

基于 ZYNQ 平台非制冷红外视频采集系统的设计^{*}

郜 峰^{1,2} 陈 畅^{1,2} 杨晓鹏^{1,2} 贾俊杰^{1,2} 杨云鹏^{1,2} 李奇峰^{1,2} 马翔云^{1,2}

(1. 精密测试技术及仪器全国重点实验室(天津大学) 天津 300072;
2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘要:针对非制冷红外相机图像存在背景噪声大、对比度低以及基于个人计算机的视频采集系统便携性差等问题,提出了一种基于 ZYNQ 全可编程片上系统平台的红外视频采集系统。该系统通过集成直方图均衡、核范数最小化以及一维引导滤波等多种图像处理算法,在提升图像对比度的同时有效抑制噪声。为了加快处理速度,系统采用直方图伪均衡方法优化直方图均衡的计算效率,并针对核范数最小化和一维引导滤波设计了高效的滤波模块架构,实现了两种滤波方法的高速并行处理。实验结果表明,所提出的红外视频采集系统能够将图像的粗糙度、均方根对比度和信息熵分别提升至原始图像的 17.4、3.15 和 2.16 倍,显著改善了红外图像的视觉效果和细节表现。基于 ZYNQ 平台的设计不仅具有高度集成化的特点,还具备较快的处理速度,能够满足实时处理的需求。与传统的 PC 平台相比,该系统在便携性、功耗和成本方面具有显著优势,为红外视频采集技术的实际应用提供了一种高效、可靠的解决方案。

关键词:红外图像处理;ZYNQ;核范数最小化;一维引导滤波

中图分类号: TP23; TN79 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510. 1010; 510. 5010

Design of uncooled infrared video processing system based on ZYNQ platform

Gao Feng^{1,2} Chen Chang^{1,2} Yang Xiaopeng^{1,2} Jia Junjie^{1,2} Yang Yunpeng^{1,2} Li Qifeng^{1,2} Ma Xiangyun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problems of high background noise, low contrast and poor portability of PC-based video acquisition system in uncooled infrared camera images, a ZYNQ fully programmable system-on-chip-based infrared video acquisition system is proposed in this paper. By integrating many image processing algorithms such as histogram equalization, kernel norm minimization and one-dimensional guide filtering, the system can improve image contrast and effectively suppress noise. In order to accelerate the processing speed, the system uses histogram pseudo-equalization method to optimize the computational efficiency of histogram equalization, and designs an efficient filter module architecture for kernel norm minimization and one-dimensional guided filtering, which realizes high-speed parallel processing of the two filtering methods. The experimental results show that the proposed infrared video acquisition system can increase the roughness, RMS contrast and information entropy to 17.4 times, 3.15 times and 2.16 times of the original image, respectively, and significantly improve the visual effect and detail performance of the infrared image. The ZYNQ-based design is not only highly integrated, but also has a fast processing speed to meet the needs of real-time processing. Compared with the traditional PC platform, the system has significant advantages in portability, power consumption and cost, and provides an efficient and reliable solution for the practical application of infrared video acquisition technology.

Keywords: infrared image processing; ZYNQ; nuclear norm minimization; one-dimensional guided filtering

0 引言

红外视频监控技术在环境检测^[1]、医学^[2]、军事^[3]和国防^[4]等领域有着广泛的应用,红外成像技术可以在多种条件下提供重要的数据和信息。在红外视频成像系统的实际应用中,功耗低、体积小、价格便宜、使用寿命长的非制冷型红外成像系统逐渐取代了制冷型的红外成像系统。然而,非制冷型红外相机往往存在着信噪比与检测效率相互制约的问题,与其材料、制造工艺有关^[5-8]。尤其在温差不大的物体之间,由于热辐射相似,导致红外图像的对比度较低,使得目标与背景的区分变得困难,对信噪比有着更高的要求。此外,非制冷型的红外相机在成像过程中会存在各种噪声,导致信噪比降低,红外图像模糊且噪点较多。

针对上述问题,目前有多种算法可以有效的提升由非制冷红外相机所获取图像的信噪比^[9-11],主要集中于以个人电脑(personal computer, PC)为数据处理核心,尽管其在灵活性和软件资源丰富性方面具有一定的优势,但存在实时性差、且功耗较高的缺点,整体的硬件资源利用率较低。在很多场景下,如在航拍时,红外相机监测会产生大量数据,传输到地面后还需再次进行处理,增加了数据处理的工作量,实际应用中需要兼顾高速采样与实时获取高质量的红外图像。

为此,本文提出一种基于 ZYNQ 平台的非制冷红外视频采集与处理系统,利用其集成的高级精简指令集机器(advanced risc machines, ARM)与现场可编程逻辑门阵列(field-programmable gate array, FPGA)异构架构,兼顾系统的控制能力与并行计算能力,突破传统 PC 平台在功耗与实时性方面的限制。在系统设计上,本文创新性地在 FPGA 侧实现了直方图均衡、核范数最小化滤波与一维引导滤波等图像增强算法,构建了高效滤波处理架构,不仅提升了红外图像的对比度和清晰度,还有效抑制了条纹噪声和坏点干扰。同时,系统具备高集成度、低延迟、可实时处理等优势,显著提升了红外视频系统在复杂环境下的实际应用性能。通过上述设计,本文开发了一套高集成度、高便携性、高清晰度的红外视频采集系统,解决了红外图像在高速采样与高质量获取之间的技术难题。

