

车载异构非制冷红外成像行人检测系统

谢江荣^{1,2,3}, 李冰^{1,3}, 卫红^{1,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院红外探测器与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 车载红外夜间行人检测具有重要的实用价值, 传统系统往往结构复杂、行人检测算法实时性难以保证。针对该问题提出了基于 FPGA + DaVinci 处理器构架的非制冷红外热成像行人检测系统, 充分利用红外焦平面的成像特点, 获取经预处理后的图像画质清晰; 在检测行人区域过程中, 提出结合局部自适应阈值分割和形态学处理的预处理方法, 能够有效去除强背景的干扰; 另外, 利用 Haar-like 特征事先训练 AdaBoost 分类器, 进行 ROI 的分类、识别。实验结果表明, 采用多核心异构的系统, 具备结构紧凑、数据通信难度小、算法移植性强等优势; FPGA 对算法加速效果约为 38%, 实时检测帧频达到了 25 f/s。

关键词: 行人检测; FPGA + DaVinci 构架; 局部自适应阈值; Haar-like; AdaBoost

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.009

Vehicle-mounted heterogeneous uncooled infrared imaging pedestrian detection system

XIE Jiang-rong^{1,2,3}, LI Bing^{1,3}, WEI Hong^{1,3}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

Abstract: Night-vehicle-mounted infrared pedestrian detection is of great value. It was found that the traditional system is always complicated in structure, and the real-time performance of the pedestrian detection algorithm is difficult to guarantee. To overcome this problem, an uncooled infrared thermal imaging pedestrian detection system based on the FPGA & Davinci-device architecture was presented. High quality preprocessed images can be obtained with the rational use of infrared focal plane. During the ROI isolation, the methods of local adaptive threshold segmentation and morphological process were used to remove the interference of strong background. In addition, the algorithm differentiated the candidate regions with AdaBoost classifier, which was trained with Haar-like features. Experimental results show that the multi-core heterogeneous system has the advantages including compact structure, low data communication difficulty, and strong algorithm portability; FPGA accelerates the algorithm by about 38%, and it performs in real-time at a rate of 25 f/s.

Key words: pedestrian detection; FPGA + DaVinci architecture; local adaptive threshold; Haar-like; AdaBoost

1 引言

统计数据表明在日益复杂的交通环境中,大量的交通事故发生在夜间,其中行人目标更容易发生致命事故。使用先进的驾驶员辅助系统(ADAS),可以大大降低交通事故死亡人数^[1]。夜间行人检测已成为辅助安全驾驶系统的重要部分。

通过近十年的技术发展,涌现出了多种多样的行人检测算法和处理架构^[2-4]。相对于雷达、超声波等技术,红外摄像机可以提供更丰富的信息,另外,研究也证明了基于红外的夜视系统具备独特优势^[5-6]。为了在非制冷红外焦平面阵列(UIRFPA)上获取高质量的图像,传统的框架利用基于现场可编程门阵列(FPGA)和数字信号处理器(DSP),FPGA用于时序控制,DSP能够执行更复杂的图像处理算法^[7-8]。然而,DSP处理往往引入复杂的数据交互,增加了硬件实现的难度。文献[9]提出另一种采用虚拟仪器的解决方案,易于后期升级和扩展功能,在此系统中,数据采集由NI PCIe-6536采集卡完成,并采用LabVIEW实现图形界面的编程。

在设计移动行人检测平台时需要考虑众多因素,包括实时性能、检测精度和功耗等^[10]。文献[10]中实现的系统,硬件主要包括×86 CPU和Altera FPGA,其依赖于通用的操作系统支持,难以集成为移动处理平台。文献[11]采用并行结构设计了一种电路,使得算法执行过程中,能够同时处理两个滑动窗口。然而,此类特殊设计的电路只能执行特定算法,即Haar-like特征提取算法和AdaBoost分类算法。文献[12]实现了GPU和CPU协同工作的检测框架,得益于三种并行化技术的运用,运行速度相比于常规CPU提升了30倍以上,但是高功耗限制了其应用范围。

