track the target object effectively and stably. It can be further applied to security the monitoring system.

**Keywords:** FPGA; real-time target recognition and tracking; inter-frame difference method

## 0 引言

随着我国安防产业以及民众安全意识的提升, 安防市场规模迅速扩大, 其应用领域从文博等特殊单位发展到金融、公安、交通、楼宇等周边产业。其中, 安防监控领域在技术层面也已进入数字化、高清化和网络化时期, 在应用层面也步入了社会化安防产品、民用市场层<sup>[1-3]</sup>。同时, 越来越多的传感器探测技术应用到安防市场中, 如分布式光纤传感系统、振动光纤、声音监听、红外报警、激光雷达、视频监控等, 其中民用摄像头、监控器、报警器等产品得到了最广泛的普及, 安防视频监控行业已进入了快速发展期<sup>[4-6]</sup>。

由于人工方式检索进行视频排查效率低下, 并且几乎不可能实现实时有效监控, 因此目标检测技术已成为当前安防视频监控领域中非常重要的研究方向之一<sup>[7-9]</sup>。目标检测的主要目的是从一个场景或者视频中定位出目标的位置或者跟踪其运动轨迹。目前目标检测研究手段有 CPU 处理、GPU 处理器、AI 智能芯片以及 FPGA、DSP 等。其中 CPU 处理器采用串行方式效率略低, GPU 及 AI 智能芯片多采用深度学习网络框架, 功耗大, 开发难度大, 成本高, 适用于大组网、大互联场景<sup>[10]</sup>。本文针对民用甚至是家用

安防视频相机系统, 利用 FPGA 速度快、高性价比、内部资源丰富等优点<sup>[11-13]</sup>, 设计并实现了一套基于 FPGA 的目标识别系统。

## 1 系统设计

家用安防视频相机系统通常采用 1 或几个小型相机和图像处理平台, 对入侵人或物进行实时目标识别, 利用千兆网线传输, 将视频实时显示在终端设备上, 从而实现家庭安全的实时监控, 其总体结构如图 1 所示。

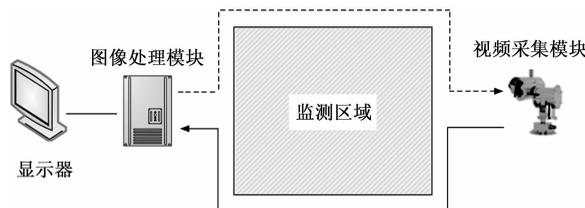


图 1 安防相机系统框图

本文设计的基于 FPGA 的安防样机系统, 主要由视频采集模块、图像处理模块、显示器及相关电缆辅材等组成。在待观测区位置安装完成系统后, HDMI 线缆把监测处理完成后的视频图像实时传送到显示器中, 从而完成对家庭

收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2021-10-29。

作者简介: 刘汝卿(1987-), 女, 山东烟台人, 硕士, 工程师, 主要从事激光雷达信号处理、图像处理与识别方向的研究。

通讯作者: 李 锋(1976-), 男, 山东邹城人, 博士, 副研究员, 主要从事光电探测、机电控制方向的研究。

引用格式: 刘汝卿, 李 锋, 蒋 衍, 等. 基于 FPGA 的运动目标实时检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 56-59.

安全的实时监测。

系统具体结构如图 2 所示, 主要包括视频采集模块: CMOS OV7725 摄像头, 图像处理模块: 128 Mbit 外部存储器 (SDRAM)、Altra 公司 Cyclone IV FPGA 等和 LCD 液晶显示器等外围硬件。EP4ACE6F17C8 芯片拥有 6 272 个逻辑单元 (LE), 15 个乘法器, 256 个引脚封装, 满足设计需求。

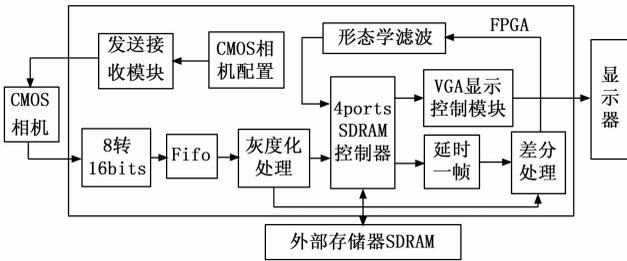


图 2 FPGA 目标检测与识别系统框图

FPGA 经过 IIC 总线配置 CMOS 相机参数, 从而实现 CMOS 摄像头采集外部图像信息, 并将数据通过外部存储器 SDRAM 进行缓存。FPGA 处理图像数据后通过显示器将目标识别结果输出。系统包括数据采集模块、灰度化处理模块、目标识别模块、SDRAM 存储控制模块以及 VGA 实时控制模块。

