

文章编号:1007-2780(2014)02-0258-08

基于 FPGA 的彩色图像实时采集系统设计

李 华¹, 朱 波^{2,3*}

(1. 商洛学院, 陕西 商洛 726000; 2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
3. 西安交通大学-西安光学精密机械研究所 空间视觉联合实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了从单片 Bayer 格式图像探测器获取高质量实时彩色图像, 研究并设计了一套基于 FPGA 硬件的彩色图像实时采集系统。介绍了针对 MT9M011 图像探测器的寄存器配置时序的设计。重点研究了影响彩色图像质量的 Bayer 格式图像去马赛克算法, 该算法首先对 Bayer 格式原图进行二阶拉普拉斯修正, 利用色差和梯度关系确定丢失的绿色分量, 再结合给定像素周围的 4 个色差进行插值计算, 分别得到丢失的红色分量和蓝色分量, 从而完成彩色图像的恢复。设计了基于千兆以太网(GigE)的图像传输机制, 使系统数据吞吐率大大提高。实验数据表明, 系统插值算法在峰值信噪比(PSNR)方面相比双线性插值, R、G、B 三通道均提高约 15 dB 左右, 图像目视细节丰富, 伪彩色得到有效抑制; 在分辨率为 1280×1024 、帧频为 15 f/s 的情况下, 可以实时输出全彩色图像。目前, 系统已经工程应用, 其优异表现满足了项目实际需要。

关键词: Bayer 格式图像; 去马赛克; 千兆以太网; FPGA

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20142902.0258

Design of real-time color image acquisition system based on FPGA

LI Hua¹, ZHU Bo^{2,3*}

(1. Shangluo University, Shangluo 726000, China; 2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
3. The Joint Laboratory for Space Vision of XJTU-XIOPM, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to obtain high quality real-time full color image with a single image sensor coated with Bayer CFA, this paper researches and designs an improved real-time color image acquisition system based on FPGA. Firstly, design of MT9M011 sensor registers setting timing is introduced. And then, the paper pays key attention to demosaicking algorithm which is critical to the color image quality. The proposed demosaicking algorithm adopts the second-order Laplacian interpolation filter to the Bayer pattern image, and combines with chrominance and gradient for choosing the missing green samples. After the green channel has been reconstructed, we interpolate R and B as the average of the four nearest neighbors. By now, the full color image is reconstructed. Finally, GigE based image transmission is implemented to improve the image throughput. Experimental results proved that on average the improvement is 15 dB over the Bilinear Algorithm (BI) in PSNR and it produces visually

收稿日期: 2013-06-14; **修订日期:** 2013-07-22.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 90920301); 陕西省教育厅科研计划项目(No. 2013JK1057)

* 通信联系人, E-mail: zhubo@opt.ac.cn

more pleasant color images details with color artifacts greatly suppressed. Real-time $1\,280 \times 1\,024$ resolution color image read-out could be achieved at speed 15 f/s. Now, the design is successfully used in our camera system, the perfect restoration quality and effectiveness meets the requirement of system design.

Key words: bayer pattern image; demosaicking; GigE; FPGA

1 前言

为了让 CCD/CMOS 图像探测器采集到景物的全彩色图像,通常的方法是使用 3 片探测器结合分光棱镜的方法。但是,出于系统体积、重量和维护难易程度等因素的考虑,实际应用往往使用一片图像探测器,但是在探测器前覆一层膜(CFA),例如应用最为广泛的 Bayer 格式^[1]。再结合去马赛克算法就可以得到全彩色图像,显然,算法的优劣对彩色图像的质量将起到举足轻重的作用。目前去马赛克算法的研究现状可归纳为两点,易于 FPGA 等硬件实现的各种线性算法基本上插值效果都不能令人满意^[2-4];而插值性能优良的非线性算法,其实现难度却都比较复杂,大部分还停留在理论研究或计算机仿真的层面^[5-9],不能或不易 FPGA 硬件实现。而另一方面,随着探测器分辨率越来越高、帧频越来越快,图像的传输已