主流的红外行人检测算法,一类以概率模板匹配为基础,通过构建多组距离、多种姿态的行人模板,进而实现特定区域的行人匹配^[13];另一类通过设计、提取特征,结合机器学习分类的检测方法,具有更高的检测准确性。例如:文献[14]引入的方向梯度直方图(HOG),具备较好地描述人体的能力,后续结合支持向量机(SVM)对其分类,获得了极高的识别精度。然而,HOG特征的提取需要高维度计算,是一个相当耗时的过程。文献[15]的方法,受局部二进模式(LBP)用于人脸识别中的启发,将其

作为行人特征,并采用级联的自适应增强算法(AdaBoost)分类器,得到了较好的效果。

本文提出了一种基于FPGA+DaVinci架构的车载行人检测系统,FPGA用于逻辑控制以及图像加速处理算法,DaVinci处理器的ARM子系统实现了数据传输功能,DSP子系统实现了行人特征提取和分类。同时,提出了一种简洁、高效的行人检测算法,该算法基于感兴趣区域(ROI)分离和Haar-like特征训练的AdaBoost分类器。实验结果表明,FPGA+DaVinci的结构能够充分利用UIRFPAs的成像特性,画质清晰;此外,充分利用了FPGA的加速性能,最终该系统实现了25 f/s的实时行人检测。

2 系统硬件组成

车载行人检测系统由红外摄像机、移动检测平台和人机交互界面三部分组成。热像仪安装在车辆前方,以采集感兴趣区域视频信息,随后送入移动处理平台上进行行人检测,并实时地将提示信息呈现在人机交互界面上,同时具备了视频存储、回放功能。系统图如图1所示。

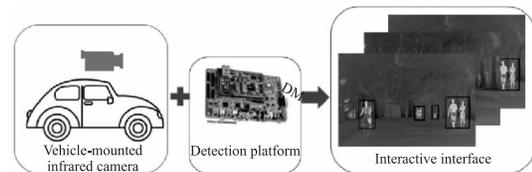


图1 车载行人检测系统组成框图

Fig. 1 Diagram of vehicle-mounted pedestrian detection system

该系统采用FPGA+DaVinci的构架,减小了数据通信难度并保证了高实时性,其中,FPGA是逻辑控制和图像预处理的核心,DaVinci处理器作为移动行人检测平台。该系统硬件主要由Xilinx Artix-7 FPGA和TI DaVinci DM6467T视频处理器组成。

3 FPGA功能模块设计

3.1 热像仪驱动逻辑

FPGA具有高速并行、可在线编程的优点,并且可嵌入软核处理器和专用IP核,通常用于实现探测器时序控制、非均匀校正、盲元补偿、图像增强、视频流编码等功能。热像仪的功能框图如图2所示:提供UIRFPAs工作的时序信号,并驱动ADC对模拟输出信号进行采样;进而图像以流水线方式依次流入预处理模块,有效地降低了输出延迟,简化了系统结构。

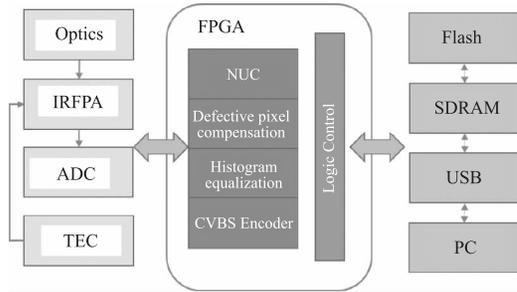


图2 FPGA 功能模块框图

Fig. 2 Block diagram of FPGA function

考虑到实时计算量和校正效果等因素,两点校正方法通常被用于热成像仪。当数字信号流入 FPGA 内部时,利用预存储的 NUC 系数及盲元标志,实时计算获得校正结果。统计直方图用于增强图像,将原始图像的灰度直方图从比较集中的区间,变成全局范围内的均匀分布,可以增强局部的对比度而不影响全局^[7]。最后按照 BT. 656 视频格式,将图像有效数据 (Active Data)、消隐 (Blank)、同步信号 (EAV、SAV) 有机编码生成视频流,送入后续处理平台。

