

改进型 CLAHE 图像增强算法及其 FPGA 实现^{*}林立茂¹ 杨朝阳² 伍明诚¹ 王仁平¹ 阴亚东¹

(1. 福州大学物理与信息工程学院 福州 350108; 2. 福建中医药大学中医证研究基地 福州 350122)

摘要:为解决 CLAHE 算法硬件资源消耗量大的问题,从硬件实现的角度对算法进行两方面改进。针对裁剪阈值,提出了一种普适性裁剪阈值确定方法,基于信息熵和结构相似性构造了品质因数,以品质因数最佳作为评判标准确定硬件实现中的裁剪阈值,在平衡图像增强对比度和失真度的同时,避免消耗硬件资源对图像数据本身进行大量计算。针对超阈值像素再分配,提出了一种改进型分配方法,将超阈值像素仅均分给未超阈值的灰度级,且若其再次超阈值则停止分配,在降低图像失真度的同时,避免反复像素分配带来的硬件开销。在改进型 CLAHE 算法的基础上,完成基于 FPGA 的低照度图像增强系统实现,实验结果表明,在普适性裁剪阈值下,增强后的图像能够普遍获得更高的品质因数,具有更佳的综合效果;改进型像素再分配方法对比常规方法,图像在信息熵平均损失 3.28% 的代价下结构相似性可平均提升 8.88%;低照度图像增强系统可实现 640×480@60 fps 的图像采集与处理。本设计可为图像增强算法的硬件实现提供一种新的参考。

关键词: 图像增强;CLAHE 改进算法;裁剪阈值;像素再分配;FPGA

中图分类号: TN911;TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Research on the improved CLAHE image enhancement algorithm
and its FPGA-based implementationLin Lipeng¹ Yang Zhaoyang² Wu Mingcheng¹ Wang Renping¹ Yin Yadong¹

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. TCM Syndrome Research Base, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, China)

Abstract: In order to solve the problem of high hardware resources consumption in the CLAHE algorithm, two improvements are made to the algorithm from the perspective of hardware implementation. For the cropping thresholds, a method for determining the universal clipping threshold is proposed. The Figure Of Merits (FOM) is constructed based on Information Entropy and Structural Similarity, and the clipping threshold in hardware implementation is set using the best FOM as the evaluation criterion to balance the contrast and distortion degree of the image enhancement and avoid consuming hardware resources to perform extensive calculations on the image data itself. For the redistribution of pixels exceeding the threshold, an improved superthreshold pixel redistribution method is proposed, which only distributes pixels to grayscale levels that do not exceed the threshold and stops redistribution if they exceed the threshold again. This method reduce the distortion while avoiding hardware costs caused by repeated pixel distribution. On the basis of the improved CLAHE algorithm, the low illumination image enhancement system based on FPGA is completed. The experimental results show that image enhancement processing based on the universal cropping threshold can generally achieve higher FOM, thus having better overall image enhancement effect. Compared with conventional methods, the improved pixel redistribution method can increase the average SSIM of the image by 8.88% at the cost of an average IE loss of 3.28%. The low light image enhancement system can achieve image acquisition and processing of 640 × 480 @ 60 fps. This design can provide a new reference for the hardware implementation of image enhancement algorithm.

Keywords: image enhancement; CLAHE improved algorithm; clipping threshold; pixel redistribution; FPGA

0 引言

低照度条件下图像对比度低、细节丢失等问题是当前

图像采集中普遍存在的缺陷,为弥补这一不足,通过图像增强技术提升低照度下的图像质量成为图像处理领域中的研究热点。近年来,随着医学诊断^[1-2]、水下探测^[3-4]、视频监

控^[5-6]等低照度图像采集场景对图像增强的旺盛需求,基于直方图均衡化算法^[7-9]、Retinex 算法^[10-12]、物理模型增强算法^[13-14]等主流图像增强算法的改进成果颇多。其中,直方图均衡化算法由于具有资源消耗少、易于硬件实现等优点,受到了业界的重视和青睐。

对比度限制自适应直方图均衡化算法(contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)作为众多直方图均衡化算法中的代表性算法,不仅能够实现图像分区域的均衡化处理,适应图像不同区域的各自灰度分布特征,还引入了对比度限制操作,有效地解决图像过度曝光或信噪比下降等问题。当前 CLAHE 算法各种软硬件设计层出不穷,在软件方面,Chang 等^[15]通过分析每个子图像灰度的平均值与标准差,分块地设置裁剪阈值,使灰度均匀的区域和灰度变化范围大的区域呈现不同处理效果,使图像增强效果更自然,但其裁剪阈值仍需要依靠经验获得,缺乏广泛的适用性和说服力。Paul 等^[16]将裁剪阈值设置为图像灰度平均值与灰度中位数之和的一半,有效地增强了主要图像信息且能保留原始图像的整体明暗分布特性,但存在未进行超阈值像素再分配操作而丢失部分图像信息的问题。Liu 等^[17]使用图像灰度均值和方差确定出裁剪阈值,使用多次迭代法进行超阈值像素再分配操作,能够较为完整地保留图像信息,但其多次迭代操作存在耗时长、速度慢等缺点。在硬件实现方面,曹宸瑞^[18]对传统直方图均衡法进行了研究与改进,将低照度环境分为面状光源、带状光源、点状光源三种光源环境,设置不同的阈值点与均衡区间对图像进行分段处理,在增强图像暗部细节的同时有效抑制亮部的过度增强,并使用 Altera Cyclone IV 系列 FPGA 对改进算法进行硬件实现,单个像素处理速度达到 104 ns,但是其提出的改进算法主要针对视频监控系統,具有一定的应用局限性。Xu 等^[19]将直方图均衡化算法与机器学习相结合,通过监督学习的方式构建了一个可见性评估模型来寻找最佳的剪辑阈值,在自适应直方图均衡化的基础上对图像进行动态阈值裁剪,在得到更自然的增强效果的同时有效抑制了噪声,并使用 Altera Cyclone V 系列 FPGA 实现 200 万像素 30 帧的视频流处理,但是机器学习方法的加入使得硬件开销陡增,不利于算法的轻量化、高效率硬件实现。Honda 等^[20]利用 FPGA 并行处理的特点,基于 Vivado HLS 高层次综合工具,将对比度限制自适应直方图均衡化算法以数据流的形式在 Xilinx PYNQ 系列 FPGA 中实现,提升了算法的处理速度,实现了 200 万像素 30 帧视频流处理,但其仅针对 CLAHE 的高层次综合代码进行上板验证,其实际图像增强效果有待进一步验证。