经成为了制约图像应用的瓶颈,特别是远程传输应用,因此,基于 GigE 的图像传输已经成为未来数字相机系统的趋势。好的算法与设计只有运行在合适的硬件平台才能发挥其长处,FPGA 凭借其并行运算优势,有较多高等级的产品(比如宇航级芯片)可供选择,使其在图像处理领域^[10-11],特别是空天应用的图像处理领域受到越来越多的重视。本文正是在这种大背景下,依托某预研课题研究并设计了一套基于 FPGA 的全彩色实时图像采集系统,取得了较好的效果。

2 系统设计原理及方法

本文彩色图像采集系统的原理框图如图 1 所示。采用的 CMOS 图像探测器是美光公司的 MT9M011,FPGA 使用的是 Xilinx 公司的 Virtex-4,型号为 XC4VSX55,PHY 芯片则是 MARVELL 公司的 MX88E1111。

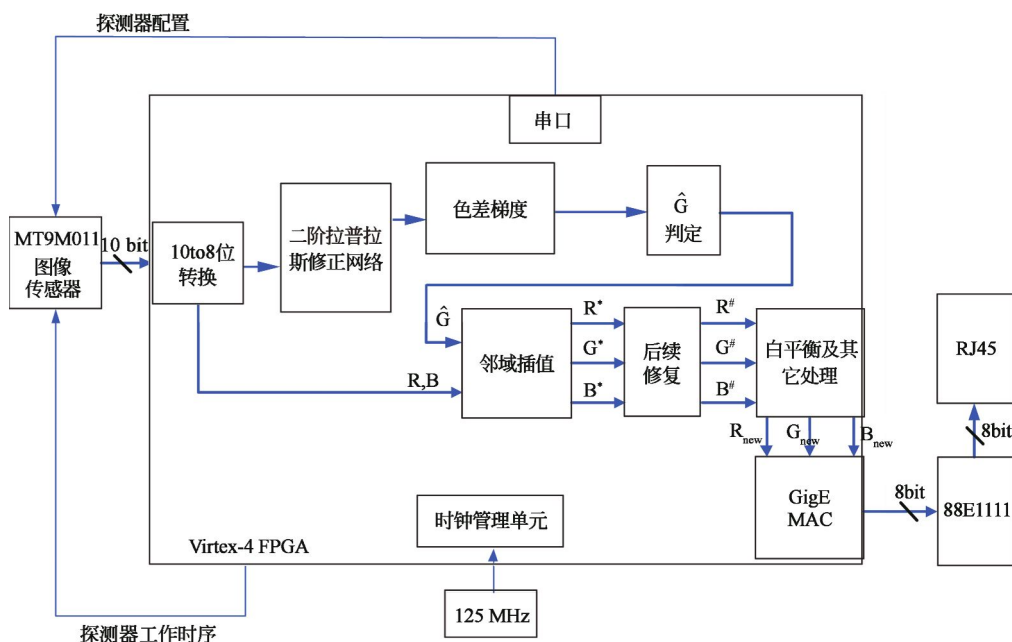


图1 基于FPGA的系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of FPGA-based system

系统的工作过程为:当系统上电稳定后,首先通过 FPGA 对 MT9M011 图像探测器的寄存器进行配置,使其正常工作并输出 Bayer 格式图像,然后将 Bayer 格式图像顺序送入 FPGA,先对其进行 8 bit 量化,然后进行去马赛克等彩色相关处理,最后经过 GigE 接口将彩色图像输出,整个处理过程以流水线的形式进行,做到了图像的实时处理与输出。下面将结合图 1 详细介绍各个功能模块的设计原理与硬件实现过程。