同时,为了满足多路参数和实时图像的吞吐量,设计了 SDRAM 轮询机制:采用轮转法 (Round Robin),根据优先级不同,将所有就绪的数据排成队列;每次满足读写请求时,通过高效的 Burst 操作将一定量的数据缓存在片上 RAM;完成后将其送至就绪队列末尾,继续下一个轮询周期。其中,每次 Burst 操作的数据量和轮询优先级的设计,是保证实时响应的重点。该机制包含仲裁模块、地址计算、底层控制 IP 核,过程示意如图 3 所示。

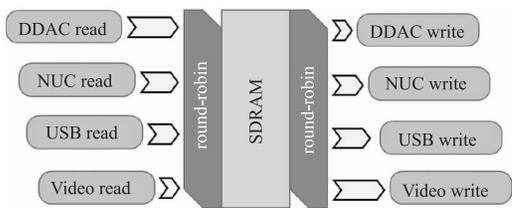


图3 SDRAM 轮询机制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SDRAM polling

3.2 预处理算法加速

为了减轻 DSP 的运算量,对本算法的自适应阈值分割、连通区域标记进行移植,采用 FPGA 进行加速。传统的连通区域标记方法,往往需要对全图进行两次遍历,第一遍根据像素邻域确定当前点的标记,第二遍将等效的标记合并。此类算法不仅会引入延时,对于使用 FPGA 获取图像流的设备,还增加

了图像缓冲的成本^[16]。

本系统采用单次遍历算法实现连通区域标记,结构框图如图 4 所示。当图像流进入模块时,使用滑动窗口扫描全部像素,其中存储了邻域中已处理的四个像素标记;标记选择模块根据邻域寄存器中的内容,对当前像素点赋标记;行缓冲的标记结果可在换行时更新,因此,无需存储全图的临时标记结果;遍历过程中维护的合并表,采用深度搜索以合并所有等效标记;每个连通区域的像素值,将送入数据表用以后续基本特征的计算。

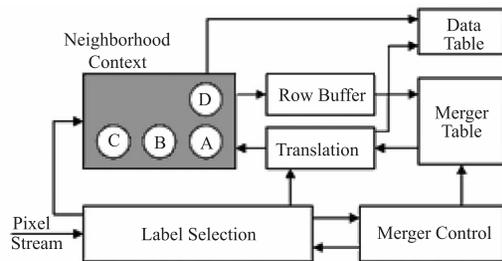


图4 单次遍历算法结构图

Fig. 4 Structure diagram of single traversal algorithm

4 移动检测平台设计

4.1 硬件逻辑功能

TI DaVinci 视频处理器集成了 DSP 和 ARM 的优点,其接口丰富、容易调试、计算能力强,非常适用于移动视频处理。其内部包含的 ARM926EJ-S 处理器工作频率可达 300 MHz,可以运行嵌入式 Linux 操作系统,有效实现对各种外设的控制和应用程序的执行;同时具有 MJCP 和 HDVICP 两个协处理器,可实现 MPEG、H. 264 等格式的压缩处理,大大减小了数据量,方便了传输和存储^[17]。

主控板上的模拟视频采集由 TVP5150AM1 芯片实现,它将采集到的 CVBS 信号转换为 8 位 BT. 656 格式数据输出到 DM64x 的视频前端 (VPFE) 图像采集端口,进行特定预处理后,视频数据经过缓存模块,实现编码输出或者压缩存储至 SD 卡。视频信息的处理流程如图 5 所示。

4.2 行人检测算法

由于背景复杂、光照不足,行人检测仍然是一个具有挑战性的问题。在移动处理平台上,算法复杂度和效率要求更加严格。本节提出了一种简洁、高效、合理的行人检测算法,流程如下:首先对红外图像采用局部自适应双阈值进行分割;再将二值化图像经过形态学处理,去除噪声像素点;采用单次遍历

算法实现 ROI 标记、分割;然后,通过筛选特征进一步去除虚警区域,包含高宽比、区域面积、主轴方向偏离度^[13]等;利用训练好的 AdaBoost 分类器对头肩部 Haar-like 特征进行分类识别,判别是否为真实有效的行人 ROI;最后框选出有效目标区域。算法流程框图如图 6 所示。

