

DOI:10.16136/j.joel.2022.05.0623

基于 FPGA 的实时幸运区域融合算法

陈柄宇¹, 李彬华^{1,2*}

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 云南省计算机技术应用重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要: 大气湍流对光学目标图像的分辨率会产生随机性的影响。幸运区域融合 (lucky-region fusion, LRF) 是一种针对受大气湍流影响图像序列的图像合成技术, 通过在一系列短曝光图像中选取具有高分辨率的区域进行融合, 从而获得一张清晰的图像。LRF 算法在台式计算机上实现比较简单, 但这是事后处理的方法, 没有实时性。描述一种针对灰度图像流实时地进行提取、分区处理和合成的 LRF 算法及其系统实现技术。根据现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 数字信号处理的特点, 提出了一种适合于 FPGA 处理的实时 LRF 算法。用硬件描述语言对该算法进行逻辑设计, 将其嵌入到一个中小规模的 FPGA 上, 从而构成一个纯硬件的紧凑的 LRF 处理系统。通过模拟的序列图像和在实验室实际拍摄了短曝光序列图像, 对该系统进行了测试。实验结果表明, 所提出的实时 LRF 算法可行, 所实现的 FPGA 系统可以实现输入灰度图像序列的实时动态幸运区域融合, 并最终获得高分辨率的融合图像。

关键词: 大气湍流; 图像处理; 幸运成像; 现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA)

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)05-0495-10

Realtime luckyregion fusion algorithm based on FPGA

CHEN Bingyu¹, LI Binhua^{1,2}

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Computer Technology Application, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Atmospheric turbulence has random effects on the resolution of optical target images. The lucky-region fusion (LRF) is an image synthesis technology aimed at atmospheric turbulence that affects images, it synthesizes a clear image by selecting high-resolution parts from a series of short-exposure images. The LRF algorithm is relatively simple to implement on desktop computer, but it is only a method of post-processing, without real-time performance. This paper introduces an LRF algorithm and its system implementation technology for real-time extraction, partition processing and synthesis of gray-scale image streams. According to the characteristics of field programmable gate array (FPGA) digital signal processing, a real-time LRF algorithm suitable for FPGA processing is proposed. The algorithm is logically designed with a hardware description language, and it is embedded in a small and medium-sized FPGA, so as to form a compact LRF processing system of pure hardware. The system was tested through simulated sequence images and short-exposure sequence images taken in the laboratory. The results show that the proposed real-time LRF algorithm is feasible, and the implemented FPGA system can realize the real-time dynamic fusion of lucky regions of the input gray-scale image sequence, and finally obtain a high-resolution fusion image.

Key words: atmospheric turbulence; image processing; lucky imaging; field programmable gate array (FPGA)

* E-mail: lbh@bao.ac.cn

收稿日期: 2021-09-02 修订日期: 2021-09-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11673009) 资助项目

1 引 言

在对远距离的地面目标或水下目标进行光学观测时,如哨所或战场侦察,潜艇或鱼雷监测,远程目标识别、监视与跟踪等实际应用中,由于大气或水流的湍流效应,目标像会产生随机性的扭曲和模糊,进而导致成像系统对目标的分辨能力的降低,并且随着目标与成像系统之间的距离的不断增大,受湍流影响的严重程度也会随之不断增加。

目前有多种针对受湍流影响图像的复原方法,幸运区域融合(field programmable gate array, FPGA)是其中一种相对简单有效的方法,它是基于幸运成像发展而来的。幸运成像是一种针对大气湍流的天文图像处理技术,它在一系列天文短曝光图像中选取质量较好的帧进行位移和叠加实现对图像的高分辨率复原^[1]。但由于对地面目标成像时,成像的视场远远大于天文目标观测时的视场,处于非等晕条件中,想找到一帧高质量的短曝光图像的机率极低或几乎是不可能的^[2]。因此幸运区域融合方法作为幸运成像方法的拓展衍生,对这种处于非等晕条件中的短曝光序列图像,挑选出序列图像中各帧中高质量的幸运区域,最后再将挑选出来的幸运区域融合实现对非等晕图像的复原。

ZHANG 等^[3]第 1 次对远距离地面非等晕目标的幸运区域融合技术进行了研究,成功应用该技术使英文文字目标达到了可辨识的程度。VORONTSOV 等^[4-6]对受大气湍流影响的图像视频流进行了研究,实现了对大气湍流影响视频流的自动融合,但他们只对算法进行了概述,展示了系统紧凑的外观结构,逻辑设计及实现的技术并未公开。JACKSON^[7]引入保持图(keep map)概念,提出了一种基于硬件加速的 LRF 算法,分别在现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)和图形处理器(graphics processing unit, GPU)上实现了幸运区域融合算法。

杨忠良等^[8-10]对扩展目标幸运成像技术进行了研究,计算了“幸运区域”出现的概率,使用了矩形交叠分块的方法对地面目标进行了研究,讨论了分块数目对结果的影响,对近地扩展目标大气湍流成像的实验观测数据在台式计算机(PC)上进行事后处理得到了较好的结果。李思雯等^[11]在原有偏微分方程的序列图像复原算法基础上进行改进并结合矩形交叠分块的分区方法,提出了一种全新的幸运区域融合算法并在 MATLAB 上实现,在消耗的时间和成像的效果上都有明显的提