1 红外图像增强算法

1.1 直方图均衡算法

红外图像获取时,光照不均匀和环境噪声等因素往往会影响最终的图像质量。必要的图像增强处理有利于改善图像显示效果。直方图均衡作为图像增强处理的基

础算法^[12],原理简单,技术成熟,并且能显著提高照明不足的图像质量。

直方图均衡法基于一定的假设条件进行图像灰度的重新计算,可以得到总体灰度分布接近均匀的直方图。图像直方图是图像像素的统计结果,能够表现出图像灰度级的分布情况,红外航拍中拍摄到的图像由于复杂拍摄环境和技术的局限性,灰度级无法完全分布于整个颜色范围,容易出现灰度级集中的现象。而直方图均衡方法的主要思想是通过图像的非线性拉伸,将图像的灰度级分布从某个集中的区间重新均匀分配至整个灰度级范围,增大图像的对比度。

直方图均衡算法的步骤如下:

1) 计算红外图像的直方图,设原始图像有 N 个像素,每个像素的灰度级范围为 $0 \sim L-1$,计算每个灰度级 i 的像素数量 n_i ,并得到图像的概率密度函数(probability density function, PDF),如式(1)所示。

$$p(i) = \frac{n_i}{N} \quad i = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, L-1 \quad (1)$$

2) 计算累积分布函数(cumulative distribution function, CDF),累积分布函数 $c(i)$ 是概率密度函数 $p(i)$ 的累加和,如式(2)所示。

$$c(i) = \sum_{j=0}^i p(j) \quad i = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2)$$

3) 映射旧灰度级到新灰度级,利用累积分布函数将旧的灰度级 i 映射到新的灰度级 i' ,映射关系如式(3)所示。

$$i' = [(L-1)c(i)] \quad (3)$$

使用上述映射关系,将原始图像中的每个像素灰度级 i 映射为新的灰度级 i' ,得到均衡化后的图像。

1.2 核范数最小化去噪算法

核范数最小化的实现主要基于鲁棒主成分分析(robust principal component analysis, RPCA)^[13-15],用于从给定的图像数据中提取低秩部分(A)和稀疏部分(E)。RPCA 的基本思想是将一个观测矩阵分解为两个部分:低秩矩阵 A (代表图像的主体结构),以及稀疏矩阵 E (代表图像中的异常或噪声)。该算法通过交替最小化的方式迭代进行求解,在每一步中优化 A 和 E ,最终达到分离低秩和稀疏部分的目标。其表达式如式(4)所示。

$$\min_{A,E} \|A\|_* + \lambda \|E\|_1 \text{ subject to } A + E = img \quad (4)$$

式中: $\|A\|_*$ 是矩阵 A 的核范数(即 A 的奇异值和); $\|E\|_1$ 是 E 的 L1 范数(即所有元素的绝对值之和); λ 是稀疏项的正则化参数; img 为原始红外图像。通过奇异值分解和软阈值法交替更新 A 和 E ,最终找到低秩矩阵和稀疏矩阵的最优解。

1) 对矩阵进行奇异值分解,如式(5)所示。

$$\mathbf{U}, \boldsymbol{\Sigma}, \mathbf{V} = SVD(\mathbf{img} - \mathbf{E} + \frac{1}{\mu} \mathbf{Y}) \quad (5)$$

式中:SVD为奇异值分解算法; $\boldsymbol{\Sigma}$ 是奇异值矩阵; \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别是左右奇异矩阵; \mathbf{img} 为原始图像矩阵; \mathbf{E} 为稀疏部分; μ 是正则化参数; \mathbf{Y} 为拉格朗日乘子。

2) 更新奇异值矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 并重新计算低秩矩阵 \mathbf{A} , 如式(6)所示。

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} (\max(\boldsymbol{\Sigma} - \frac{1}{\mu}, 0)) \mathbf{V}^T \quad (6)$$

式中: \max 为求最大值操作。

3) 更新稀疏矩阵 \mathbf{E} , 如式(7)所示。

$$\mathbf{E} = sign(X) \max\left(|X| - \frac{\lambda}{\mu}, 0\right) \quad (7)$$

式中: $sign$ 为判断 X 正负的函数, $X = \mathbf{img} - \mathbf{A} + \frac{Y}{\mu}$, 为中间变量。

4) 更新拉格朗日乘子 Y , 如式(8)所示。

$$Y = Y + \mu(\mathbf{img} - \mathbf{A} - \mathbf{E}) \quad (8)$$

5) 检查收敛条件,如式(9)所示。

$$\frac{\|\mathbf{img} - \mathbf{A} - \mathbf{E}\|_F}{\max\left(\|\mathbf{img}\|_2, \frac{\|\mathbf{img}\|_\infty}{\lambda}\right)} < tol \quad (9)$$