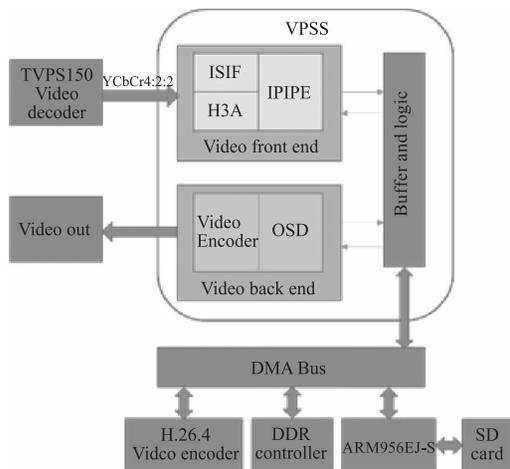


图 5 视频信息处理流程图

Fig. 5 Flow chart of video information processing

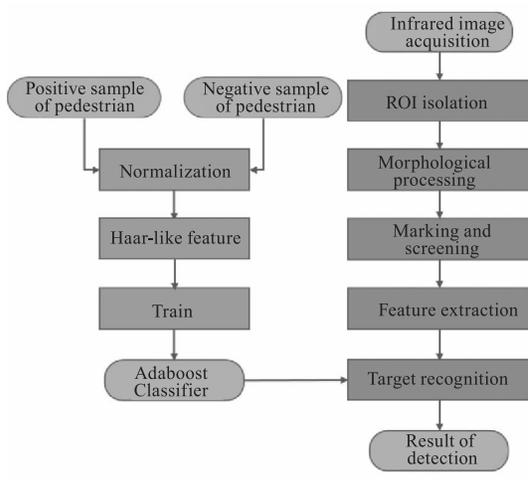


图 6 行人检测算法流程图

Fig. 6 Flow chart of pedestrian detection algorithm

4.2.1 Haar-like 特征

Haar-like 特征是一种简单的矩形特征,其定义为图像中相邻区域内像素点灰度差的差值,能够反映出检测对象局部特征的灰度变化。假设检测窗口尺寸为 $W \times H$,并用 $r = (x, y, w, h, \alpha)$ 表示检测窗口中的一个小矩形特征,其中 $x \geq 0, x + w \leq W, y \geq 0, \alpha$ 为模板角度,RecSum(r_i) 为每一个小矩形内像素灰度和,Haar-like 特征可用公式(1)表示:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N w_i \text{RecSum}(r_i) \quad (1)$$

其中, w_i 表示每个矩形的权重; r_i 表示第 i 个矩形; N 表示该特征中包含的矩形数量。

行人检测一般采用对称矩形特征,2-矩形模板用以检测边缘特征;3-矩形模板用以检测线性特征,如躯干;4-矩形模板能够检测特定角度的特征,如摆动的胳膊、运动中的腿。每个模板可以任意伸缩、平移,得到不同尺寸和位置的矩形特征,过程示意如图 7 所示。

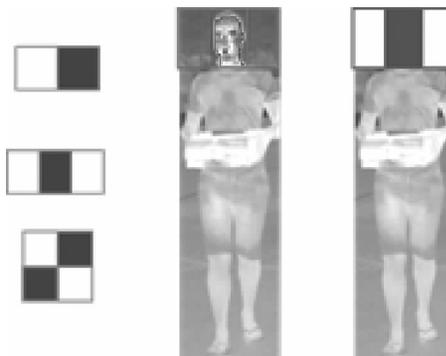


图 7 Haar-like 特征计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Haar-like feature calculation

对于 N 张样本图像,每张图像通过遍历,可以产生 K 个矩形特征,此时特征值矩阵规模为 $N \times K$,导致 Haar-like 特征数目庞大,其中大部分对于正负样本的分类意义不大。同时,由于姿势的原因,行人的四肢等部位复杂多变,但头肩部具备一定的刚性,并且最不容易被遮挡。因此,本算法选取 ROI 高度上面 1/3 部分,作为头肩部计算 Haar-like 特征的区域,检测窗口大小为 32×16 。