以上几种 CLAHE 算法在确定裁剪阈值时都需要对图像进行大量计算,耗费较多的处理资源,花费较长运行时间,且裁剪阈值的再分配方式也有改进空间。针对 CLAHE 算法的硬件实现,如何确定普适且有效的裁剪阈值确定方法以及如何优化像素再分配方法是值得探讨研究

的课题。本文从硬件实现的角度,对 CLAHE 算法进行了两方面改进。1)提出了一种普适性裁剪阈值确定方法,基于信息熵和结构相似性构造了品质因数作为评价指标,通过统计业界现有公开的低照度图像数据集中图像的信息熵和结构相似性,得到最佳 FOM,进而确定硬件实现中的普适性裁剪阈值,既让图像增强处于相对较优区间,又避免避免消耗硬件资源对图像本身进行大量计算。2)提出了一种改进型超阈值像素再分配方法,通过将超出阈值的像素仅平均分配给未超阈值的灰度级,且若其达到阈值则舍弃多余像素的方法,既让实际裁剪阈值更接近所设阈值下的预期效果,又避免反复像素分配带来的硬件开销。最后,本文在改进型 CLAHE 算法的基础上,基于可编程逻辑阵列(field programmable gate array, FPGA)完成了低照度图像增强系统的硬件实现,所设计的硬件系统能够满足 $640 \times 480 @ 60 \text{ fps}$ 的图像采集与增强处理。

1 图像增强算法改进

CLAHE 算法的核心是对比度限制操作,其分为超阈值像素裁剪和超阈值像素再分配 2 个步骤。算法首先根据所设置的裁剪阈值,裁剪出各灰度级中超出阈值的像素,再将这些像素以适当的方式进行再次分配,使像素点在各灰度级中的分布更加均匀,达到限制对比度的效果。本文针对对比度限制中的 2 个步骤,在经典 CLAHE 算法的基础上,从硬件实现的角度对算法进行改进,下面分别进行分析介绍。

1.1 普适性裁剪阈值确定方法

裁剪阈值的设置在 CLAHE 中是极为重要的操作,裁剪阈值设置不当将导致增强后的图像产生过度曝光或信息丢失等问题。本文利用结构相似性^[21](structural similarity, SSIM)和信息熵^[22](information entropy, IE)2 个客观评价指标评判不同裁剪阈值下的图像增强效果。

结构相似性是基于评价图像处理前后失真程度的指标,它分别使用均值、标准差和协方差作为度量标准,从亮度、对比度和结构一致性 3 个方面衡量两张图片之间的相似性^[23],计算出一个综合性数值,如式(1)所示。

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (1)$$

式中: μ_x 和 μ_y 为两张图片灰度均值,代表两张图像的亮度; σ_x 和 σ_y 为灰度值方差,代表两张图像的对比度; σ_{xy} 为灰度值协方差,代表两张图像的结构一致性; $c_1 = (k_1L)^2$ 和 $c_2 = (k_2L)^2$ 是用于平衡亮度和对比度的参数, L 为是像素值的动态范围, k_1 和 k_2 通常 0.01 和 0.03。SSIM 值在 $-1 \sim 1$,越接近 1 表示图像失真度越小,处理质量越好。

信息熵是基于评价图像细节丰富程度的指标,它将图像看作一个离散随机变量,每个像素的灰度值具有一定的概率分布,通过各灰度级的概率密度与其 \ln 值的相乘累加,表示图像像素点灰度值在灰度级范围中的分布情