升。ZHANG 等^[12]将幸运区域融合算法运用在水下湍流成像的复原中同样也取得了较为理想的结果。高诗竹等^[13]对颜色图像的幸运区域融合算法进行了研究。由此可以分析出,国内对 LRF 算法的研究全部集中在 PC 平台上,目前还没有实时 LRF 算法研究和紧凑便携的 LRF 系统方面的相关报道。

本文对现有的 PC 端的幸运区域融合算法进行改进,提出了一种适合于 FPGA 处理的实时 LRF 算法,以 Verilog 硬件描述语言(hardware description language, HDL)进行了逻辑设计,并在一个中小规模的 FPGA 上进行了系统实现。实验表明该算法及所实现实时 LRF 系统对随机模糊的模拟图像和受大气湍流模糊的序列短曝光文字图像都能获得高分辨的融合图像,并且能满足实时性的要求。

2 幸运区域融合算法

2.1 幸运区域融合算法概述

在受大气湍流影响的成像系统中,由于大气湍流产生的微透镜效应,成像的局部区域分辨率在某些条件下有几率获得接近原有系统衍射限的成像性能,而这些具有高分辨率的区域则称为“幸运区域”。将“幸运区域”融合成复原图像,就成为一种针对受湍流影响图像的事后复原技术。在过去的十几年中,研究人员已提出并验证过多种基于 PC 平台的算法。

根据地面目标成像处于非等晕窗口的特点,即大气湍流对图像中各个部分的影响是相互独立或呈弱相关的,进而大气湍流导致的图像的模糊和畸变也是在各个部分都是各不相同的,对处于非等晕窗口的图像进行分区,使分区后的子图处于同一等晕区中,以保证每个单独的子图中受大气湍流的影响应该是基本相同的。而图像分区的策略目前的研究主要分为 2 个方向:JACKSON 等^[7]使用一种其称为保持图(keep map)的分区方式,所谓保持图即先使用边缘检测算子检测出图像边缘得到边缘图(edge map),再使用一个 5×5 的卷积模板对边缘图(edge map)进行模糊进而得到分区后的子图;这种方式对图像的分区更加灵活且图像融合后的边缘也不会很明显,但是对于具有复杂边缘的图形或者是具有大片且密集的边缘的图像例如大面积的文字,分区后的子图会出现边缘杂乱和子图过大超过等晕区无法获得“幸运区域”等现象。而杨忠良等^[8]使用的矩形交叠分区的方式则不会出现上述的缺点,但是在融合边界上有机率会出现明显的融合边缘。

得到子图之后,对每一块子图使用像质评价函数进行像质评价,取决于大气湍流对图像的影响主要体现在模糊和畸变,尤其是模糊上,像质评价函数一般都选取对图像边缘敏感的算子例如J边缘指示

函数、Sobel边缘检测算子、Laplace算子等^[14,15]。通过边缘检测算子选取出的图像,边缘更为锐利,包含的细节更多。比较子图的像质评价函数,若指标更好则替换对应子图,若较差则舍弃。幸运区域融合算法的基本流程如图1所示。

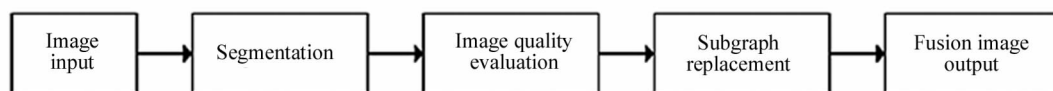


图1 幸运区域融合算法的基本流程

Fig. 1 Basic process of LRF algorithm

2.2 针对FPGA的幸运区域融合算法优化

幸运区域融合算法中,计算量较大的是像质评价。由于算法的分区域处理特点,在基于中央处理器(central processing unit,CPU)的平台上(如PC),各区域的像质评价通常采用串行处理方式。但对于具有多核处理器(如GPU)或者具有天然并行计算能力的处理电路(如FPGA)来说,分区域处理的方式有着极大的优势。只要不采用复杂的像质评价函数,通常的LRF算法相对简单,且易于并行实现。因此加速实时视频处理算法的自然选择是迁移到GPU或FPGA平台。但GPU平台通常体积较大,便携性较差。而基于FPGA平台的处理系统通常比较紧凑,便携性好,即本文选择FPFA的一个原因。

FPGA是由数十万个可配置逻辑门组成的集成电路,它被设计成可通过HDL进行“动态”配置,如VHDL或Verilog。此外,FPGA具有类似于专用集成电路的并行处理能力。在FPGA上实现的设计具有许多优势,特别是适应算法的能力,同时还获得了并行处理加速的能力。对于一个设计合理的系统,FPGA的最大处理比特率远远高于大多数顺序处理器。