4.2.2 AdaBoost 分类器构建

AdaBoost 算法将训练得到弱分类器组合起来,形成的强分类器能获得极低的检测错误率^[12]。弱分类器一般是包含单个或少数几个特征变量的简单分类函数,表示为 $h(x, f, p, \theta)$,由一个特征 $h(x, f, p, \theta)$ 、阈值 θ 以及指示不等号方向的 p 组成,如公式(2):

$$h(x, f, p, \theta) = \begin{cases} 1 & pf(x) < p\theta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中, x 为图像中检测窗口中的所有像素值, $f(x)$ 为特征值。训练某个弱分类器,就是在当前权值下确定特征 f 的最优阈值 θ ,使得这个弱分类器的分类误差最低。

强分类器就是把训练出来的所有的弱分类器按照某种方法进行提升(Boosting),使其分类误差率降低到设计要求。假设训练过程迭代了 T 次,产生 T

个最佳弱分类器 $h_1(x), \dots, h_T(x)$, 则强分类器组如公式(3):

$$C(x) = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^T \alpha_i h_i(x) \geq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^T \alpha_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中, α_i 为每个弱分类器的权值。

本系统训练样本来自 DAIMLER CHRYSLER 行人数据库, 选取像素为 48×96 的数据集, 包含 4800 个行人图像, 5000 个非行人图像。将头肩部 Haar-like 特征值归一化到 $[0, 1]$, 用于训练 AdaBoost 分类器。将候选 ROI 的矩形特征, 使用 AdaBoost 算法进行分类识别, 相对于全局搜索提取特征值的方法, 大大减少了特征的计算次数, 降低了对硬件系统的要求, 有利于提升实时性。

5 实验结果与分析

将配套红外光学镜头、UIRFP A 接口板、FPGA 核心板、Davinci 处理板及车载影音系统, 搭建红外成像行人检测系统, 分别进行成像质量测试、算法有效性验证、硬件加速算法效果分析。

首先, 实时采集室内红外图像, 如图 8 为各阶段效果图。可见, 图 8(a) 中未对图像进行 NUC 处理, 目标只有大体轮廓、细节几乎不可见, 完全被掩盖在探测器的固定底纹噪声下; 图 8(b) 为进行 NUC 处理后, 目标轮廓更加清晰, 图像灰度分布更合理; 图 8(c) 经盲元补偿后, 过渡效果平缓, 降低了盲元对整体图像质量的影响; 图 8(d) 得益于图像增强, 部分区域对比度获得改善, 层次更加分明。经过黑体定标测试, 系统 NETD 在室温下可达 60 mK, 成像质量清晰稳定。

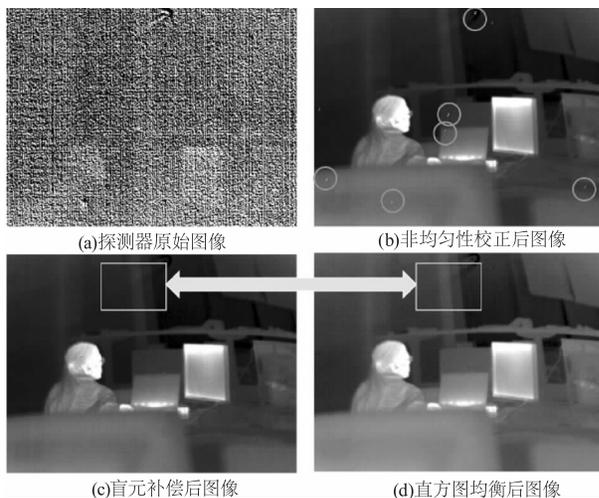


图 8 原始图像与预处理图像对比图

Fig. 8 Comparison of original image and pretreatment image

其次, 为了验证自适应阈值分割的优越性, 将多种方法处理结果进行对比, 如图 9 所示。相对于 Ostu 方法的效果图 9(b), 本方法能够消除明亮背景的干扰, 凸显变化明显的区域, 效果如图 9(c); 后续形态学处理效果如图 9(d), 去除了边界处的噪声, 多处区域的细微黏连也得以分离, 物体内部的空洞填充效果明显, 行人 ROI 得到进一步分离。