况^[24],如式(2)所示。

$$IE = \sum_{i=0}^k P(x_i) \times \ln P(x_i) \quad (2)$$

式中: $P(x_i)$ 为第 i 个灰度级的概率密度, k 为第 k 个灰度级。信息熵的值越大,说明图像对比度越大,细节内容越丰富。

由于信息熵是针对单幅图像的评价指标,为了使信息熵也能够体现图像增强前后的对比性,本文将其转化为信息熵之比(ratio of IE, RoIE),通过计算图像增强前后信息熵差值与原始图像信息熵的比值,衡量对比度提升程度,表达式如式(3)所示。

$$RoIE(x) = \frac{IE(x) - IE_0}{IE_0} \quad (3)$$

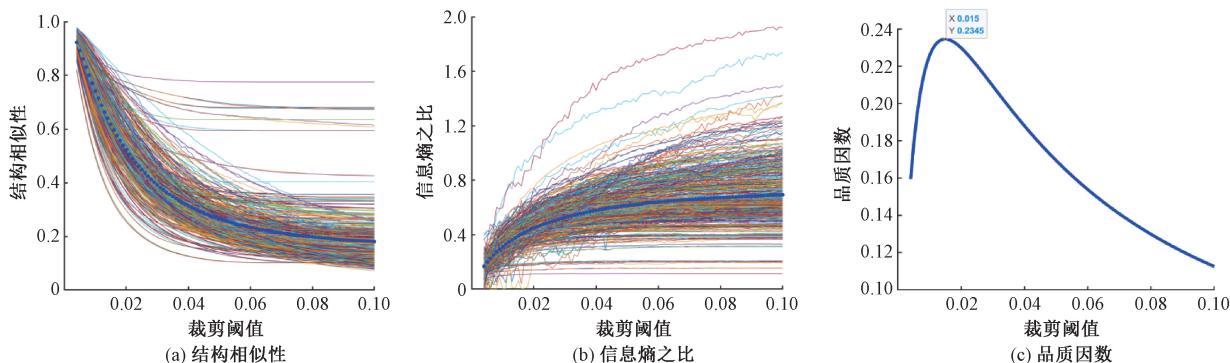


图 1 两个评价指标的统计及品质因数

从统计图中可以看出,若裁剪阈值设置得低,则 RoIE 值低,对比度提高不明显,但 SSIM 值较高,失真度小;反之,若裁剪阈值设置得高,则 RoIE 值提升,图像的细节对比比较明显,但 SSIM 值降低,失真性也变大。基于两个图像评价指标相反趋势和相同数量级的特性,本文构建了一个新的综合性评判指标——品质因数 (figure of merits, FOM),通过将 RoIE 与 SSIM 相乘数值的大小作为图像增强综合效果好坏的评判标准,实现对比度和失真度之间的折中,品质因数表达式如式(4)所示。

$$FOM(x) = RoIE(x) \times SSIM(x) \quad (4)$$

利用 Matlab 中的拟合工具可以得到图 1(a)、(b) 中 SSIM 和 RoIE 平均趋势拟合函数,进而利用式(2)可得到 FOM 函数,如图 1(c) 所示,利用 FOM 的单峰特性,确定 FOM 峰值所对应裁剪阈值作为普适性阈值。从图 1(c) 可以看出,在阈值为 0.015 时取得最大值 0.2345,后续将利用该阈值进行图像增强。

1.2 改进型超阈值像素再分配算法

CLAHE 算法规定当某灰度级拥有的像素个数超过阈值时将进行裁剪,并将裁剪出来的像素再平均分配到各个灰度级上。经典 CLAHE 算法^[17]将超阈值像素平均分配给所有灰度级,然后再进行阈值判断、裁剪和分配;如此反复直至无超阈值像素出现。此方法虽然能最大程度避免过度增强,但硬件开销大,计算时间长。CLAHE 算法的硬

式中: $IE()$ 为增强后图像的信息熵值, IE_0 为原始图像的信息熵值。

基于两个评价指标,本文利用 Wei 等^[25]于 2018 年公开的低光照图像数据集中的 485 张训练图像和 Matlab 软件,将各训练图像使用 CLAHE 算法在不同裁剪阈值下进行图像增强。由于裁剪阈值在 0.1 到最大值 1 之间时两个指标的变化幅度极小,因此本文将裁剪阈值范围设置为最小值 0.004 至 0.1,步进值为 0.001。计算增强后图像的 RoIE 和 SSIM 数值,得到如图 1(a)、(b) 所示的统计结果,其中,彩色实线分别为数据集中 485 张图片在裁剪阈值由小到大变化下,SSIM 和 RoIE 的数值计算和统计结果;蓝色点虚线则为每个裁剪阈值下,485 张图片 SSIM 和 RoIE 的平均值。

件实现中,超阈值像素再分配大多采用一次性分配方法^[15],平均分配给所有灰度级后不再进行阈值判断,以减少资源消耗和提升处理速度,但该方案会导致实际裁剪阈值比设定值偏大,存在图像噪点增多和区域过曝风险。

本文结合以上两种方法的思路提出一种新的再分配算法,其原理为:超出阈值的像素只平均分配给未超阈值的灰度级,且若灰度级中的原个数加上均分后的裁剪像素个数超过阈值,则只增加至阈值,超过部分舍弃。本文改进型方法与传统方法的原理以及对示例图像的处理结果对比如图 2 所示。从图中可以看出,本文所述改进型再分配方法严格遵守了对比度的限制因而最大程度上地控制失真度,SSIM 提升比例明显,虽然由于舍弃小部分像素点而可能损失了小部分图像信息,但 IE 并未明显下降,在一次性分配下,改进算法的实际裁剪阈值小于传统方法实际裁剪阈值,更接近所设阈值下的预期效果。