在FPGA上执行的LRF算法也遵循上一节所述的通用LRF算法流程,但处理方式、顺序等则需要根据FPGA可并行和流水线、非数值计算的特点进行修改。首先,采用矩形分块的分区方法将输入图像分为均等大小的子图,使用这种策略的原因除了上节中提到的区别外,还因为矩形分块的方式在FPGA上容易实现。实际上,由于输入图像是一个2维阵列,将其连续存储于某内存区域时,使用矩形分块方式,设计时不需要考虑专门的模块对图像进行分块处理,可以直接通过地址来确定地址中存储的像素在图像中的2维坐标或者是确定该像素位于哪一个子图中,计算表达式为:

$$x = addr \% COL, \quad (1)$$

$$y = addr \div COL, \quad (2)$$

式中, x 、 y 为图像的横纵坐标, $addr$ 为数据地址, COL 为图像的宽度, $\%$ 为取余运算, $\div$ 为整除运算。

然后,使用Laplace算子对各个分块子图的图像质量进行计算。之所以采用Laplace算子作为图像质量评价指标,是因为FPGA不便于进行复杂的数学运算,而Laplace算子允许在不直接计算输入图像空间导数的情况下估计图像质量的度量。Laplace算子对于在FPGA上实现时相对容易并更具备实时性。

最后,将当前输入图像的各子图的像质评价与其对应的最优像质评价进行对比,如若当前输入图像的子图评价值大于最优像质评价值,则生成对应的控制信号将对应的子图覆写至复原图像并输出。

3 幸运区域融合算法的逻辑设计与硬件实现

3.1 FPGA系统的总体设计

FPGA系统设计与FPGA器件及其周边硬件高度相关。本系统使用Xilinx公司中小规模的FPGA——Spartan-6系列XC6SLX150芯片为核心的开发板,以千兆以太网接口作为图像数据输入通道,以高清多媒体接口(high definition multimedia interface,HDMI)作为显示输出通道,在FPGA上实现幸运区域融合算法。根据上节描述的实时LRF算法,本实验系统的总体设计如图2所示。

系统的工作流程可简述如下:

1) 工作站使用上位机采用用户数据报协议(user datagram protocol,UDP)通过千兆以太网向FPGA发送图像数据,以太网接收模块对接收到的数据

进行分析处理,提取出包内的有效数据并生成对应的数据有效信号。

2) 第3代双倍数据率同步动态随机存取存储器(double-data-rate three synchronous dynamic random access memory,DDR3)数据输入缓存模块依据以太网接受模块生成的数据信号和有效信号将图像数据缓存在先进先出存储器(first in first out memory,FIFO)中待DDR3写入。

3) DDR3读写控制模块通过读、写命令控制读取缓存FIFO中的数据存储进DDR3存储器和读取DDR3存储器中的数据传输至图像替换模块与HDMI显示数据读取模块。

4) 像质评价函数计算模块同样依据以太网接收模块生成的数据信号和有效信号实时的计算Laplace值并按照对应的分块策略将对应子图的Laplace值相加缓存,生成计算结束信号与一组当前输入图像的各个子图的像质评价函数值。

5) 像质评价函数比较模块在检测到计算结束信号后将当前输入图像的各个子图的像质评价函数值

与对应子图的最佳像质评价函数值进行比较并生成一组对应的比较标志信号,若当前输入图像的某个子图的像质评价函数值大于对应子图的最佳像质评价函数值则将对子图的最佳像质评价函数值替换为当前输入图像的子图的像质评价函数值,并且对应的比较标志信号置1,反之则不替换且对应的比较标志信号置0。

6) 图像替换模块依照像质评价函数比较替换模块生成的比较标志信号将对应的子图替换至相应的DDR3存储区域。

7) HDMI显示数据读取模块依照HDMI的显示时序分次读取DDR3存储器中融合图像的数据。

8) 显示模块将DDR3中存储的融合图像实时的输出至显示器。

需要说明的是,由于FPGA具有高度的并行处理能力,在上述2)、3)、4)3步中是并行处理的,后面的步骤也是与之前的过程同时进行,这是基于FPGA的处理算法与基于CPU的幸运区域融合算法的最大不同点,也是实现实时的幸运区域融合算