2.1 MT9M011 图像探测器时序设计

MT9M011 是美光公司的一款基于 Bayer 格式的彩色 CMOS 图像探测器,其设计简单、性能稳定,因此,被广泛用于需要彩色成像的系统。

与其他公司的 CMOS 探测器相比,该探测器

时序相对比较简单,仅仅通过类似于 I²C 传输协议的串行线完成对特定寄存器的配置,就可使其正常工作^[12],需要配置的主要寄存器包括:改变输出图像分辨率的 R03 与 R04,调节帧频的 R05 及改变曝光时间的 R09 等。本文根据实际应用需要,将探测器工作状态设置在分辨率为 1 280 × 1 024、帧频为 15 f/s 的模式下,其中,曝光时间通过 RS422 总线,根据外部成像条件实时进行修改。图 2 所示为写 05 号寄存器为 0x110,设置帧频为 15 f/s 的 Modelsim 仿真波形,其他寄存器设置与此类似。当设置完寄存器,探测器就开始输出图像了。需要指出的是,为了保证探测器的输出稳定性与可靠性,本设计还在每帧图像的帧逆程期间都对相应的寄存器进行一次配置。



图 2 写寄存器仿真波形

Fig. 2 Simulation of register writing timing

2.2 去马赛克过程设计

通常,自然界图像的能量谱主要集中在低频区域^[6],即沿着给定像素的水平和垂直轴线分布,因此,本文去马赛克算法的插值过程主要是基于水平和垂直方向进行。文献^[13]算法结合以上特点,取得了较好的彩色恢复效果。因此,本文在文献^[13]的基础上对算法进行了进一步的简化和改进,在基本不降低彩色恢复效果的前提下大大节约了硬件资源。下面将结合图 3 所示的 Bayer 格式图像对算法进行详细说明。

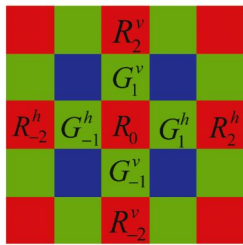


图 3 Bayer 格式图像

Fig. 3 Bayer image

2.2.1 绿色分量恢复过程

红色通道和蓝色通道均存在缺失绿色分量,考虑到 Bayer 格式的对称性,此处仅以计算红色通道缺失的绿色分量为例进行介绍。首先,应用

二阶拉普拉斯修正网络如图 3 所示。以 R_0 为中心的 5×5 Bayer 格式图像,插值得到 $\hat{G}_0^H$ 处水平方向绿色分量和垂直方向绿色分量 $\hat{G}_0^V$,如式(1)和式(2)所示:

$$\hat{G}_0^H = \frac{1}{2}(G_{-1}^h + G_1^h) + \frac{1}{4}(2R_0 - R_{-2}^h - R_2^h). \quad (1)$$

$$\hat{G}_0^V = \frac{1}{2}(G_{-1}^v + G_1^v) + \frac{1}{4}(2R_0 - R_{-2}^v - R_2^v). \quad (2)$$

将整幅 Bayer 图像的红色通道应用式(1)和式(2),得到图像中所有红色通道缺失的水平和垂直绿色分量。

这时,我们依据色差梯度来选择绿色分量,因为梯度大的方向色差值变化剧烈,不易估计,因此,我们取梯度值小的作为插值结果。首先构造式(3)和式(4)所示的色差表达式:

$$C_H(i, j) = \begin{cases} R_{i,j} - \hat{G}_{i,j}^H, & (i, j) \text{ is red channel} \\ B_{i,j} - \hat{G}_{i,j}^H, & (i, j) \text{ is blue channel} \end{cases}, \quad (3)$$

$$C_V(i, j) = \begin{cases} R_{i,j} - \hat{G}_{i,j}^V, & (i, j) \text{ is red channel} \\ B_{i,j} - \hat{G}_{i,j}^V, & (i, j) \text{ is blue channel} \end{cases}. \quad (4)$$

其中: i, j 表示每个像素的行列号,假设图像的分辨率为 $M \times N$,则 $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 。再构造色差的梯度表达式如式(5)所示:

$$D_H(i, j) = |C_H(i, j) - C_H(i, j+2)|$$

$$D_V(i, j) = |C_V(i, j) - C_V(i+2, j)|. \quad (5)$$

得到色差梯度以后,我们构造一个 5×5 的窗口来统计窗口内的梯度值,取 $S_H(i, j)$ 和 $S_V(i, j)$ 为窗口内水平和垂直方向梯度值之和。通过比较计算,当 $S_V(i, j) < S_H(i, j)$ 时, $\hat{G}_{i,j} = \hat{G}_{i,j}^V$, 反之, $\hat{G}_{i,j} = \hat{G}_{i,j}^H$, 完成整幅图像中绿色分量的估计。