2 FPGA 实现

2.1 系统架构

本文设计的低照度图像增强系统由输入图像格式转换、图像增强和输出图像格式转换 3 个模块构成,选用 Altera 公司的 EP4CE10F17C8 型号的 FPGA 完成了硬件设计,整体架构如图 3 所示。输入图像格式转换模块根据时钟信号和行场信号,将原始彩色图像由 RGB 格式转换

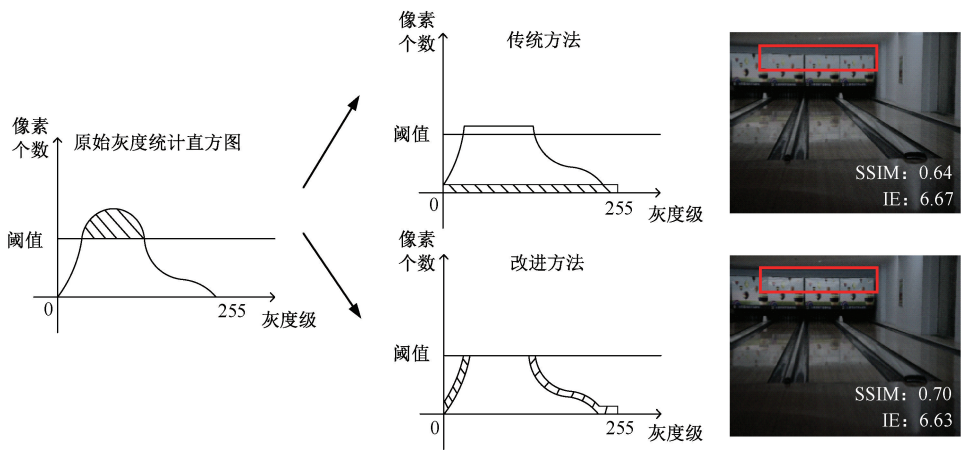


图 2 改进方法与常规方法对比

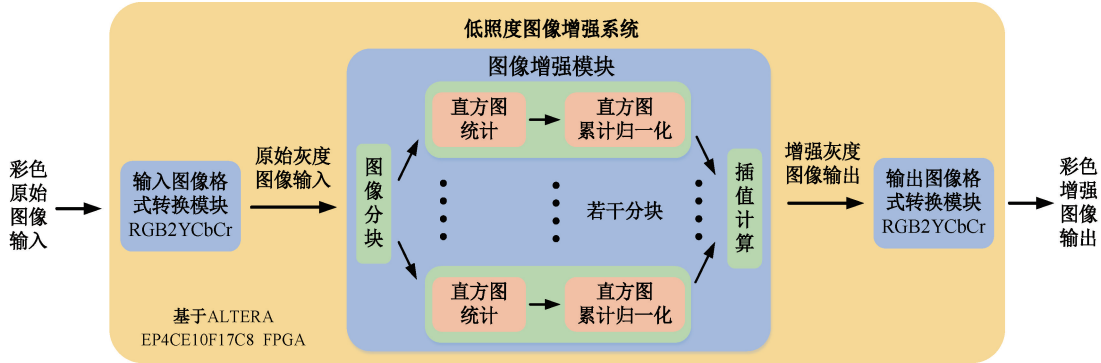


图 3 低照度图像增强系统架构

为 YCbCr 格式;图像增强模块取用 YCbCr 格式图像中的灰度分量 Y,分别进行图像分块、直方图统计、直方图累计归一化和插值计算操作,而色度分量 Cb 和 Cr 保持不变;输出图像格式转换模块将图像再由 YCbCr 格式转换为 RGB 格式输出。由于输入和输出的格式转换模块采用了常规设计^[26],限于篇幅不进行详述,本章主要针对图像增强模块中改进型 CLAHE 算法的 FPGA 实现进行分析介绍。

2.2 图像增强模块设计

图像增强模块采用自顶向下的模块化设计方法,处理流程如图 4 所示,图像数据在时钟信号和行场信号的共同控制下,依序完成图像分块、子块图像直方图统计、子块图像直方图累计归一化和插值计算 4 个步骤,并在统计过程中进行超阈值像素裁剪操作,在累计归一化过程中进行超阈值像素再分配操作,下面分别展开介绍。

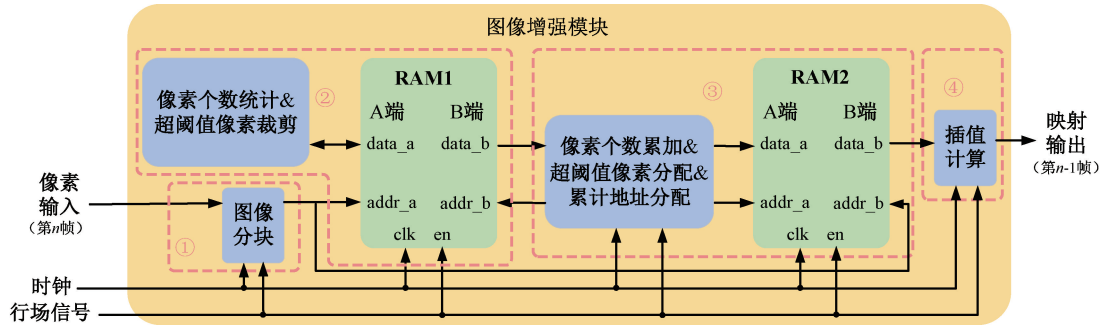


图 4 图像增强模块流程图

1) 图像分块

CLAHE 算法通过将图像划分成若干个局部区域各自独立处理,能更好地针对局部特性进行图像增强。为了降低硬件资源消耗,本设计中 CLAHE 算法将图片分为 4 块。