式中: $\|\mathbf{img} - \mathbf{A} - \mathbf{E}\|_F$ 为当前残差的 F 范数, $\|\mathbf{img}\|_2$ 为原始图像矩阵的 2 范数; $\|\mathbf{img}\|_\infty$ 为原始图像的无穷范数; λ 是稀疏项的正则化参数; tol 为最终收敛条件。

6) 更新步长 μ , 计算过程如式(10)所示。

$$\mu = \min(\mu \cdot \rho, \mu_{\max}) \quad (10)$$

式中: \min 为求最小值操作; ρ 为步长增加因子; μ_{\max} 是步长的上限。

经过迭代后,返回分解后的低秩矩阵 \mathbf{A} 和稀疏矩阵 \mathbf{E} , 分别代表输入图像中去除噪声后的图像和噪声图像。

1.3 一维引导滤波算法

经过核范数最小化方法处理后的图像去除了大部分噪声点,但其仍然存在明显的条纹噪声,传感器的差异、读出电路的不同以及硬件的性能都会引起红外图像的条纹噪声,在保证原始图像的清晰度的条件下,对条纹噪声的滤除是一种挑战,本文采用一维引导滤波算法对红外图像进行处理。

一维引导滤波是一种基于局部均值和引导图像的滤波算法,其核心思想是通过引导图像来控制滤波过程,从而在平滑图像的同时保持边缘细节^[16-17]。该滤波方法假设输出图像与引导图像之间存在局部线性关系,对于每个像素点,其输出值为:

$$q_k = a_k I_k + b_k \quad (11)$$

式中: q_k 为输出图像的像素值; I_k 为引导图像像素值; a_k

和 b_k 为线性系数,其计算方式如式(12)、(13)所示。

$$a_k = \frac{Cov(I, p)}{Var(I) + \epsilon} \quad (12)$$

$$b_k = \mu_p - a_k \mu_I \quad (13)$$

式中: $Cov(I, p)$ 为引导图像 I 与输入图像 p 的协方差; $Var(I)$ 为引导图像 I 的方差; μ_p 和 μ_I 分别为输入图像 p 和引导图像 I 的均值; ϵ 为正则化参数。

在实际计算过程中,首先对图像进行行引导滤波操作,其输入图像 I 和引导图像 p 相同,使用一维列向量对每列中的像素进行局部均值处理,获得中间变量 $Cov(I, p)$ 、 $Var(I)$ 、 μ_p 和 μ_I ,并根据式(11)得到滤波后的结果,并将得到的结果与原输入图像进行相减得到原图像与行方向滤波后的图像差异^[18-20]。

将上一步中的结果作为输入图像 I ,原始输入图像 p 作为引导图像,进行列引导滤波操作,使用一维行向量对每行中的像素进行局部均值处理,获得中间变量 $Cov(I, p)$ 、 $Var(I)$ 、 μ_p 和 μ_I ,根据式(11)得到滤波后的结果,并将得到的结果与原输入图像进行相减得到原图像与列方向滤波后的图像差异。

原始图像与经过列引导滤波后得到的图像相减,最终生成了图像差值结果。通过引导滤波方法的处理,原图像中存在的条纹噪声被显著抑制,图像的整体质量得到了明显提升。相比于原始图像,引导滤波结果呈现出更加均匀和清晰的视觉效果,这表明一维引导滤波对噪声去除的有效性。

2 基于ZYNQ的视频采集系统的实现

2.1 硬件架构设计

硬件架构总体设计方案如图 1 所示,由采集板卡和核心板卡两部分组成。本文选用 Xilinx 公司 ZYNQ XCZU3EG 芯片作为主处理芯片。该芯片包含处理系统端(processing system,PS)和可编程逻辑端(programmable logic,PL)两部分。PS 端包含 4 核心 Cortex-A53,用于流程控制和人机交互开发,PL 端为一块 FPGA,包含 360 个 DSP 和 9.4 Mb 的 Block RAM 存储,可用于实时数据计算与缓存。本文涉及的数据处理功能均在 PL 端中开发完成。

基于所提出的红外图像增强方法,使用如图 1 所示的整体架构来搭建红外视频采集系统。图中 Infrared Camera 为红外相机,使用的是艾睿光电科技有限公司的 LA6110,其阵列规模为 640×512×50 Hz,响应波段为 8~14 μm 。

红外相机使用 CameraLink 接口与采集板卡相连,通过 Decoding Chip 解码芯片将低压差分信号(low voltage differential signal,LVDS)转换为并行信号后经过 Protocol

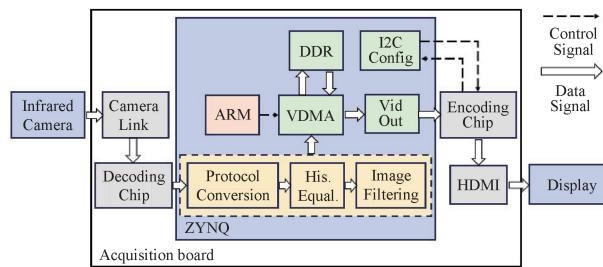


图 1 硬件架构总体设计

Fig. 1 Overall design of hardware architecture

Conversion、His. Equal. 和 Image Filtering 3 个模块, Protocol Conversion 为协议转换模块将并行信号转换为 AXI-Stream 协议的信号; His. Equal. 为直方图均衡模块, 实现直方图的均衡; Median Filtering 模块为核范数最小化和一维引导滤波模块, 实现红外图像的坏点和条纹噪声滤除功能。