## 2 目标识别系统设计

目前目标检测方法主要有: 1) 光流法, 其原理为给图像中的每个像素点赋予一个速度矢量, 图像上的点与三维物体上的点一一对应, 利用运动物体的速度矢量与背景速度矢量不同的特性进行检测。但是此方法计算量大, 抗噪性能较差, 无法满足实时性和实用性要求<sup>[14]</sup>; 2) 背景差分法, 较简单、直接, 先将背景图保存, 再利用所需图像与背景图像差别进行判断。但此方法中背景需随时间不定期变换, 且噪声也是个不得不考虑的因素<sup>[15]</sup>; 3) 帧间差分法, 视频图像帧间具有连续性, 运动目标的存在会让连续的帧与帧之间有明显的变化, 利用该现象可提取图像中的运动区域, 此方法通过设定阈值可以快速检测出运动目标, 但帧间间隔的选取以及在相差过程中容易失掉运动目标的一些像素点, 但相对简单, 实时性好, 可在合适的应用场景中应用<sup>[16-17]</sup>。

### 2.1 数据采集模块

CMOS OV7725 是一款集成 1/4 英寸单芯片 VGA 相机及图像处理器的高性能传感器, 具有 640×480 的感光阵列, 其 lens chief ray angle 为 25°, lens size 为 1/4", 帧频为 60 fps, 像素大小为 6.0 μm × 6.0 μm, 成像面积为 3 984 μm × 2 952 μm, 且能在 -20~70 °C 范围内正常工作, 满足民用监控市场的需求。其使用时先要对寄存器进行配置, 包括采样画质、输出格式、曝光以及自动增益、自动曝光、自动对比度的模式选择。此处寄存器设置为 640 × 480 分辨率、RGB565 格式视频输出。FPGA 接收其连续两个像素时钟的 8 bit 数据, 拼接得到完整的 16 bit 的 RGB565 信号。

图像数据采集模块的接口信号, 如图 3 所示, coms\_href 为摄像头行信号, coms\_pclk 为摄像头的像素时钟, coms\_pclk 为驱动时钟, 两者频率一般相同, coms\_data 就是 8 bit 的图像数据。即利用 FPGA 并行处理能力将两个 8 bit 像素数据拼接为 rgb565 16 bit 的图像数据。

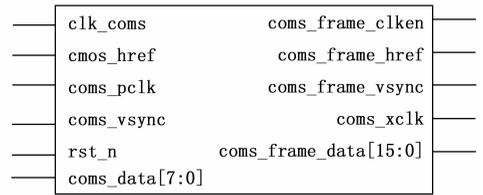


图 3 数据采集模块

### 2.2 灰度化处理

通常, 视频图像采集后需要进一步的处理, 才能满足后续目标检测识别的需求, 即实现 RGB565 格式到 YCbCr 信号的转换。在灰度处理中, Y 表示明亮度, 值越大, 颜色越白, Y 越小, 颜色越暗。如果输出的 RGB 的值都等于这个亮度 Y 的值, VGA 显示的图像就成了黑白图像。其原理如下所示:

$$\begin{aligned} Y &= 0.183R + 0.614G + 0.062B + 16 \\ CB &= -0.101R - 0.338G + 0.439B + 128 \\ CR &= 0.439R - 0.399G - 0.040B + 128 \end{aligned} \quad (1)$$

这里, 由于 FPGA 不善于处理浮点数, 因此将浮点数转为定点数, 各个系数均扩大 256 倍, 最后在计算完之后除以 256, 如公式 (2) 所示:

$$\begin{aligned} Y &= (77 * R + 150 * G + 29 * B) >> 8 \\ U &= (-43R - 85G + 128B + 128 * 256) >> 8 \\ V &= (128R - 107G - 21B + 128 * 256) >> 8 \end{aligned} \quad (2)$$

同样, 在 FPGA 里面, 使用组合逻辑不能直接按上述公式 (2) 在计算, 组合逻辑延时太大, 导致时序不收敛, 因此需要添加寄存器来切割流水线; 利用 FPGA 并行处理的特点加速计算。这里分三级流水线处理: 第一级流水线计算所有乘法; 第二级流水线计算所有加法, 把正的和负的分开进行加法; 第三级流水线计算最终的和, 若为负数取 0。