对应到 FPGA 实现中,需要例化 4 个直方图均衡化子模块。数据流中每个像素点根据行列信息进行位置判断,并归置到对应子模块中,进行当前帧的灰度直方图统计;同时,根据通过上一帧求得的映射函数,结合线性插值的计

算规则,得到当前帧对应的新灰度值,作为子模块的输出。

2) 直方图统计和累计

在每个子模块中,算法首先统计每个灰度级的像素个数,得到各灰度级的离散概率密度函数;在此基础上,对离散概率密度进行累计,得到各灰度级的累积分布函数。对应到 FPGA 实现中,本文调用片上双端口随机存取存储器 (RAM) IP 核(每个 RAM IP 核具有 A 和 B 两组输入/输出端口),以流水线的设计方法实现直方图统计和累计。根据存储器“寻址读数”的原理,以灰度级作为存储地址、像素个数作为地址中数据,构建图像缓存并求出映射函数。由于本文图像处理对象为 30 万像素、灰度级为 256 的图像,因此设定了 19 bits 数据位宽和 8 bits 地址,所需的存储空间为 4.75 kB。为了避免统计和累计数据读写操作冲突,最终例化了 2 个 RAM IP 核进行实现;其中一块用于统计(RAM1)而另一块则用于累计(RAM2),以有效提升处理速度。

流水线的具体工作原理为:在当前帧的场扫描阶段进行直方图统计,像素点灰度级作为 RAM1 的 A 端地址,对该地址中数据进行累加作为对该灰度级的像素个数统计;在场消隐阶段,将统计结果按 0~255 灰度级顺序在 RAM1 的 B 端依序读出,并进行归一化计算,最后依序在 RAM2 的 A 端写入。在读出统计结果的过程中,RAM1 的 B 端同时以写入 0 的方式对 RAM1 反相清零,即累计一个,清零一个,先累计,后清零。在下一帧场扫描阶段,像素点灰度级作为 RAM2 的 B 端读出地址,读出对应的重映射结果,以此类推,循环往复。因此,一张图像至少需要两帧时间完成增强,由于流水线的操作,从第二帧开始,每帧都会输出上一帧图像的增强结果。

3) 超阈值像素裁剪

在本文的改进型 CLAHE 算法中,超阈值像素仅分配给未超阈值的灰度级,因此在超阈值像素裁剪的 FPGA 实现中,不仅要统计超阈值像素个数,还要统计超阈值灰度级个数。本文设置 $cnt1$ 和 $cnt2$ 两个计数器,分别统计超阈值像素个数和超阈值灰度级个数。当统计使能为高时,在每个时钟上升沿进行如下判断:每当当前灰度级像素个数超过阈值,将超过个数累加至 $cnt1$,并将当前灰度级像素个数设置为阈值;若当前灰度级像素个数是第一次超过阈值,还需对 $cnt2$ 进行一次累加操作,对应的流程如图 5 所示。

4) 超阈值像素再分配

在本文的改进型 CLAHE 算法中,需通过对灰度级中像素个数的判断,将超阈值像素仅平均分配给未超阈值的灰度级,因此在超阈值像素再分配的 FPGA 实现中,超阈值像素个数 $cnt1$ 需再分配给未超阈值的灰度级共 $256 - cnt2$ 个,记每个待分配灰度级可分到的像素个数为 $cnt0$,则 $cnt0$ 表达式如式(5)所示,对所得结果向下取整。当累计使能信号为高电平时,在每个时钟上升沿进行如下判