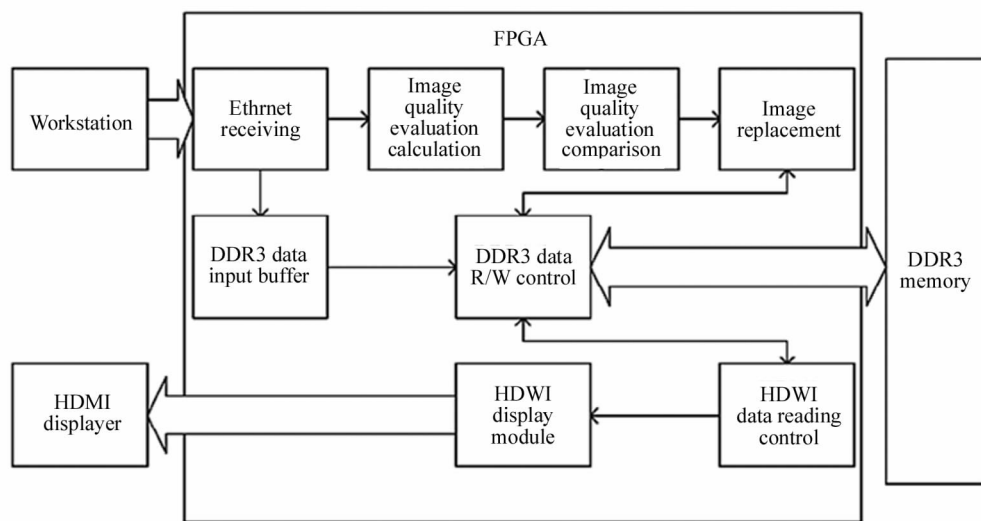


图2 幸运区域融合算法系统的总体设计

Fig. 2 The overall design of the LRF algorithm system

法的关键。

3.2 DDR3数据读写控制模块设计

本模块主要是有序控制将上位机发送的图像数据写入DDR3存储器中和读取DDR3中的数据传输至图像替换模块与HDMI显示数据读取模块,结构如图3虚线框所示。该模块使用了4个DDR3读写端口,其中P0、P1是双向端口,用于输入图像的写入和读出的乒乓操作,P2是单向写端口,用于将确定的图像子块写入DDR3,而P3是单向读端口,用于将需

要输出显示的图像读出并送入HDMI模块。单向端口P2、P3的控制相对简单,分别在图像替换模块和HDMI控制模块中说明。所以,下面主要描述P0、P1这2个双向端口的控制过程及其设计验证。

为了实现图像的无缝存储和处理任务,系统使用乒乓操作对输入图像数据流进行处理,本系统采用了2个32位的DDR3双向读写端口实现“乒乓”操作。“乒乓”操作主要依靠切换2个DDR3双向读写端口P0和P1之间的读写状态对2段DDR3存储空

间分别进行读写操作来实现。当 P0 端口处于写状态时,P1 端口则处于读状态,由于以太网数据输入具有包间延迟这一特性导致写入一帧图像的时间会大于读出一帧图像的时间,所以 P1 端口读取完一帧图像后需等待 P0 端口写完一帧图像再转换读写状态,此时 P0 端口处于读状态,P1 端口处于写状态,如此往复直到所有图像传输完成。

为了验证模块设计的正确性,对总长度为 102 400 个字节的图像的传输过程采用 ChipScope 进行信号的抓取,DDR3 数据控制模块时序图如图 4 所示。

图 4 中 p0addr 与 p1addr 为当前 P0、P1 端口操作的 DDR3 内存地址,范围分别为 0 到 102399 与 102400 到 204799,pp_flag 为乒乓操作标志信号位,为 0 时数据通过 P0 端口写入,为 1 时通过 P1 端口写入,rw_0 与 rw_1 分别对应 P0 与 P1 端口读写状态标志,当其为 1 时,对应的端口处于读状态,当其

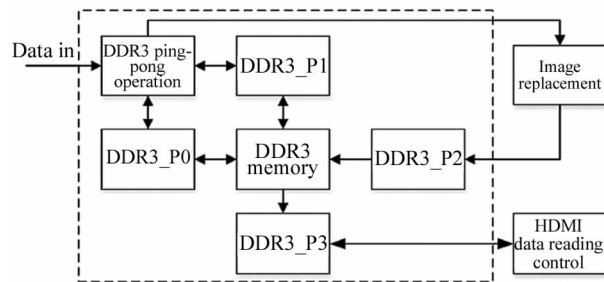


图 3 DDR3 数据读写控制模块结构图

Fig. 3 DDR3 data r/w control module structure diagram

为 0 时,对应的端口可以进行写操作。图 4(a)为一帧图像传输结束时的数据,可以分析出当一帧图像通过传输完成后,对应的端口的读写状态发生了改变,并且 pp_flag 信号翻转,写入的端口切换,但此处由于以太网传输具有包间延迟无法立刻观察到数据写入,图 4(b)为端口读完一帧图像时的数据,可以通过另一个端口的地址得出该端口的写操作还没有完成,并且本端口也完成了读写状态的切换,验证了模

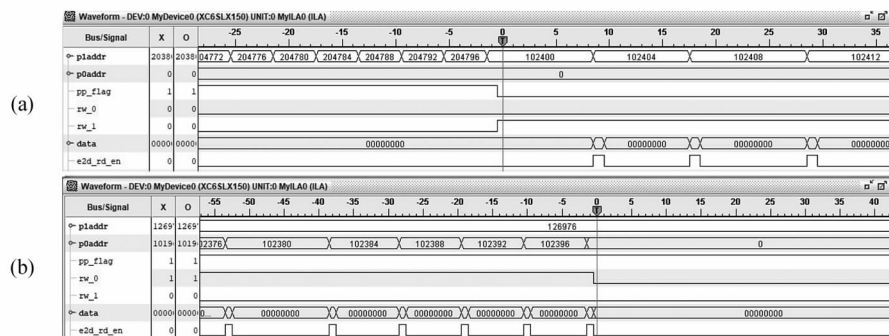


图 4 DDR3 数据控制模块时序图

Fig. 4 DDR3 data control module timing diagram

块可以正确工作。

3.3 像质评价函数模块

本模块包含像质评价函数计算模块和像质评价函数比较模块等 2 个模块,用于分块计算图像的像质评价函数的值并进行比较,生成对应的比较标志信号。由于系统采用了 Laplace 算子作为像质评价函数,像质评价函数计算模块需要精准高效地对图像进行卷积运算,本系统设计了一种 3×3 的卷积运算模块,使用了 3 个 FIFO 缓存图像的 3 行数据并对 FIFO 输出数据进行卷积运算,其结构图如图 5 所示。设输入图像宽度为 COL,高度为 ROW,实现卷积运算有以下 3 个关键设计技巧:

1) 当 FIFO1 缓存了 COL 个数据后开始读出数据,同时 FIFO2 写入 FIFO1 读出的数据,并当

FIFO2 缓存了 COL 个数据后 FIFO2 开始读出数据,同时 FIFO3 写入 FIFO2 读出的数据,最后当 FIFO3 缓存了 COL 个数据,FIFO3 开始读出数据。

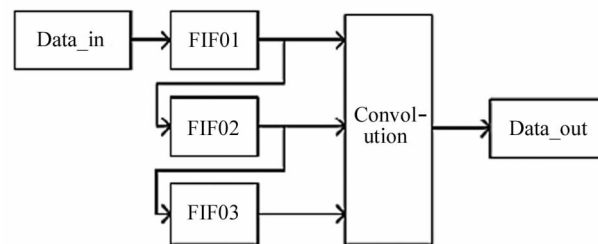


图 5 卷积运算模块结构图

Fig. 5 Convolution operation module structure diagram

2) 所有 FIFO 输出的存储在一个 3×3 的数据

矩阵中进行卷积运算,每次新数据到来时存储在矩阵的最右侧一列,之前的数据左移一列,类似于移位操作,最后数据矩阵与对应的卷积模板进行运算得到最后的卷积结果。

3) 为了保证卷积运算不会丢失任何一行的数据,FIFO1 在写入一帧的图像数据后,还需要补充 $2 \times COL$ 个‘0’确保最后 2 行的数据也能正确的进行卷积运算。

本模块实时性较好,在图像数据输入开始后只需等待 $2 \times COL + 4$ 个机器周期即可开始输出卷积结果,等待 $(2 + ROW) \times COL + 4$ 个机器周期即可完成卷积运算。除了图像的左右边缘 2 行数据的卷积结果会出现误差,其他部分都完全正确。

在得到卷积结果的同时系统设计了一个行计数器 c_cnt 与列计数器 r_cnt 来定位卷积结果对应的像素位置,同时生成一组有效信号 $cell_active$ 来控制对

卷积结果分块的求和。依照 $cell_active$ 的不同,将卷积的结果累加到对应分块的像质评价值 sum 中,得到各个分块的像质评价值函数值。

完成求得所有分块的像质评价值 sum 后像质评价值函数比较模块会将当前的像质评价值 sum 与最佳像质评价值 sum_best 进行比较,并生成比较标志信号 $sum_compare$,并将更好的 sum 替换至 sum_best 中,像质评价值函数模块仿真时序图如图 6 所示。

仿真模拟了 16×16 的图像以 2×2 的方式分成 4 个子图的像质评价模块的一帧图像的工作过程,其中 din 由随机函数生成,时钟频率为 50 MHz,第 1 个红色游标为数据开始输入的时刻,第 2 个红色游标为卷积结果开始输出的时刻,两者相差 720 ns,正好是 $2 \times COL + 4 = 36$ 个机器周期。在分块求和结束信号 sum_end 拉高后,将 sum 与 sum_best 进行比较和替换,并生成对应的 $sum_compare$ 信号。

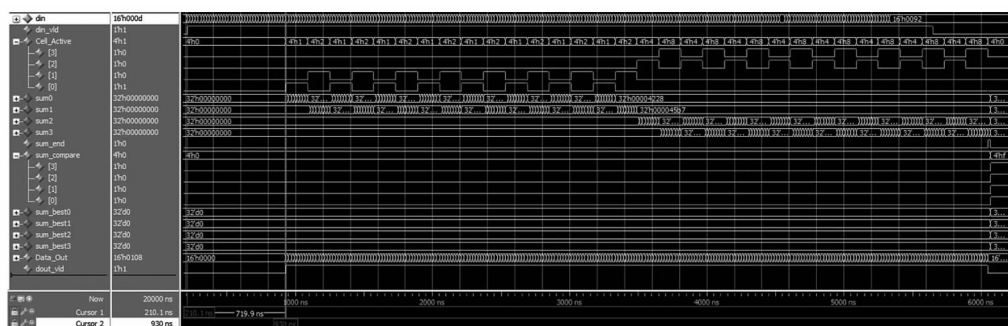


图 6 像质评价函数模块仿真时序图

Fig. 6 Image quality evaluation function module simulation timing diagram

3.4 图像替换模块

本模块的功能是根据像质评价值比较的结果将高质量的子图通过 DDR3 的 P2 端口替换写入至 DDR3 中存储结果图像的存储区域。但由于 DDR3 存储器的工作频率高,在频繁跳跃地址进行读写操作的情况下,存储器可能会出现数据丢失、数据错误等情况。为了避免这种情况的出现,DDR3 数据读写控制模块控制 DDR3 存储器顺序读出整帧图像,通过 FIFO 缓存进入图像替换模块,图像缓存模块控制 DDR3 顺序写入图像数据并且通过 DDR3 的存储地址来确定图像数据的坐标进而确定该图像数据位于第几块子图中。同时配合像质评价函数模块中的 $sum_compare$ 信号,当数据位于需要替换的子块时,控制 DDR3 写入 FIFO 中读出的数据,当数据位于不需要替换的子块时,则直接将 FIFO 中的数据读出并舍弃。确保 DDR3 的读和写同样都完整的经过了一帧图像的存储地址,既快速地完成了子图替换任务,