### 2.3 目标识别处理

由于图像采集端与输出端不同步, 帧差分法需要缓存一帧的数据, 若使用外部存储, 则可以减少 FPGA 内部资源, 本文设计的双端口 SDRAM 控制器, 一侧读写端口用作帧缓存, 另一端口用来缓存视频流, 如图 4 所示。

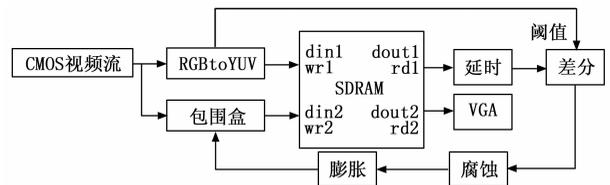


图 4 SDRAM 控制器实现流程

首先, 视频图像经过 FPGA 灰度化处理, 写入到 FPGA 的双口 SDRAM 控制器的接收端侧, 存储当前帧视频图像数据, 即从第二帧时刻开始两帧图像在设定阈值条

件下做差分计算。但由于光照背景的变化以及阈值固定等原因，此时得到的差分后的二值图像会有很大的噪声。本系统去噪降噪主要采用形态学滤波法，直接去除面积较小的噪声点。然后求得目标范围的左上角和右下角像素坐标，与原始 RGB 图像叠加后重新写入到 SDRAM2 端口，此时 VGA 就可以显示处理后的图像的效果。为了提高运算速度，数据输入输出模块与 SDRAM 控制之间增加了数据缓存 fifo 模块，由于 cmos 相机数据率与 FPGA 时钟不匹配，为保证可实现突发模式读写操作，利用 FPGA 片上资源开辟了多个 fifo 缓存区，保证数据了实时性。

### 2.3.1 差分处理

目标差分法，顾名思义，是用差分方法进行目标识别，通过对视频图像中连续两帧，即将当前帧图像与前一帧图像做差分运算，从而获得目标轮廓。当监控市场中存在运动物体时，相邻帧之间在灰度上有明显差别，两帧相减，得到相对差分值，判断其是否大于某一阈值，进行图像二值化，从而确定监控图像中是否有运动目标 [18-19]。

如图 4 所示：视频数据写入 sdran 写口 1 侧，做为缓存，通过控制信号 rd1 从 sdran 读口 1 侧读数据，经过延时一帧后进行差分处理。本系统中设定阈值 threshold 为 15，大于阈值则认为时目标区域，设置为 255，小于阈值则为 0，阈值可以根据需要调节控制。另一路 sdran2 是当前的图像数据。

### 2.3.2 形态学滤波处理

形态学是一种以形态为基础对图像进行分析的数据方法，对图像先进行变换，以突出所需要的信息，使后续的认识工作能够抓住目标最本质的形态特征，包括膨胀、腐蚀、开运算、闭运算 [20]。在 FPGA 中形态学滤波方式主要是实现腐蚀和膨胀以得到减少噪声的目的。首先对差分处理后二值图形进行腐蚀处理以去除小边界和孤立点；再进行膨胀处理，填充空洞。在去掉毛刺、孤立点和锐化角的同时，使目标轮廓变得光滑。

所谓腐蚀是对图像中目标的“收缩细化”过程，将图像中的高亮区域或白色部分进行缩减细化，其运行结果比原图的高亮区域更小。本次采用 3×3 窗口实现腐蚀。

膨胀将图像的高亮区域或白色部分进行扩张，其运行结果图比原图的高亮区域更大。从数学的角度是就将图像与计算核（也称锚点）进行卷积是通过结构元素的平移控制对图像中目标的“加长”或“变粗”过程，操作。

形态学滤波处理后，对运动目标的框选采用包围盒算法，设计包围盒得到上下左右 4 点像素坐标，框出目标区域。通过行场信号，设计行列计数器，从而可以获取图像每个像素点的坐标信息，然后设计 4 个寄存器实时与行列计数器比较，从而实现对目标的框选效果。