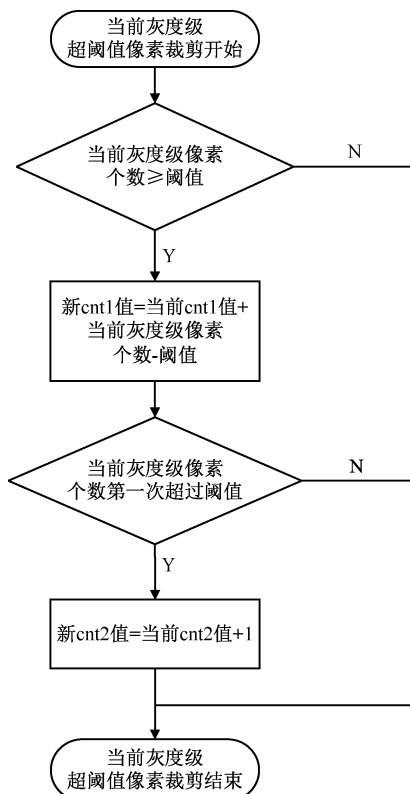


图 5 超阈值像素裁剪流程

断:若当前灰度级的像素个数等于阈值,或加上均分后的裁剪像素个数超过阈值,则分配,否则不分配,流程如图 6 所示。

$$\left\lfloor cnt0 = \frac{cnt1}{256 - cnt2} \right\rfloor \quad (5)$$

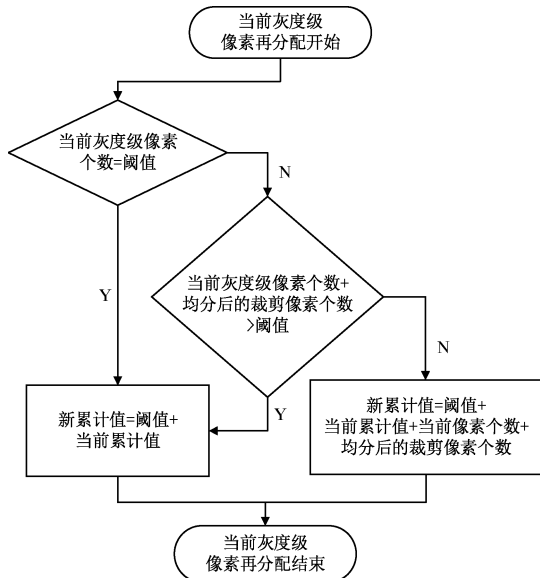


图 6 像素再分配流程

5) 插值计算

当子模块完成上述步骤后,采用双线性插值方法对数

据进行平滑处理以输出最终增强图像。对应到 FPGA 实现中,需根据行列信息,取用相应子模块的输出进行插值计算。设四块图像的中心像素点分别定义为 a、b、c 和 d,各中心点连线及其延长线将图像划分成红、蓝、绿 3 类区域,如图 7 所示。设 x_i 和 y_i 为像素点行列位置, $T_x()$ 为各块中的映射函数, $T()$ 为经插值计算后的输出映射函数,具体的插值方法如下:

(1) 若像素点位于图像的边角区域(图中黄色区域),如 E 点,则其不存在相邻块,无需进行插值计算,输出映射函数即为所在块的映射函数,如式(6)所示。

$$T(E) = T_a(E) \quad (6)$$

(2) 若像素点位于图像边界区域(图中绿色区域),如 F、G 点,则其在横向或纵向上有相邻块,输出映射函数为本身映射函数与横向或纵向相邻块映射函数的线性插值,如式(7)、(8);

$$T(F) = n \times T_a(F) + (1-n) \times T_b(F) \quad (7)$$

$$T(G) = m \times T_a(G) + (1-m) \times T_c(G) \quad (8)$$

其中,

$$n = \frac{x_b - x_{px}}{x_b - x_a}, m = \frac{y_c - y_{px}}{y_c - y_a}$$

(3) 若像素点位于图像 4 个分块中心像素点的连线之间的区域(图中蓝色区域),如 H 点,则其在横向、纵向都有相邻块,输出映射函数为区域本身映射函数与横向、纵向 2 个方向相邻块映射函数的双线性插值,如式(9),其中 n 、 m 同情况(2)。

$$T(H) = m \times [n \times T_a(H) + (1-n) \times T_b(H)] + (1-m) \times [n \times T_a(H) + (1-n) \times T_c(H)] \quad (9)$$

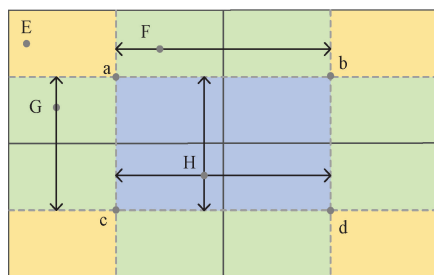


图 7 插值计算示意图

3 实验结果

本文的测试验证使用低光照图像数据集集中的 15 张测试图和 485 张训练图中随机挑选的 45 张,共 60 张图像作为测试样本,结合 Matlab 和 Modelsim 软件工具,对低照度图像增强系统进行仿真验证。原始图像在 Matlab 中转换为文本格式数据,通过 Testbench 输入图像增强模块处理后,从 Modelsim 中读取增强后的文本格式数据,最终在 Matlab 中再转换为彩色图像并分析结果,分别验证改进型 CLAHE 算法中提出的普适性裁剪阈值确定方法和改进型超阈值像素再分配方法以及系统性能,测试流程如图 8 所示。

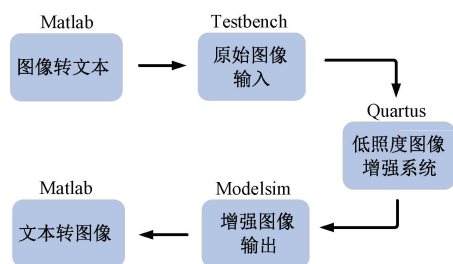


图 8 低照度图像增强系统测试流程图

3.1 普适性裁剪阈值验证

本文在普适性裁剪阈值 0.015 的左右两侧,取 0.01 和 0.02,将 60 张测试样本分别在 3 个裁剪阈值下进行图像增强对比测试。测试结果表明,在 0.015 下进行增强的图像,其品质因素 FOM 普遍高于在 0.01 和 0.02 下进行增强的图像。60 张测试样本中选取的代表性示例图片在不同裁剪阈值增强效果与对应的灰度直方图如图 9 所示,增强图像的右下角标注了各自的 SSIM、RoIE 和 FOM 值。从客观指标评价角度出发,裁剪阈值 0.015 下的增强图像拥有最高的 FOM 值,说明其综合增强效果最好;从主观人工评价角度出发,裁剪阈值 0.01 与 0.015 比较,图像对比度仍较低,增强效果不明显;裁剪阈值 0.02 与 0.015 比较,图像噪点明显,亮处过度曝光。从图像的灰度直方图中亦可看出,普适性裁剪阈值下的图像相比其他两幅增强图,既对原始灰度直方图进行适当的拉伸,提升了对比度,又对各灰度级上的像素个数进行了有效限制,抑制了失真性。因此,本文提出的普适性裁剪阈值确定方法能够使图像增强处于相对较优区间,在对比度和失真度之间做到较好的折中,综合效果更佳。