2.2.2 红色(蓝色)通道的蓝色(红色)恢复

当整幅图像的绿色分量得到后,我们仍然用色差梯度法来估计缺失的红、蓝分量。对红色通道处缺失蓝色分量的估计,以图3中的 R_0 为例,其四周的蓝绿色差共有4个,分别为:

$$\begin{cases} C^{\text{left-up}} = B^{\text{left-up}} - \hat{G}^{\text{left-up}} \\ C^{\text{right-up}} = B^{\text{right-up}} - \hat{G}^{\text{right-up}} \\ C^{\text{left-down}} = B^{\text{left-down}} - \hat{G}^{\text{left-down}} \\ C^{\text{right-down}} = B^{\text{right-down}} - \hat{G}^{\text{right-down}} \end{cases}, \quad (6)$$

其中: $\hat{G}^{\text{cr}}$ 表示恢复得到的绿色分量。结合 R_0 处的色差 $C^{R_0} = B^{R_0} - \hat{G}^{R_0}$, 有:

$$B^{R_0} = C^{R_0} + \hat{G}^{R_0}. \quad (7)$$

式(7)即红色通道处缺失的蓝色分量。根据 Bayer 格式图像对称的特点,同样的方法可求得蓝色通道处丢失的红色分量。

2.2.3 绿色通道蓝色(红色)恢复

绿色通道缺失的蓝色分量和红色分量的计算方法和 2.2.2 节的计算类似,只是 Bayer 格式图

像中绿色分量是红、蓝分量的两倍,因此要进行两次计算。

2.2.4 后续处理

经过 2.2.1~2.2.3 节的计算,得到了整幅图像中每个像素处的 R, G, B 分量。但是,为了进一步降低伪彩色,我们构造了低通滤波器来保留低频成份。本文从恢复效果和硬件资源占用角度出发,构造了 3×3 的二维低通滤波器用于后续改善处理^[13-14],如式(8)所示:

$$W = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

分别应用式(8)对每个通道缺失的另外两种分量进行改善^[13],从而完成整幅图像最终的彩色恢复。

2.2.5 算法效果评价

选取了比较典型的3种彩色恢复算法和本文算法进行去马赛克效果的比较,样本选择 Kodak 标准图像库里的8幅经典图像,如图4所示。首先对图4的8幅图像进行 Bayer 格式退化,然后应用算法进行彩色恢复。为了便于对算法的效果进行说明,采用了 PSNR 和目视两个指标对彩色恢复效果进行评价。