## 3 系统验证

### 3.1 模块仿真验证

对各个模块进行 Modelsim 仿真验证，结果如图 5~7 所示。

图 5 是数据采集模块的仿真结果，其中 cmos\_data 为实现输出 RGB565 格式，框中的数字“03”和“04”，coms

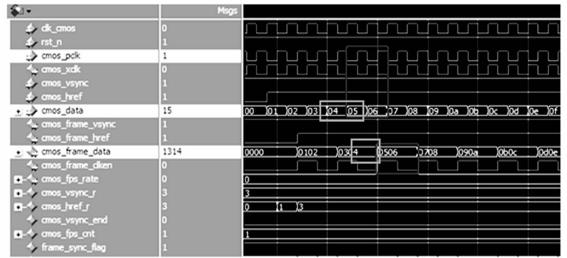


图 5 图像采集模块仿真波形图

\_frame\_data 是将连续两个像素时钟的 8 bit 数据的拼接成 16 bit 的数据，如图中的数字“0304”，即实现数据采集模块中 8 bit 转 16 bit 的功能要求。

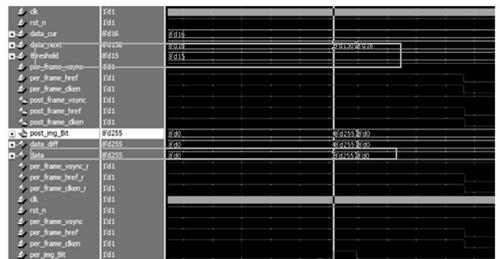


图 6 差分处理仿真图

图 6 为差分处理模块的仿真结果，由框中数据可以看到  $data\_next - data\_cur = 8'd130$  时，大于设定阈值 15 则输出数据 post\_img\_Bit 为 255，否则为 0。即两帧图像的差分图像中通过阈值判断后，静止的物体值为 0，而移动的物体保留。

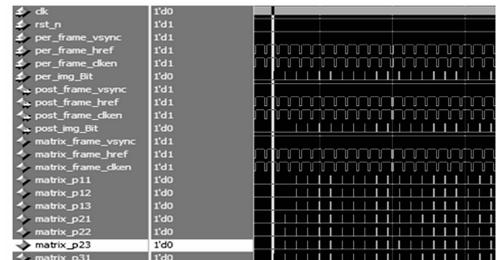


图 7 腐蚀膨胀仿真波形图

图 7 为腐蚀膨胀处理仿真波形图，得到的是 matrix\_p11~matrix\_p33 9 个像素数据组成 3×3 图像模板，这里通过行缓存设计（缓存了两行图像数据），延时两行数据后，得到完整的 3×3 图像模板，即实现了噪声滤除和目标轮廓变得光滑。

### 3.2 实验结果与分析

在 FPGA 黑金开发板上实现，并配以 OV7725 摄像头和 VGA 显示器，构建图像目标识别系统并验证基于 FPGA 的实时目标检测系统的实现效果。由于本系统针对视频监控系统中运动目标检测，因此采用 3 种不同大小的遥控模型进行实验，如图 8 所示。

对象 1 是一辆体积为 25 cm×7 cm 的运动工程车模型，对象 2 是体积为 25 cm×7 cm 的运动工程车模型，对象 3 是

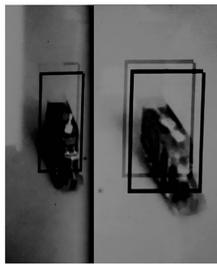


图8 运动目标检测图

0.5 cm×0.057 cm的小汽车模型,对象4是170 cm×30 cm的汽车模型。从图8中可以看出,当小车运动速度匀速时,左图显示图像清晰,标识框边界,识别率100%;当小车速度很慢或者很快时,小车图像出现虚影,并且标识虚框比较明显,与虚影相对应。

为了更好地评判该系统性能,本系统对不同实验对象,在不同运动速度下进行8种实验,每种实验条件进行10次实验。采用10次取平均法,和控制条件变量法,通过采集30 fps的图像,验证本系统的性能。具体结果如表1所示。

表1 实验统计表序号

序号	大小/cm <sup>2</sup>	速度/(m/s)	距离	识别率/%
1	15×7	约1	80 cm	100
2	15×7	约0.6	80 cm	100
3	15×7	约0.08	80 cm	70
4	0.5×0.57	约0.6	80 cm	100
5	170×30	1.1~1.5	1 m	100
6	170×30	1.1~1.5	5 m	100
7	170×30	1.1~1.5	10 m	60
8	170×30	1.1~1.5	16 m	45

表1中,识别率表示框选面积与目标物体视觉面积的相对比值。比值100%表示本系统识别红色框选面积即为目标视觉面积,误差容忍度为±10%。由表1可以得出规律,在相同距离条件下,识别率随目标速度的降低而变低;同时相同大小的目标物体的识别率随距离的变小而升高。