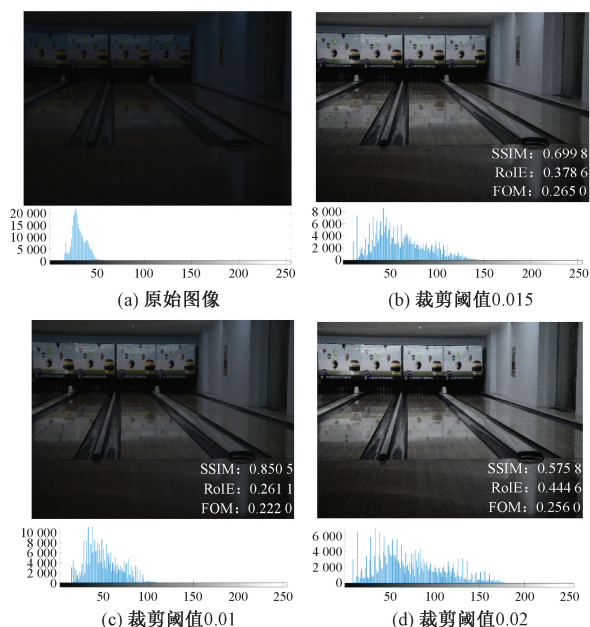


图 9 不同裁剪阈值增强效果与对应灰度直方图

3.2 改进型像素再分配方法验证

本文在相同的普适性裁剪阈值下,分别使用改进型方法和传统算法对 60 张测试样本进行图像增强对比测试。测试结果表明,在平均情况下,改进算法相比传统算法在信息熵损失 3.28%的代价下,结构相似性提升了 8.88%。60 张测试样本客观指标的统计结果如图 10 所示,其中,横坐标为 SSIM,纵坐标为 IE。从图 10 可以看出,改进的分配方法在 IE 值上与传统分配方法结果基本一致,而 SSIM 值相比有所提升,说明改进型超阈值像素再分配方法以损失极小部分图像信息为代价,换取图像较大程度的不失真,抑制了硬件实现中实际裁剪阈值的增大及其所带来的图像噪点增多和过度曝光的问题。

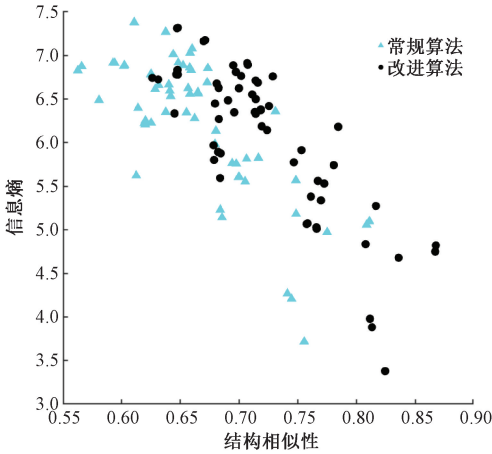


图 10 测试图信息熵和结构相似性统计结果

3.3 资源消耗与运行速度

将低照度图像增强系统的 Verilog 工程代码在 Quartus 中进行编译与综合,得到系统所消耗的资源情况如图 11 所示。从图 11 可以看出,本文的低照度图像增强系统所使用的硬件资源较少,符合轻量化的设计要求。使用 Modelsim 进行仿真测试,在 25 MHz 的时钟频率下,针对分辨率为 640×480 像素的图像进行处理时,可以达到每秒 15.4 ms 的处理速度,满足 60 fps 的图像传输。

| | |
|------------------------------------|-------------------------|
| Family | Cyclone IV E |
| Device | EP4CE10F17C8 |
| Timing Models | Final |
| Total logic elements | 4,697 / 10,320 (46 %) |
| Total combinational functions | 4,558 / 10,320 (44 %) |
| Dedicated logic registers | 875 / 10,320 (8 %) |
| Total registers | 875 |
| Total pins | 44 / 180 (24 %) |
| Total virtual pins | 0 |
| Total memory bits | 49,216 / 423,936 (12 %) |
| Embedded Multiplier 9-bit elements | 24 / 46 (52 %) |
| Total PLLs | 0 / 2 (0 %) |

图 11 系统资源消耗情况

4 结 论

本文从优化硬件资源使用的角度,提出了一种改进型 CLAHE 照度图像增强算法,并基于 FPGA 完成低照度图

像增强系统的硬件实现。提出了一种普适性裁剪阈值确定方法,得出了普适性裁剪阈值为 0.015 作为硬件实现中的经验值,使图像增强处于相对较优区间,且避免消耗硬件资源对图像本身进行大量计算。同时,提出了一种改进型超阈值像素再分配方法,在严格限制对比度的同时避免了反复像素分配所带来的硬件开销,抑制算法硬件实现中实际裁剪阈值偏差的影响,有效降低图像失真性。利用测试集图像对低照度图像增强系统进行验证,实验结果表明,相比相邻裁剪阈值的图像增强结果,在普适性裁剪阈值下增强的图像能够普遍获得更高的品质因数,具有更佳的图像增强综合效果;改进型像素再分配方法对比常规再分配方法,在信息熵损失约 3.28%的代价下,能够使图像结构相似性基本提升了 8.88%;低照度图像系统可满足 640×480@60 fps 的图像采集与增强处理。本文提出的改进型 CLAHE 算法及低照度图像增强系统实现了良好处理效果,可为图像增强算法硬件实现领域的研究提供一种新的参考。