经过虚线框中的图像处理模块后, 由视频直接存储器访问(video direct memory access, VDMA)模块将视频流存储在双倍数据速率(double data rate, DDR)片外存储中, 进行数据缓存, DDR 芯片使用 Micron 的 MT40A512M16GE, 共有 4 片, 总容量为 4 GB。缓存后的视频数据经过 VDMA 模块再次读取并输出到 Vid Out 模块, 该模块将视频数据传递到 Encoding Chip 模块, 该模块为 Sil9134 编码芯片, 其配置由 I²C Config 模块完成, 经过编码的数据经过 HDMI 接口进行输出显示。

红外视频采集系统采用“红外相机+采集板卡+ZYNQ 处理板卡”的总体硬件方案, 其具有集成度高、功耗低等优点。

2.2 图像增强算法的硬件实现

1) 直方图均衡的硬件实现

通过灰度的映射使得输入图像转换为每一灰度级上都有近似相同的输出图像。在 PL 端中同时对一张红外图像进行直方图统计和灰度映射会使得处理速度降低, 为了提高直方图均衡方法在 PL 端的运行速度并匹配红外相机的帧率, 采用直方图伪均衡的方法, 即使用当前帧的统计结果对下一帧图像进行灰度映射, 其运行流程如图 2 所示, 其中虚线表示映射查找表生成路径, 实线表示视频产生路径。

直方图统计和积累模块(histogram statistics and accumulation, HSA)对当前图像帧(current frame image, CFI)进行直方图统计, 计算每个灰度级别的像素数量并进行累计, 为映射函数的计算提供数据。函数计算和映射模块(function calculation and application, FCA)根据累计的直方图数据来计算映射函数, 并将映射函数应用在下一帧图像(next frame image, NFI)中, 生成经过直方图

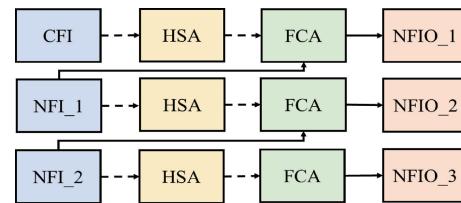
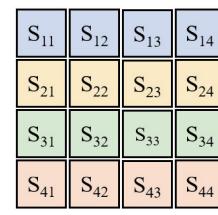


图 2 直方图伪均衡实现流程

Fig. 2 Implementation process of histogram pseudo equalization

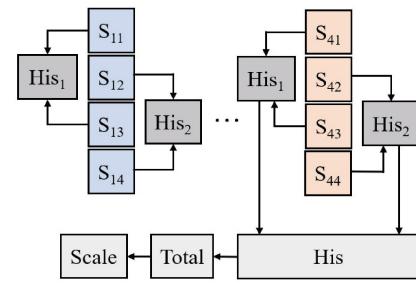
均衡后的下一帧输出图像(next frame image output, NFIO), 该映射函数定义了如何将原始灰度值转化为新的灰度值, 来实现直方图均衡化。

直方图伪均衡使用当前帧的直方图信息来改善下一帧的视觉效果, 为了在两帧间隔时间 0.02 s 内完成一帧图像的直方图均衡统计, 采用了如图 3 所示的方法对一帧红外图像进行直方图均衡处理, 产生灰度统计并生成查找表。



(a) 输入图像

(a) Input image



(b) 直方图均衡生成查找表过程

(b) Histogram equalization to generate lookup table process

图 3 直方图灰度统计流程

Fig. 3 Histogram grayscale statistical process

图 3(a) 为一张 4×4 尺寸的红外图像, 由像素点 S₁₁、S₁₂~S₄₄ 组成; 图 3(b) 为直方图均衡查找表的生成过程。为提高图像处理的并行度与吞吐率, 系统采用双数组 His1 和 His2 同时对不同灰度级像素进行计数, 并将两个长度为 256 的数组进行数组分块, 等效划分为 256 个 1×1 的独立单元, 从而增加读写端口数量, 提高 PL 端的数据处理效率。

统计完成后, 对 His1 和 His2 对应项求和, 得到最终的灰度直方图 His。随后遍历灰度级, 依次累加每个灰度以下的像素总数, 并结合图像尺寸计算每个灰度对应

的映射值,生成长度为 256 的查找表 Scale,用于后续图像帧的灰度映射处理。

2) 图像滤波模块的硬件实现

图像滤波模块(image filtering)的整体框架如图 4 所示,主要由两部分组成,核范数最小化滤波模块(robust principal component analysis filter, RPCA Filter)和一维引导滤波模块(1D Guide Filter)。这两个模块协同工作,旨在完成图像的降噪与增强任务。