又就极大地减小了读写错误发生的机率。

3.5 HDMI 控制模块

本模块的功能是控制 DDR3 存储读取复原图像并在 HDMI 显示器上实时显示幸运区域融合算法的结果。系统依照 DDR3 存储器突发读写的特点,设计了 3 个计数器,第 1 个计数器 bit_cnt 在图像的有效区域内进行计数,由于本系统 DDR3 的 P3 端口位宽为 32 位,而一个像素的图像数据位宽为 8 位,1 次读数可以读取 4 个像素的图像数据,所以 bit_cnt 计数到 3 清零。第 2 个计数器 $burst_length_cnt$ 在读取完 1 次 DDR3-P3 端口的数据后计数,因为 DDR3 1 次读命令会读取突发长度个数的数据至 DDR3 读数据 FIFO 中,此 FIFO 的深度为 64,为了减少 DDR3 读命令次数的同时能在显示前准备好图像数据,本系统设置突发长度为 32,所以 $burst_length_cnt$ 计数到 31 清零。第 3 个计数器 $burst_cnt$ 在完成 1 次突发长度的 DDR3 的读取后计数,计数到

$(ROW \times COL) / (32 \times 4) - 1$ 清零。

为了减少 DDR3 读命令次数的同时能在显示前准备好图像数据,模块会在图像有效之前发出 1 次 DDR3 读命令将第 1 个突发长度的数据缓存入 FIFO,随后在图像有效信号拉高之后根据上述的 3 个计数器,在 $bit_cnt=0, burst_length_cnt=1$ 时,即读完 FIFO 中的 1 个数据后再次发出 DDR3 读命令,确保 64 深度的 FIFO 不会被写满没有数据丢失,并且由于在之前发出过 1 次 DDR3 读命令,所以在 $burst_cnt=(ROW \times COL) / (32 \times 4) - 1$ 时不再发出读命令,以确保在一帧图的显示周期内只读取一帧图像数据,不会因多读数据而导致显示时的图像错位等问题。

4 实验结果与分析

为了验证本文提出的基于 FPGA 的幸运区域融合算法的性能及算法实现的正确性,首先用同样的算法在基于个人计算机的 MATLAB 平台上对受大气湍流影响的序列短曝光图像进行处理,然后在

基于 FPGA 开发板的硬件平台上进行同样的处理,最后将相关结果做对比分析。

实验使用的受大气湍流影响的序列短曝光图像依照文献[7]中的方式拍摄得到,在低光照环境(68lux)下使用 Pentax K-5 相机连续拍摄,曝光时间设置为 $1/125\text{ s}$,光圈为 F5.6,连续拍摄帧数为 900 帧,相机分辨率为 1728×1152 。

4.1 幸运区域融合算法在 CPU+MATLAB 平台上的处理实验

实验的硬件平台是 Dell Precision T5500 图像工作站,其中内存 16 GB,中央处理器为 XeonE5620,显卡为 NVIDIAGTX1080,运行的软件环境是 Windows 7 操作系统、MATLABR2017a。

实验对 900 帧受大气湍流影响的序列短曝光图像进行幸运区域融合算法处理,根据文献[6]和大量实验的结果表明,只取最好的一帧图像叠加时复原图像的客观指标上能取得最佳的表现,主观感受也较好。图 7 展示了幸运区域融合算法 MATLAB 处理结果,图 7(a)为系列图像中 Laplace 值最大的一



图 7 幸运区域融合算法 MATLAB 处理结果:(a) 序列图像中最好的一帧;
(b) 序列图像中最差的一帧;(c) 序列图像中随机一帧;(d) 复原图像

Fig. 7 The result of the LRF algorithm MATLAB processing:(a) The best frame in the sequence of images;
(b) The worst frame in the sequence of images;(c) A random frame in the sequence of images;(d) Restored image

帧,图 7(b)为系列图像中 Laplace 值最小的一帧,图 7(c)为系列图像中随机的一帧。

从图 7 中可以直观的分析出即使是序列图像中最好的一帧,也有部分区域的文字相对要模糊一些,序列图像中最差的一帧,也存在部分清晰的文字,而复原图像整体文字都很清晰,没有模糊的区域,图像的分辨率得到了显著的提升,主观上可以清晰无障碍的阅读。对图 7 中的各图像进行客观指标进行计算,选取平均梯度、方差和 EME 等 3 种常用的像质评价函数对图像进行评价,计算结果如表 1 所示。

表 1 各图像的 3 种像质评价函数值
Tab. 1 Three image quality evaluation
function values for each image