参考文献

[1] PANSE V, GUPTA R. Medical image enhancement with brightness preserving based on local contrast stretching and global dynamic histogram equalization[C]. Xiamen: 2021 10th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2021.

[2] QIN Y, LUO F G, LI M Z. A medical image enhancement method based on improved multi-scale Retinex algorithm[J]. Journal of Medical Imaging and Health Informatics, 2020, 10(1): 152-157.

[3] 胡雨航,赵磊,李恒,等.多特征选择与双向残差融合的无监督水下图像增强[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 190-202.

[4] 孙凌宇,李文清,徐英杰,等.基于改进 U-Net 的水下图像增强算法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2): 106-113.

[5] LEE S L, YANG S H. Efficient low light video enhancement based on improved retinex algorithms[C]. Brisbane: 2023 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops(ICMEW), 2023.

[6] 朱婧雅,王中元.基于相似场景的低照度监控图像增强[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(1): 203-205,210.

[7] TAN Y X, FAN S S, WANG Z Y. Global and local contrast adaptive enhancement methods for low-quality substation equipment infrared thermal images [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-17.

[8] 江巨浪,刘国明,朱柱,等.基于快速模糊聚类的动态多直方图均衡化算法[J]. 电子学报, 2022, 50(1):

- 167-176.
- [9] 韩团军. 改进直方图均衡化算法及 FPGA 实现[J]. 电子器件, 2017, 40(4): 845-848.
- [10] PENG X H, LI X F, GENG S Q, et al. Low-light image enhancement based on FPGA[C]. Xiamen: 2021 IEEE 15th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID), 2021.
- [11] 吉勇, 李晨, 屠大维, 等. 水下光场成像清晰度增强研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 66-72.
- [12] 陆文佳, 崔贝贝, 许乾, 等. 基于 Retinex 图像增强的搜救机器人设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(13): 146-152.
- [13] FENG X M, LI J J, HUA Z. Low-light image enhancement algorithm based on an atmospheric physical model[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79: 32973-32997.
- [14] 陈哲, 周旭, 沈洁, 等. 基于梯度先验的水下图像恢复[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 39-46.
- [15] CHANG Y K, JUNG C, KE P, et al. Automatic contrast-limited adaptive histogram equalization with dual gamma correction[J]. IEEE Access, 2018, 6: 11782-11792.
- [16] PAUL A, BHATTACHARYA P, MAITY S P, et al. Plateau limit-based tri-histogram equalisation for image enhancement[J]. IET Image Processing, 2018, 12(9): 1617-1625.
- [17] LIU J L, ZHOU X C, WAN Z L, et al. Multi-scale FPGA-based infrared image enhancement by using RGF and CLAHE[J]. Sensors(Basel, Switzerland), 2023, 23(19): 8101-8101.
- [18] 曹宸瑞. 基于 FPGA 的增强型图像采集处理系统的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [19] XU C R, PENG Z Z, HU X Z, et al. FPGA-based low-visibility enhancement accelerator for video sequence by adaptive histogram equalization with dynamic clip-threshold [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(11): 3954-3964.
- [20] HONDA K, WEI K J, ARAI M, et al. Clahe implementation on a low-end FPGA board by high-level synthesis[C]. Naha: 2020 Eighth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW), 2020.
- [21] 韩永成, 张闻文, 何伟基, 等. 基于自适应截断模拟曝光和无监督融合的低照度真彩色图像增强算法[J]. 光子学报, 2023, 52(9): 245-259.
- [22] 周辉奎, 顾牡丹. 自适应加权直方图均衡化的红外图像增强[J]. 光学技术, 2023, 49(6): 750-755.
- [23] 曾素云, 林珊玲, 林志贤, 等. 基于邻域灰度信息误差扩散算法的电润湿电子纸研究[J]. 液晶与显示, 2019, 34(3): 317-323.
- [24] 刘娜, 曾小晖. 基于信息熵引导耦合复杂度调节模型的红外图像增强算法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 37-43.
- [25] WEI C, WANG W J, YANG W H, et al. Deep retinex decomposition for low-light enhancement[C]. Aberdeen: 29th British Machine Vision Conference, 2018.
- [26] 闫晓阳, 王华珂, 侯兴松, 等. YCbCr 空间分治的双分支低照度图像增强网络[J]. 中国图象图形学报, 2023, 28(11): 3415-3427.

作者简介

林立芃, 硕士研究生, 主要研究方向为数字集成电路设计、FPGA 开发等。

E-mail: 1007065077@qq.com

阴亚东(通信作者), 博士, 研究员, 主要研究方向为混合信号电路、无线通信、嵌入式系统等。

E-mail: yinyadong@fzu.edu.cn