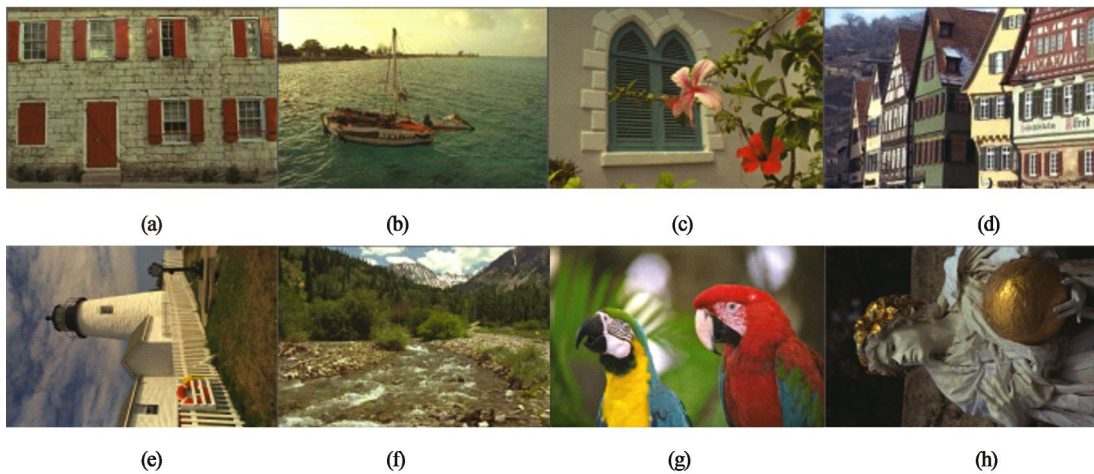


图4 从Kodak图库中提取的试验图像

Fig. 4 Test images from Kodak

图5所示为本文算法和其他几种算法恢复结果的目视效果,表1所示为几种算法恢复结果的PSNR统计。很显然,本文算法的整体性能大大优于其他几种算法。但是,因为本文算法是对文

献[13]算法简化改进得到的,所以彩色恢复效果稍差于文献[13],以图4(e)为例,PSNR仅相差0.1 dB,基本上性能一致,但是,硬件资源却比文献[13]算法节约了20%。

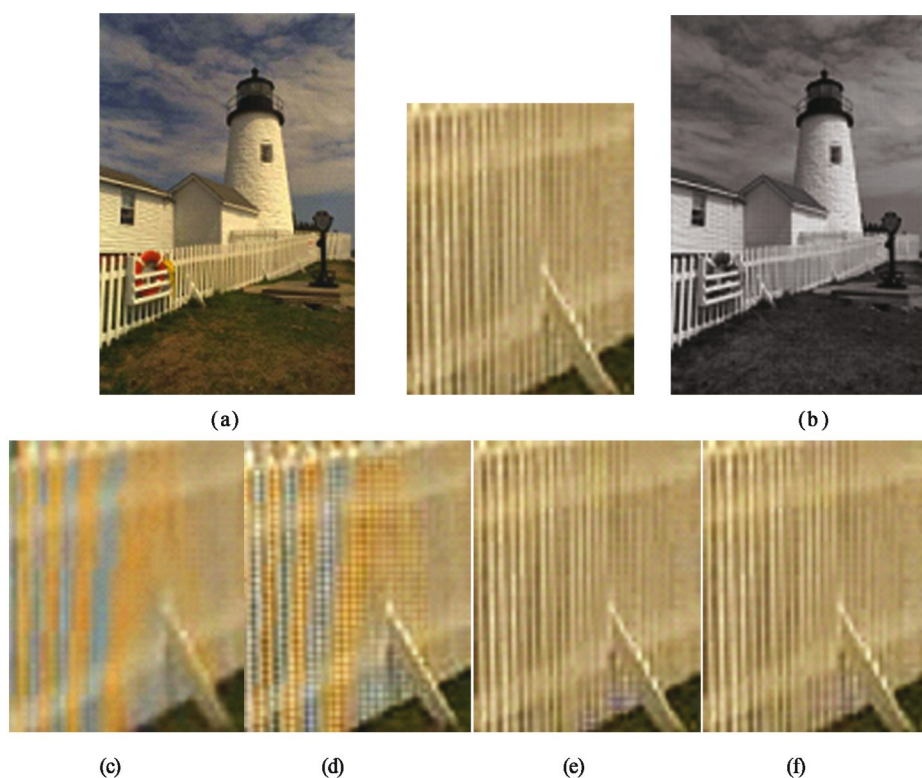


图 5 几种算法对图 5(b)的恢复效果比较。(a)原图;(b) Bayer 格式图像;(c)双线性插值结果;(d)文献[3]恢复结果;(e)文献[7]恢复结果;(f)本文算法恢复结果

Fig. 5 Interpolation results of different demosaicking methods. (a) Origin image; (b) Bayer image; (c) BI; (d) Reference [3]; (e) Reference [7]; (f) Proposed

表 1 几种算法恢复结果的 PSNR 数值统计

Tab. 1 PSNR performance comparison of different demosaicking methods (dB)