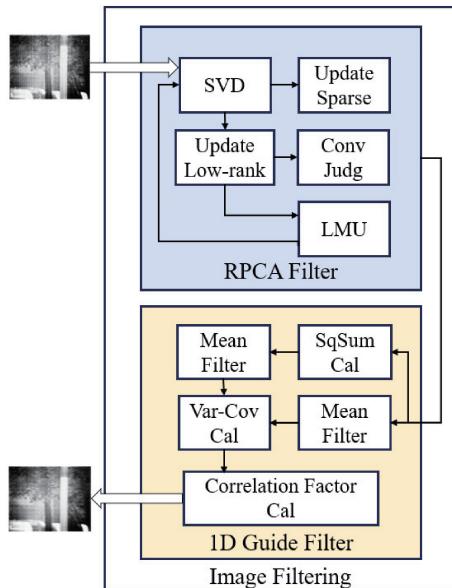


图 4 图像滤波模块架构

Fig. 4 Image filtering module architecture

首先,RPCA Filter 模块利用稀疏低秩分解的思想,通过核范数最小化方法将输入图像分解为低秩部分和稀疏部分。模块通过对图像背景和噪声的分离,实现初步的图像降噪处理。其次,1D Guide Filter 模块在 RPCA 滤波的基础上,进一步对图像进行精细化处理。该模块先计算输入图像的平方和以及局部均值,再通过方差和协方差的计算获得相关因子,最后经过平滑处理,生成增强后的图像输出。

RPCA Filter 模块由多个关键子模块组成,包括奇异值分解模块(singular value decomposition, SVD)、稀疏部分更新模块(update sparse)、低秩部分更新模块(update low-rank)、收敛条件判断模块(convergence judgment, Conv Judg)以及拉格朗日乘子更新模块(lagrange multiplier update, LMU)。这些子模块协同工作,实现了对输入图像的稀疏低秩分解处理。

输入的红外图像首先经过 SVD 模块,对图像进行奇异值分解,生成奇异值矩阵和相关矩阵信息。随后,奇异值矩阵分别输入到 Update Sparse 模块和 Update Low-rank 模块,用于更新图像的稀疏部分和低秩部分。在这一过

程中,LMU 模块对拉格朗日乘子进行动态更新,以确保优化过程的稳定性和收敛性。同时,Conv Judg 模块对当前的计算结果进行收敛性判别。当结果满足预设的收敛条件时,优化过程停止,最终将更新后的低秩图像作为结果输出,并传递至下一阶段的一维引导滤波模块。通过这一整套处理流程,RPCA Filter 模块实现了红外图像的噪声去除和背景提取,为后续的图像增强步骤奠定了基础。

1D Guide Filter 模块由多个功能子模块组成,包括均值滤波模块(mean filter)、平方和计算模块(square sum calculation, SqSum_Cal)、方差协方差计算模块(variance-covariance calculation, Var-Cov Cal)和相关因子计算模块(correlation factor cal)等。这些模块通过流水线式的协作,完成对输入低秩图像的引导滤波处理,从而生成增强后的高质量图像。

当低秩图像输入到 1D Guide Filter 模块后,首先被分别送入 SqSum_Cal 模块和 Mean Filter 模块。在 SqSum_Cal 模块中,计算每个像素的平方和;在 Mean Filter 模块中,对图像进行局部均值滤波操作,以计算滑动窗口内的均值。随后,这两部分的计算结果被传递到 Var-Cov Cal 模块,用以计算图像的方差和协方差,从而描述局部区域的统计特性。接着,方差和协方差的结果被输入到 Correlation Factor Cal 模块,通过公式计算相关因子。相关因子能够有效结合输入图像的局部信息,生成增强后的滤波图像。最终,滤波后的图像结果被输出到 VDMA 模块,VDMA 模块将其写入 DDR 缓存中,供后续处理或存储使用。通过 1D Guide Filter 模块的处理,不仅进一步增强了图像的细节,还有效抑制了噪声,为整个图像处理框架提供了精细化的图像优化能力。

3 功能验证与测试

3.1 测试平台搭建

为验证所设计的红外视频采集与处理系统的功能与性能,本文搭建了一套完整的测试平台。测试平台主要包括非制冷型红外相机、ZYNQ 处理板卡、便携式显示屏、PC 以及相关通信与供电模块。红外视频采集系统如图 5 所示,红外相机通过 CameraLink 接口将采集到的视频数据传输至 ZYNQ 板卡,在板卡内依次完成直方图均衡、核范数最小化滤波和一维引导滤波等图像处理操作。处理后的视频数据通过 HDMI 接口输出至便携式显示屏,实现图像的实时展示,方便对图像质量的主观评价与系统性能的直观观测。PC 主要用于对 ZYNQ 采集系统进行波形调试和比特流文件的烧录,辅助完成系统配置与开发支持。