Image	Average gradient	Variance	EME
Fig. 5(a)	4.719 1	19.429 4	10.505 1
Fig. 5(b)	2.535 2	14.741 7	9.841 5
Fig. 5(c)	3.962 8	17.686 8	10.057 1
Fig. 5(d)	5.439 7	20.874 9	11.253 8

通常情况下,平均梯度用来衡量图像的清晰度,

能够反映出图像的细节。一般来说,梯度值越大,图像的层次越多,图像就越清晰。方差是指图像像素灰度值相对于均值的离散程度,方差越大,表明图像中灰度级分布越分散,图像质量越好。图像细节增强 EME(enhancement measure evaluation)体现了图像局域灰度的变化程度,局域灰度变化越强,图像表现出的细节越强,EME 值也就越大。可以从表 1 得出,复原图像的各项指标均好于其他的图像,其结论与直观评价一致,也证明了幸运区域融合算法在算法上的可行性。

4.2 幸运区域融合算法在 FPGA 上的实验验证

本实验的硬件平台是 Xilinx 公司 Spartan-6 系列 XC6SLX150 芯片为核心的开发板。系统在 FPGA 上对幸运区域融合算法设计进行验证,实验分为 2 组,第 1 组实验采用计算机模拟绘制的图像,通过对不同的形状进行模糊处理如图 8(a)所示,再将这一组图像通过以太网发送给 FPGA 系统,图 8(b)为系统处理完图像后的复原图像通过以太网回传至 PC 端并通过 MATLAB 显示的结果,图 8(c)为系统 HDMI 显示的最终输出结果的照片(注:由于手机拍

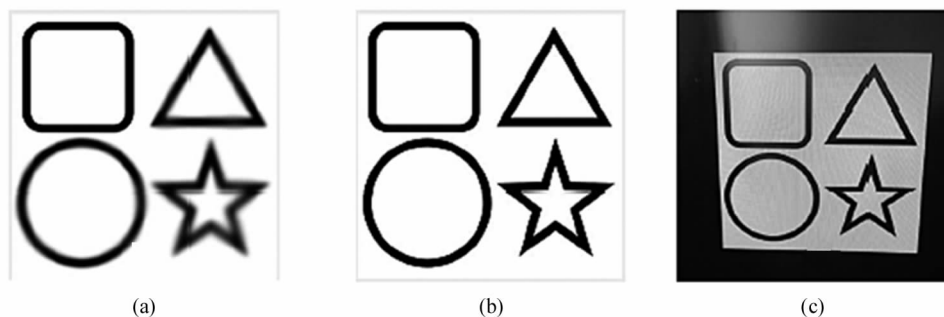


图 8 模拟图像幸运区域融合算法系统处理结果:

(a) 输入模拟图像示意; (b) 回传至 MATLAB 的复原图像; (c) HDMI 显示的复原图像

Fig. 8 The LRF algorithm system simulates the image processing results:

(a) Schematic of input simulation image;

(b) Restored image returned to MATLAB; (c) Restored image displayed by HDMI

照的角度不太好,图像上有一点变形)。

通过图 8 可以分析出系统成功的提取出输入图像中清晰的部分并将这些清晰的子块融合起来通过 HDMI 显示器输出最终的复原图像。本实验证明了幸运区域融合算法成功的在 FPGA 上实现。

第 2 组实验采用 900 帧受大气湍流影响的序列短曝光图像作为输入图像在系统上进行实时幸运区

域融合算法处理,图 9 为序列短曝光图像幸运区域融合算法系统处理结果的局部显示的照片。虽然由于手机拍照的角度不太好,图像上有一点变形,但从这几张图说明所实现的 LRF 系统确实是在连续动态地输出越来越清晰的融合图像。事实上,对于实验现场的观察者会有更好的视觉感受,即随着时间的推进,也就原始图像的逐帧传入,系统显示器上输出

图像在逐渐变得清晰。

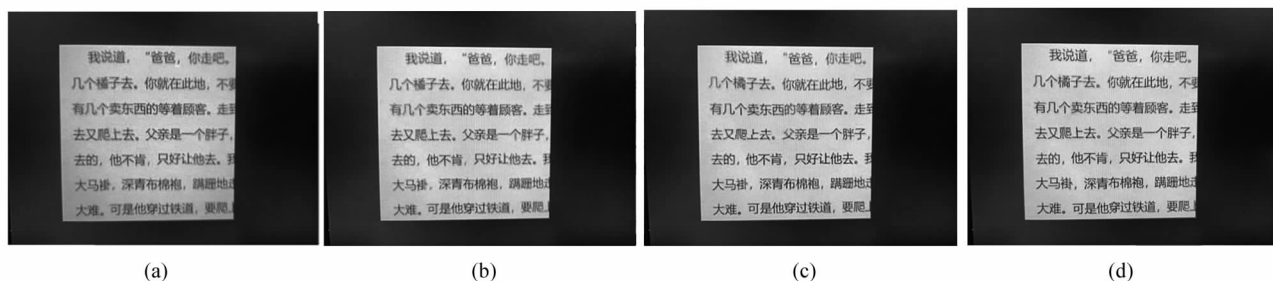


图9 序列短曝光图像幸运区域融合算法系统处理结果:(a) 10帧输出结果;(b) 100帧输出结果;
(c) 400帧输出结果;(d) 900帧输出结果

Fig. 9 LRF algorithm system sequence short exposure image processing results:(a) 10 frame output results;
(b) 100 frame output results;(c) 400 frame output results;(d) 900 frame output results