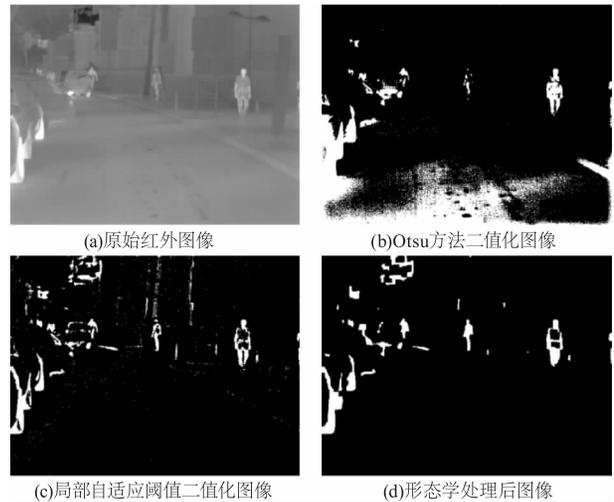


图 9 多种预处理效果对比图

Fig. 9 Comparison of various pretreatment effects

预处理分割出候选 ROI 之后, 如图 10(a) 标记出连通区域, 仍存在较多数目的虚假 ROI; 通过限制基本特征的范围, 筛选得到的 ROI 基本接近真实情况, 如图 10(b) 所示。

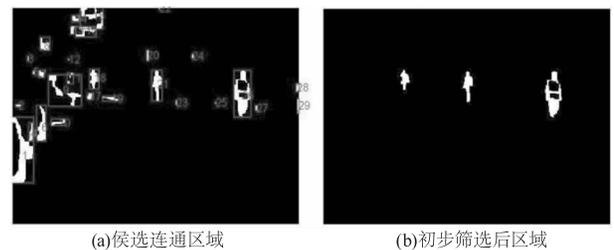


图 10 候选区域 (ROI) 示意图

Fig. 10 Schematic diagram of candidate region (ROI)

通常基于 Haar-like 特征的 Adaboost 算法, 需要在全图范围内搜索提取潜在 ROI, 而本文方法只需要计算有限个候选区域内的特征值, 大大降低了耗时。为了进一步验证头肩部相对于不区分身体部位的 Haar-like 特征更加稳定可靠, 统计对比本文方法和 gentle Adaboost 方法的 ROC 曲线, 如图 11 所示。控制虚警率 (FPR) 相同时, 本文方法较 gentle Adaboost 方法的识别率高出约 10%。以上分析表明, 本文方法具备更佳的检测和实时性能。

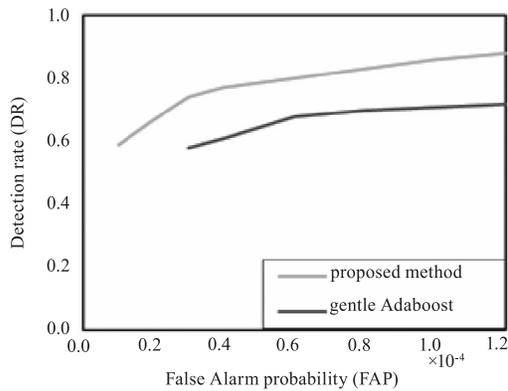


图11 不同方法 ROC 曲线对比

Fig. 11 ROC curve comparison of different methods

进一步地,将截取的视频片段注入平台模块,以串口返回时间戳为统计依据,对比 FPGA 对算法的加速效果,统计结果如表 1 所示。视频实时处理帧频从 18 f/s 加速到 25 f/s,增加幅度约 38.8%,满足车载实时检测的应用场景要求。

表 1 视频注入仿真统计数据

Tab. 1 Video injection simulation statistics

Record number	Video length /frame	Frame rate before acceleration/(f · s ⁻¹)	Frame rate after acceleration/(f · s ⁻¹)
1	357	18.82	25.30
2	684	17.34	24.84
3	1348	17.66	24.11

经过多场次、一定时间的外场车载实验,行人检测模块对于设计距离范围内的行人目标,基本能够精确地标注,并发出提示信息,如图 12 为实际应用场景下,系统呈现的提示交互界面。