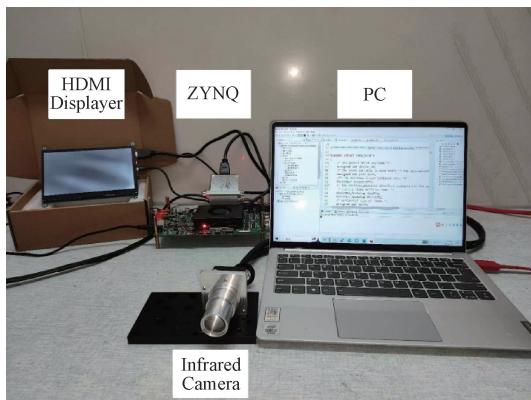


图 5 红外视频采集系统

Fig. 5 Infrared video acquisition system

3.2 硬件模块设计与验证

为了验证系统的性能指标, 使用 Vivado 中的在线逻辑分析仪对关键模块的信号进行抓取, 进行测试, 结果如图 6 所示。

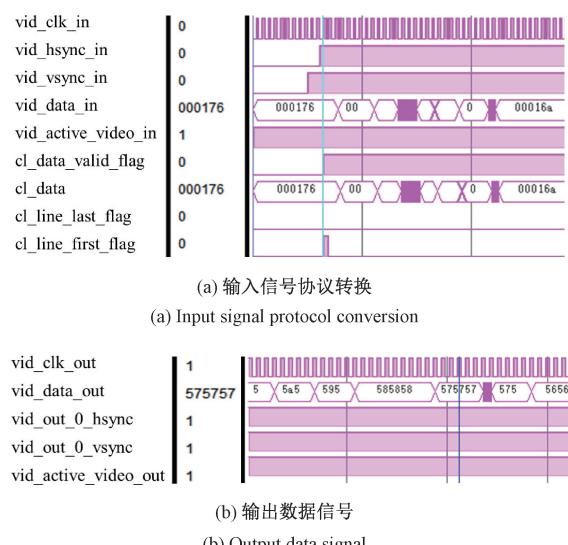


图 6 模块功能验证

Fig. 6 Module function verification

图 6(a) 所示为协议转换模块的时序图, 该模块对解码芯片产生的信号进行协议转换, 转换为 AXI-Stream 协议的数据。其中输入信号由时钟信号 `vid_clk_in`、行同步信号 `vid_hsync_in`、帧同步信号 `vid_vsync_in`、并行数据输入信号 `vid_data_in` 和数据有效信号 `vid_active_video_in` 组成, 输出信号以 `cl` 起始, 其中 `cl_data_valid_flag` 为输出数据有效信号、`cl_data` 为并行数据输出信号、`cl_line_last_flag` 为行结束信号、`cl_line_first_flag` 为帧起始信号。如图 6(b) 所示, 为经过滤波处理后的视频数据输出 `Vid Out IP` 核的信号, `vid_data_out` 为输出数据, RGB 三

通道同时为经过截取后的 8 bit 数据, 实现灰度显示。

3.3 滤波模块性能测试

在室外条件下将采集得到的红外图像数据使用硬件仿真, 对得到的结果进行评估, 图 7 为对测试图片进行处理流程中产生的中间结果。

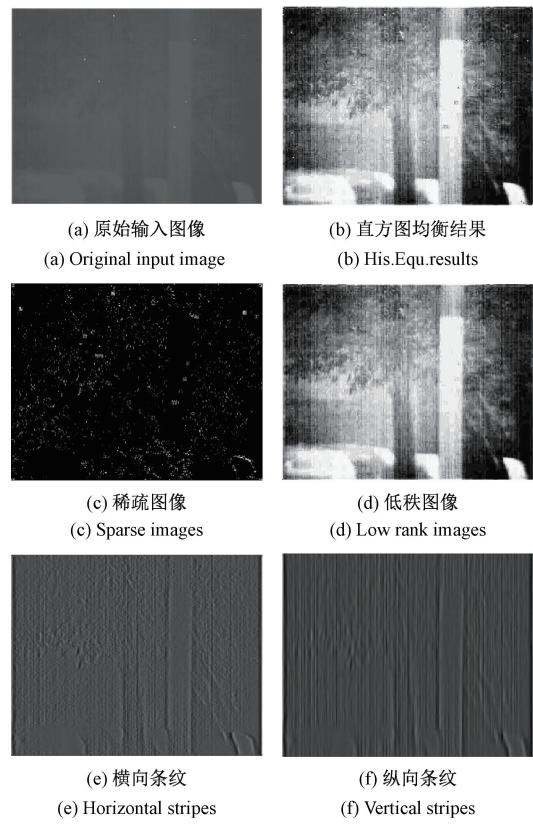


图 7 图像处理的中间结果

Fig. 7 Intermediate results of image processing

其中图 7(a) 为原始图像, 经过直方图均衡后产生的结果如图 7(b) 所示, 对图 7(b) 进行核范数最小化滤波后产生图 7(c) 和 (d), 其中图 7(c) 为稀疏图像; 图 7(d) 为低秩图像, 对图 7(d) 进行后续的一维引导滤波处理后产生的中间结果为图 7(e) 和 (f), 其中图 7(e) 为横向条纹, 图 7(f) 为纵向条纹。

经过上述的处理过程后, 产生的最终结果如图 8 所示, 该图像为经过直方图均衡、核范数最小化滤波和一维引导滤波后产生的结果。

3.4 视频采集系统性能测试

以室外为拍摄背景, 使用提出的红外视频采集架构搭建的红外视频采集系统对行人进行拍摄, 获得原始的红外图像。为了排除光照对成像的影响, 在不同的时间段进行数据采集, 并对采集到的图像使用硬件实现的滤波模块进行处理。其结果如图 9 所示, 经过处理后的图像在对比度、噪声水平和细节保留方面表现出显著的提