为了进一步验证该系统的在室外环境下的性能,在夏天白天光照下,将该目标识别系统安装在居民室内正面向门口楼道,楼道总长度约50 m,尽头为一扇窗户。在此条件下,测试结果如表1所示,可以看出,该系统的探测效果与目标物体大小、运动速度和距离有关。在距离80 cm条件下,最小探测物体大小为0.5×0.57 cm<sup>2</sup>,速度大于0.08 m/s时,运动目标可准确识别。

#### 4 结束语

应对目前民用家用安防系统中视频采集入侵目标自动检测需求,利用FPGA的高速并行处理能力,设计了一款运动目标实时识别样机系统,实现了CMOS相机运动目标检测功能。采用帧差法对运动目标进行实时处理,节省系统资源,运算方法简单、方便。从测试结果可以看出,在一定环境中,该系统可准确识别入侵运动物体,可处理帧

频30 fps,640×480的图像,且实时性较好。值得一提的是,该系统可扩展性较强,可根据应用需求搭配分辨率更高的摄像头,可采用多帧叠加方式增强识别效果,因此具有广阔的应用空间。

#### 参考文献:

- [1] 裴朝科,周海林,GUO D,等. 安防产业中人工智能芯片技术的研究和应用[J]. 中国安全防范技术与应用,2019(5): 28-33.
- [2] 张文虎. 浅析安防视频监控现状及安全防护策略[J]. 甘肃科技,2021,37(17): 65-67.
- [3] 江乔卉. 智能安防——守护你的智慧生活[J]. 通信企业管理,2021(8): 72-74.
- [4] 刘琨,柴天娇,刘铁根,等. 多防区光纤周界安防系统及入侵快速判定算法[J]. 光电子·激光,2015,26(2): 288-294.
- [5] 于顺路. 振动光纤周界入侵报警系统在罐区的应用[J]. 天津化工,2020,34(4): 67-69.
- [6] JIANG Y, LIU R Q, et al. A high-performance CMOS FD-MA for pulsed TOF imaging LADAR system[J]. Journal of Optoelectronic Engineering, 2019, 46(7): 67-74.
- [7] 夏永泉,李卫丽,甘勇,等. 智能视频监控中的运动目标检测技术研究[J]. 通信技术,2009,42(6): 185-187.
- [8] 董云云,鲍海燕,王溢琴. 视频监控中的目标检测及自动跟踪技术[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),2017,31(1): 65-69.
- [9] 孙丕波,周利江. 动态目标检测技术在智能监控中的应用研究[J]. 制造业自动化,2011,33(5): 56-57, 115.
- [10] 王和国. AI芯片技术在安防行业的应用与发展[J]. 安全技术防范,2019(5): 39-43.
- [11] 吕清松,许宜申. 基于FPGA的目标识别与跟踪系统设计[J]. 现代电子技术2018,41(18): 12-16.
- [12] 王升哲,唐中和,郭航,等. 基于SOC架构的智能图像处理和外设控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2021,29(4): 90-94, 109.
- [13] 刘汝卿,蒋衍,李锋,等. 实时感知型激光雷达多通道数据采集系统设计[J]. 红外与激光工程,2021,50(5): 88-94.
- [14] 刘德志,梁正友,孙宇. 结合空间注意力机制与光流特征的微表情识别方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2021,33(10): 1541-1552.
- [15] 匡鹿婷,宋波,毛捷,等. 基于光流法的固体内部声传播方向测量[J]. 声学技术,2020,39(4): 395-399.
- [16] 杨鲁新,董文博. 高频帧视觉实时目标检测系统[J]. 计算机技术与应用,2019,45(4): 109-117.
- [17] 句建国,邢进生. 基于平滑帧差法的混合高斯模型的研究与应用[J]. 陕西科技大学学报,2018,36(3): 160-166.
- [18] 李成美,白宏阳,郭宏伟,等. 一种改进光流法的运动目标检测及跟踪算法[J]. 仪器仪表学报,2018,5: 249-256.
- [19] 段锁林,高仁洲,刘福,等. 融合改进帧差和视觉被恶警提取算法的前景检测[J]. 小型微型计算机系统,2019,9: 1903-1908.
- [20] 刘洋. 运动目标检测技术研究综述[J]. 科技经济导刊,2019,17: 183.