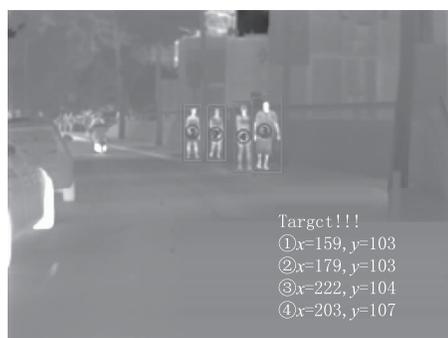


图 12 行人检测结果效果图

Fig. 12 Effect map of pedestrian detection results

6 结论

本文构建了 FPGA 和 DaVinci 处理器协同工作的车载行人检测系统,对主要的子系统进行了

概述。在本文行人检测算法中,将自适应局部阈值用于 ROI 分离,受强光背景的影响小;采用 Adaboost 算法针对头肩部 Haar-like 分类,具有较高的检测精度和处理速度;FPGA 加速效果明显,提高了算法的实时性。面对越来越多的移动检测场景,该系统的架构和算法优化提供了设计参考。

参考文献:

- [1] Shaout A, Colella D, Awad S. Advanced driver assistance systems-past, present and future [C]// Computer Engineering Conference, IEEE, 2012: 72-82.
- [2] O'Malley R, Jones E, Glavin M. Detection of pedestrians in far-infrared automotive night vision using region-growing and clothing distortion compensation [J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53(6): 439-449.
- [3] García F, Escalera A D L, Armingol J M. Novel method for vehicle and pedestrian detection based on information fusion [C]// International Technology Robotics Applications, 2014: 79-88.
- [4] Ess A, Schindler K, Leibe B, et al. Object detection and tracking for autonomous navigation in dynamic environments. [J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(14): 1707-1725.
- [5] Schenkman B N, Brunnström K. Camera position and presentation scale for infrared night vision systems in cars [J]. Human Factors & Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2010, 17(5): 457-473.
- [6] Mahlke S, Rösler D, Seifert K, et al. Evaluation of six night vision enhancement systems: qualitative and quantitative support for intelligent image processing [J]. Human Factors, 2007, 49(3): 518.
- [7] Zamanlooy B, Vaghef V H, Mirzakuchaki S, et al. A real time infrared imaging system based on DSP & FPGA [C]// Pacific Rim Conference on Advances in Image and Video Technology, Springer-Verlag, 2007: 16-23.
- [8] ZHANG Junju, CHANG Benkang, QIAN Yunsheng, et al. Uncooled infrared imaging system based on FPGA [J]. Infrared & Laser Engineering, 2008, 37(4): 579-582. (in Chinese)
- [9] Zhang N, Lv J, Zhou Y, et al. Research on infrared ima-

张俊举, 常本康, 钱芸生, 等. 基于 FPGA 的非制冷红外热成像系统研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 579-582.

- ging system of UIRFPA based on virtual instrument[C]// International Conference on Electronic Measurement & Instruments, IEEE, 2011:117-120.
- [10] Hurney Patrick. Real-time detection of pedestrians in night-time conditions using a vehicle mounted infrared camera[D]. NUI Galway, 2016.
- [11] Kim S, Park S, Lee S, et al. Design of high-performance pedestrian and vehicle detection circuit using Haar-like features[C]// TENCON 2012 - 2012 IEEE Region 10 Conference, IEEE, 2013:1-5.
- [12] Machida T, Naito T. GPU & CPU cooperative accelerated pedestrian and vehicle detection[C]// IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, IEEE, 2011:506-513.
- [13] MENG Hua. Research and implementation of pedestrian detection system at night based on template matching [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 孟华. 基于模板匹配的车载夜间行人检测系统的研究与实现[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
- [14] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2005:886-893.
- [15] Huang Z. Vehicle pedestrian detection algorithm based on AdaBoost[C]// International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City, IEEE, 2016:973-976.
- [16] Johnston C T, Bailey D G. FPGA implementation of a single pass connected components algorithm[C]// IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications, IEEE, 2008:228-231.
- [17] LI Peng. The research and implement of infrared video detection system based on DAVINIC[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- 李鹏. 基于 DAVINIC 技术的车载红外行人检测系统的研究和实现[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.