	双线性插值			文献[3]			文献[7]			本文算法		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
图 4(a)	25.166	26.230	25.206	30.775	35.520	30.883	36.112	38.096	36.407	37.167	40.764	37.842
图 4(b)	26.512	27.680	26.782	32.368	36.788	31.879	38.962	40.725	37.935	39.836	42.846	38.561
图 4(c)	32.404	32.427	32.441	38.666	42.053	38.430	41.213	43.956	40.550	40.590	43.718	39.962
图 4(d)	22.304	24.077	22.243	27.972	32.898	27.769	34.466	37.139	34.594	34.995	39.099	35.332
图 4(e)	26.626	28.437	26.784	32.529	37.173	32.587	38.759	41.267	40.008	38.889	42.727	40.626
图 4(f)	22.956	23.780	22.876	28.818	32.488	28.330	33.109	34.213	32.157	34.947	37.270	33.504
图 4(g)	34.060	34.294	33.742	39.705	43.513	40.101	41.198	44.818	41.909	40.049	44.087	41.052
图 4(h)	35.163	33.579	29.046	38.143	40.013	37.645	40.076	41.921	39.928	40.560	43.331	40.435

2.2.6 算法FPGA硬件实现

分析本文算法可知,计算方面仅由加法、移位和比较等操作构成,和线性图像处理方法在硬件实现,特别是FPGA实现上难度相当,能够做到硬件实时处理。

由于算法各主要步骤都是在数据窗口进行,所以,本文在FPGA内部通过BlockRAM构造了图6形式的图像行缓存,每个行缓存的深度为图像的一行, R^{xx} 为D触发器,构成像素缓存。这样,就构成图像流水线窗口,同时对5行图像数据进行各种计算与处理。

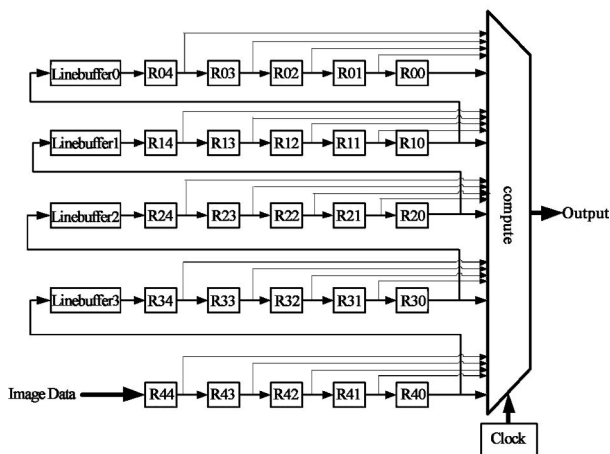


图6 彩色插值算法硬件实现过程

Fig.6 Process of FPGA implemented demosaicking method

从Bayer格式图像进入FPGA到彩色图像输出,本文算法共需要缓存约12行图像,因为像素时钟是25 MHz,所以,延时仅有 $(1\ 280+396) \times 12 \times 40\text{ ns} \approx 0.8\text{ ms}$ (其中,396是图像行逆程占用的像元数),基本满足实时处理的需要。

2.3 基于GigE的数据传输设计

GigE因其传输速率快、误码率小且成本低廉,已经广泛应用于各大公司数字相机的数据传输,因此,本系统设计了基于FPGA的GigE数据传输机制。

2.3.1 GigE传输方案的可行性分析

由于本文系统采集的是全彩色图像,即每一像素的色深是24 bits,而探测器输出图像的分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$,帧频为15 f/s,这样,1 s内传输的图像数据为:

$$\begin{aligned} & 1\ 280 \times 1\ 024 \times 15 \times 24\text{ bit} \approx \\ & 471\ 859\ 200\text{ bit} \approx 0.472\text{ Gbit}. \end{aligned} \quad (9)$$