图 8 图像处理最终结果

Fig. 8 Final result of image processing

升。处理后的图像对比度增强,使得行人与背景之间的区分更加明显,同时噪声水平显著降低,图像更加清晰。

在对非制冷型红外相机所获得的图像进行处理后,使用粗糙度(roughness)、均方根对比度(root mean square contrast, RMSC)和信息熵(entropy)进行定量评估。这些指标能够从不同角度反映图像的质量和特征。

1) 粗糙度是描述图像纹理特征的重要参数,反映了图像中纹理基元的大小和复杂程度。较高的粗糙度通常意味着图像包含更多的细节和变化,而较低的粗糙度则表示图像更平滑、均匀。在图像处理中,粗糙度可用于评估纹理增强的效果。

2) RMSC 是衡量图像对比度的指标,通过评估像素值的分布来反映图像的对比度。如果像素分布较为分散,RMSC 值较大,表明图像对比度较高;反之,若像素分布集中,RMSC 值较小。这一指标可用于评估图像增强技术对对比度的改善效果。

3) 信息熵是评价图像信息丰富度的重要指标,反映了像素值分布的随机性和复杂性。信息熵越大,表示图像中的信息量越丰富,像素值分布越均匀,图像的细节和纹理也越复杂。信息熵常用于评估图像压缩、编码以及图像处理后的信息保留情况。

从表 1 可以看出,原始图像图 9(a)3 种评价指标参数处于较低的水平,经过直方图均衡和滤波处理 3 种指标都有明显提高,经过处理后得到的图像图 9(b1) 粗糙度为原图像的 31.3 倍,均方根对比度为原图像的 3.28 倍,信息熵为原图像的 2.21 倍;图 9(b2) 粗糙度为原图像的 19 倍,均方根对比度为原图像的 3.14 倍,信息熵为原图像的 2.59 倍;图 9(b3) 粗糙度为原图像的 2.04 倍,均方根对比度为原图像的 3.03 倍,信息熵为原图像的 1.67 倍;实验结果表明,经过该系统处理后的红外视频图像,其粗糙度平均提升了 17.4 倍,均方根对比度平均提升了 3.15 倍,信息熵平均提升了 2.16 倍。说明本研究提出的视频采集系统使图像的细节更清晰,表面结构

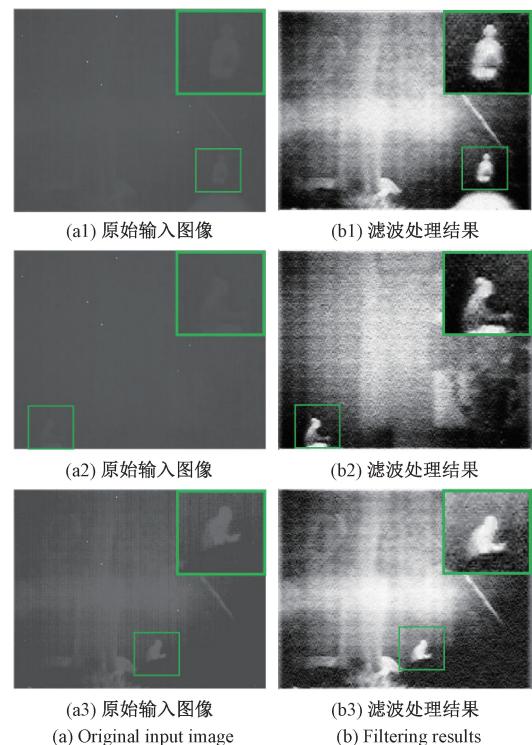


图 9 不同场景的红外图像与滤波处理结果。

其中绿框部分为图像的局部放大

Fig. 9 Infrared images of different scenes and filtering results.

The green box indicates a partial enlargement of the image

更加明显,能够更好的实现红外视频采集功能,有助于后续的目标检测、纹理分类等任务。

表 1 指标评估

Table 1 Indicator evaluation

Method	Original			Output		
	(a1)	(a2)	(a3)	(b1)	(b2)	(b3)
Image						
Roughness	0.03	0.05	0.46	0.94	0.95	0.94
RMSC	22.4	23.4	24.2	73.6	73.7	73.4
Entropy	3.61	3.08	4.78	7.99	7.99	7.99

4 结 论

针对红外视频图像存在的对比度低、噪声大以及高速采样与高质量获取相互制约等问题,本文提出了一种基于 ZYNQ 板卡的红外视频采集与处理系统。该系统集成了直方图均衡化、核范数最小化滤波以及一维引导滤波等多种图像处理方法,能够高效地对红外视频数据进行实时采集与优化处理,不仅显著增强了图像的视觉效果,还有效保留了图像的细节信息。同时,相较于传统基

于PC的处理方式,本系统克服了实时性差、功耗高及整体硬件利用率低等缺陷,充分发挥了ZYNQ平台软硬件协同处理的优势,为红外视频的高效传输与应用提供了可靠支撑。未来工作将进一步优化系统的噪声抑制能力,引入自适应机制,以应对复杂场景下背景干扰和信噪比波动带来的挑战。