5 结 论

本文在分析已有的幸运区域融合算法优缺点的基础上,根据FPGA的特点对PC端的LRF算法进行修改,提出了一个适合于FPGA处理的实时算法,在MATLAB上进行了算法可行性认证。然后,用VerilogHDL对该算法进行了逻辑设计,将设计结果嵌入到一中小规模的FPGA中,构建了一个实时LRF处理系统,并在系统上对实际采集的大气湍流短曝光序列图像进行了复原处理实验。实验结果表明,本系统可以在受大气湍流影响的短曝光图像中选取其中的“幸运区域”并将这些“幸运区域”融合复原,能有效的去除由湍流影响造成的图像畸变和模糊,并实时动态地稳定输出复原的结果,最终的复原图像中细节有明显的增多,图像质量有明显的提升。相较于国内外大部分的研究,本文将LRF移植至FPGA平台,在实时性上具有优势,并且本文使用的是中小规模的FPGA芯片,具有体积小、功耗小、成本低等特点,对便携、低功耗、低成本的LRF系统或其他类似图像处理系统的研制都具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] MAO L H, LI B H, ZHANG X L, et al. Experimental investigation of lucky imaging algorithm based on 2 m astronomical telescope[J]. Optical Technique, 2018, 44(5): 542-548.
- 毛枕晔, 李彬华, 张西亮, 等. 基于2 m级大口径望远镜的幸运成像算法的实验研究[J]. 光学技术, 2018, 44(5): 542-548.
- [2] ZHANG Y X, CHI Z Y. Transmission and imaging of light through the atmosphere[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 5-6.
- 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 5-6.
- [3] ZHANG S J, FRANK F, SUESS, et al. Anisoplanatic lucky imaging for surveillance[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2006: 1-17.
- [4] VORONTSOV M A, CARHART G W, PRUIDZE D V, et al. Adaptive imaging system for phase-distorted extended-source and multiple-distance objects[J]. Applied Optics, 1997, 36(15): 3319-3328.
- [5] VORONTSOV M A. Parallel image processing based on an evolution equation with anisotropic gain: integrated optoelectronic architectures[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1999, 16(7): 1623-1637.
- [6] VORONTSOV M A, CARHART G W. Anisoplanatic imaging through turbulent media: image recovery by local information fusion from a set of short-exposure images[J]. Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science & Vision, 2001, 18(6): 1312-1324.
- [7] JACKSON C R. Real time mitigation of atmospheric turbulence in long distance imaging using the lucky region fusion algorithm with FPGA and GPU hardware acceleration[D]. Newark: University of Delaware, 2015.
- [8] YANG Z L, LIANG Y H, HU H J, et al. Theoretical and experimental research of lucky imaging technique about extended objects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(5): 51-56.

- 杨忠良,梁永辉,胡浩军,等.扩展目标幸运成像技术的理论和实验研究[J].激光与光电子学进展,2010,47(5):51-56.
- [9] YANG Z L. The experimental study on lucky imaging technology for extended objects [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2009:20-37.
- 杨忠良.扩展目标幸运成像技术的实验研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009:20-37.
- [10] YANG Z L, LI J X, YANG W J. High-resolution wide-area imaging of natural targets with lucky imaging technique [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1821-1825.
- 杨忠良,李均盛,杨卫军.应用幸运成像技术的宽视场自然目标高分辨率成像[J].红外与激光工程,2012,41(7):1821-1825.
- [11] LI S W, XU C, LIU G R, et al. High resolution restoration algorithm of atmospheric turbulence blurred image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3486-3490.
- 李思雯,徐超,刘广荣,等.大气湍流模糊图像的高分辨率复原算法[J].红外与激光工程,2013,42(12):3486-3490.
- [12] ZHANG R W, HE D H, LI Y P, et al. Synthetic imaging through wavy water surface with centroid evolution [J]. Optics Express, 2018, 26(20): 26009-26019.
- [13] GAO S H, LI B H, CHEN B Y, et al. A lucky-region fusion algorithm for color image [J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2020, 32(8): 874-883.
- 高诗竹,李彬华,陈柄宇,等.一种彩色图像幸运区域融合算法[J].光电子·激光,2020,32(8):874-883.
- [14] ZHANG H J, JING H R, CHEN T T, et al. Summary of edge detection methods [J]. World Scientific Research Journal, 2021, 7(8): 158-164.
- [15] YUAN C L, XIONG Z L, ZHOU X H, et al. Study of infrared image edge detection based on sobel operator [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(1): 85-87.
- 袁春兰,熊宗龙,周雪花,等.基于 Sobel 算子的图像边缘检测研究[J].激光与红外,2009,39(1):85-87.

作者简介:

李彬华 (1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事成像技术与图像处理、天文探测器技术方面的研究。