参考文献

- [1] SCHYMANSKI D, OBMANN B E, BENISMAIL N, et al. Analysis of microplastics in drinking water and other clean water samples with micro-Raman and micro-infrared spectroscopy: Minimum requirements and best practice guidelines [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2021, 413(24) : 5969-5994.
- [2] MARTINEZ-JIMENEZ M A, LOZA-GONZALEZ V M, KOLOSOVAS-MACHUCA E S, et al. Diagnostic accuracy of infrared thermal imaging for detecting COVID-19 infection in minimally symptomatic patients [J]. European Journal of Clinical Investigation, 2021, 51(3) : e13474.
- [3] AARTHI V, VISALI R, NAGARAJAN K K. Smart spying robot with ir thermal vision [C]. 2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). IEEE, 2021, 1: 183-187.
- [4] WANG S, DU Y, ZHAO S, et al. Multi-scale infrared military target detection based on 3X-FPN feature fusion network [J]. IEEE Access, 2023, 11: 141585-141597.
- [5] YADAV P V K, YADAV I, AJITHA B, et al. Advancements of uncooled infrared microbolometer materials: A review [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 342: 113611.
- [6] YU Y. Technology development and application of ir camera: Current status and challenges [J]. Infrared Millim. Wave, 2023, 1: 1-7.
- [7] XIE X, CHEN X, ZHU J, et al. Internal stray radiation analysis of uncooled thermal infrared imaging spectrometer [C]. Seventh Asia Pacific Conference on Optics Manufacture and 2021 International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (APCOM and YSAOM 2021). SPIE, 2022, 12166: 1658-1671.
- [8] GUILLAUMONT M, ALTAZIN S, CARDOSO A, et al. Recent thermoresistive material evolutions at LYNRED for improving uncooled microbolometer products thermal sensitivity [C]. Infrared Technology and Applications XLVIII. SPIE, 2022, 12107: 281-296.
- [9] WANG WEI, XU DEHAI, REN MINGYI. An improved infrared image adaptive enhancement method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11) : 20210086.
- [10] THUKRAL R, ARORA A S, KUMAR A, et al. Denoising of thermal images using deep neural network [C]. Proceedings of International Conference on Recent Trends in Computing: ICRTC 2021. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 827-833.
- [11] ZHANG J, ZHOU X, LI L, et al. A combined stripe noise removal and deblurring recovering method for thermal infrared remote sensing images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-14.
- [12] DHAL K G, DAS A, RAY S, et al. Histogram equalization variants as optimization problems: A review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28: 1471-1496.
- [13] GAO Q, ZHANG P, XIA W, et al. Enhanced tensor RPCA and its application [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 43(6) : 2133-2140.
- [14] ZHANG C Y, HU W R, JIN T Y, et al. Nonlocal image denoising via adaptive tensor nuclear norm minimization [J]. Neural Computing and Applications, 2018, 29 (1) : 3-19.
- [15] XIE Y, GU S H, LIU Y, et al. Weighted schatten p-norm minimization for image denoising and background subtraction [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25 (10) : 4842-4857.
- [16] GUO X, LI Y, MA J, et al. Mutually guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018; 1-1. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2883553.
- [17] 赖欣,王储,陈航.低照度下人脸检测MSRRCR光频分段滤波增强算法 [J].电子测量与仪器学报,2022, 36(2) : 96-106.
- [18] LAI X, WANG CH, CHEN H. MSRRCR optical frequency segmented filtering enhancement algorithm for face detection under low illumination [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2) : 96-106.
- [19] LI B, CHEN W, ZHANG Y. A Nonuniformity correction method based on 1D guided filtering and linear fitting for high-resolution infrared scan images [J]. Applied Sciences, 2023, 13(6) : 3890.
- [20] CAO Y, YANG M Y, TISSE C L. Effective strip noise removal for low-textured infrared images based on 1-D guided filtering [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 26 (12) : 2176-2188.

- [20] LU C H. Stripe non-uniformity correction of infrared images using parameter estimation [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 107: 103313.

作者简介



郜峰, 2023 年于天津大学获得硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为光电信号处理。

E-mail: gaofteng9777@tju.edu.cn

Gao Feng received his M. Sc. degree from Tianjin University in 2023. He is currently a Ph. D. candidate at Tianjin University. His main research interest includes optoelectronic signal processing.



陈畅, 2024 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为光学检测技术。

E-mail: 16622109803@163.com

Chen Chang received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2024. He is currently a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main

research interest includes optical detection technology.



杨晓鹏, 2023 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为光学检测技术。

E-mail: xiaopnegyang6@tju.edu.cn

Yang Xiaopeng received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2023. He is currently a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interest includes optical detection technology.



马翔云(通信作者), 博士, 天津大学精密仪器与光电子工程学院助理研究员, 主要研究方向为光学仪器开发与微生物快速检测。

E-mail: mxy1994@tju.edu.cn

Ma Xiangyun (Corresponding author) PhD, assistant researcher, School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University. His main research interests include development of optical instruments and rapid detection of microorganisms.