相应的图像传输带宽就是0.472 Gbit/s,由于本课题对图像质量的苛刻要求,所以,不能对图像进行压缩,这就给传输带来了较大的挑战。

根据应用需要,本系统GigE要同时给数个子系统输出彩色图像,即一对多的广播方式,因此只能采用UDP协议,这也是目前大部分GigE相机使用的协议,传输机制则使用单工通讯。按照UDP协议规定,一包数据的结构分为包头+数据+帧间隙,其中,包头由源MAC、目标MAC、源IP、目标IP等42 Bytes固定数据组成。有效数据的长度为46 Bytes~1 500 Bytes,由于系统传输的是全彩色图像,每个像素由3 Bytes组成,因此,本文将一包数据的长度设定为320个像元,刚好是一行图像长度的1/4,转化到UDP包格式数据的长度即 $320 \times 3 = 960\text{ Bytes}$,满足UDP数据格式要求。除了包头和数据,数据帧之间的间隙也是有严格要求的,IEEE802.3标准规定最少要保证12 Bytes,这样,本文千兆以太网的理想传输效率为:

$$960 / (42 + 960 + 12) \approx 94.7\%. \quad (10)$$

相应的理想带宽为0.947 Gbit/s,对比式(9)可知完全满足本文全彩色图像传输的需要,不会造成数据的丢失。

2.3.2 GigE传输方案的具体设计

我们知道,为了方便采集,图像探测器是以固定格式输出的,帧有效结合行有效作为图像有效的标志,图像数据以行为单位,连续输出。而基于千兆以太网的数据传输则仅以数据包为单位进行传输,每包的有效数据长度为320个彩色像元,这样,图像的接收者就无法辨识图像的开始与结束,这给实际应用将带来很大麻烦,为了解决这个问题,本文在设计上采取了添加帧头的方式,具体做法是,当图像的帧有效来临时,首先将图像在FPGA内部进行缓存,同时FPGA内部生成一个数据长度为100 Bytes的帧头包,用于存储拍摄时间、曝光时间等图像信息,同时,也起到了区别两帧图像的目的。

由于图像的像元时钟为25 MHz,而GigE使用的是125 MHz的时钟,所以,怎么安排图像组包也是基于GigE传输要重点考虑的问题,本文设计采用了如下策略:系统首先发送100 Bytes的帧头包,当发现图像行有效的下降沿时开始从缓存FIFO中读取数据组成GigE数据包,而且连

续发送 4 包,刚好完成一行图像的发送,然后再等待下一个行有效的下降沿,如此反复就完成了图像连续、无误的传输,传输一行图像 GigE 消耗的时间为:

$$(42 + 960 + 12) \times 4 / 125 = 32.448 \mu s. \quad (11)$$

而图像探测器输出一行图像的总时间为:

$$(1\ 280 + 396) / 25 = 67.04 \mu s. \quad (12)$$

所以,一行图像时间内可以完成 4 包数据的发送。值得一提的是,42 Bytes 包头数据里面第 19 和 20 两 Bytes 用于设置包标识,本设计通过 FPGA 发送连续的计数达到统计丢包数的目的,防止误码的发生。

由于以太网只对应网络体系的数据链路层和物理层,所以本文 FPGA 完成的是 MAC 层开发,控制帧的生成,数据在 FPGA 内按照 GigE 格式输出给 PHY 芯片 MX88E1111,将 MAC 层数据转换为可以在物理链路上传播的格式连接到 RJ-45 接口,输出给远端存储与显示单元,用于后端应用。

3 试验与结果分析

按照第 2 节的设计思路,对相机系统进行了详细设计,并结合光机系统进行了实际成像试验。在分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$,帧频为 15 f/s,20 ms 曝光时的成像效果如图 7 所示,其中,图 7(a)为 Sniffer 软件捕获的 100 Bytes 长度图像帧头包信息,图 7(b)为实际得到的全彩色图像,可以看出,图像色彩逼真、细节丰富,伪彩色得到了有效抑制,和理论成像结论一致,充分证明了设计的可行性。

由于 UDP 只是一个简单的面向数据色的运输层协议,和所有使用 UDP 协议作为传输机制的系统一样,本文系统也存在丢包与误码的问题,经过详细试验测试,丢包率在 1%以内,可以满足用户的实际要求,下一步,将尝试点对点的 TCP/IP 协议,以尽量杜绝丢包现象。

参 考 文 献:

[1] Bayer B E. *Color imaging array*:US Patent,3 971 065 [P]. 1975-03-05.
[2] 王喆来,杨春玲. 基于最大类间方差法的图像分割系统的设计与实现[EB/OL]. <http://www.altera.com.cn/education/univ/local/events/articles/july08-3.pdf>.
Wang J L, Yang C L. Implementation of image segmentation system based on Otsu method [EB/OL]. <http://www.>

00000000:	00	26	b9	7c	58	e6	ff	ff	ff	ff	ff	ff	08	00	45	00
00000000:	00	80	e3	48	00	00	80	11	a6	cf	c0	a8	17	05	c0	a8
00000000:	17	ff	22	b8	0f	a0	00	6c	00	00	01	f5	16	00	00	00
00000000:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00000000:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00000000:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00000000:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00000000:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00000000:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00000000:	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

(a)100 Bytes帧头数据

(a) 100 Bytes frame head



(b)实际拍摄的彩色图像

(b) Real color imaging

图 7 实际成像效果

Fig. 7 Real imaging

4 结 论

根据彩色图像采集系统的发展趋势,结合实际预研课题,研究并设计了一套基于 FPGA 硬件实现的彩色图像实时采集系统。巧妙地运用梯度和色差关系改进了 Bayer 格式图像的插值效果,降低了插值算法硬件实现的难度,并结合 GigE 数据传输接口,大大提高了数据传输能力。实验结果表明,相比其他彩色图像采集系统,本系统获取的彩色图像在 PSNR 和目视方面,性能均有大幅度的提升,而整个系统的开发难度却仅和线性算法相当。目前,该系统工作正常,其优良的性能得到了用户的好评。值得一提的是,该系统可扩展性强,只要根据需要更换不同型号的彩色图像探测器,稍微修改一下 FPGA 管脚分配等参数就可以用于其他成像系统,因此,具有广阔的应用空间。

- altera.com.cn/education/univ/local/events/articles/july08-3.pdf.
- [3] Henrique S M, He L W, Ross C. High-quality linear interpolation for demosaicing of bayer-patterned color images [C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Quebec, Canada; Speech and Signal Processing*; 2004; 485-488.
- [4] Adams J E, Hamilton J F. *Adaptive color plane interpolation in single color electronic camera*; US Patent, 5 506 619 [P]. 1996-04-14.
- [5] Zhang L, Wu X L. Color demosaicking via directional linear minimum mean square-error estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2167-2178.
- [6] Zhang L, Wu X L, Antoni B, et al. Color demosaicking by local directional interpolation and nonlocal adaptive thresholding [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2011, 20(2): 203016(1-16).
- [7] Daniele M, Stefano A, Giancarlo C. Demosaicing with directional filtering and a posteriori decision [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 132-141.
- [8] Zhang L, Dong W S, Wu X L, et al. Spatial-temporal color video reconstruction from noisy CFA sequence [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(6): 838-847.
- [9] 朱波, 汶德胜, 王飞, 等. 应用字典学习算法改善 Bayer 格式图像彩色恢复效果[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(4): 8-16.
- Zhu B, Wen D S, Wang F, et al. Improvement of Bayer-pattern demosaicking with dictionary learning algorithm [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 8-16. (in Chinese)
- [10] 张传胜. 基于 SOPC 的通用液晶屏人机交互系统 GUI 的设计[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(2): 250-254.
- Zhang C S. Design of man-machine interaction systems based on LCD screen of SOPC [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 250-254. (in Chinese)
- [11] 王静轩, 尹传历. 基于 DSP 和 FPGA 的嵌入式实时图像增强系统[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(3): 459-463.
- Wang J X, Yin C L. Embedded color image enhancement system based on DSP and FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 459-463. (in Chinese)
- [12] Micron Inc. MT9M011 datasheet [OL]. [2004-01-05]. http://www.ic5.cn/p_MT9M011_nzw.html.
- [13] 朱波, 汶德胜, 王飞. 改进的 Bayer 插值算法及其硬件实现[J]. *光电子激光*, 2013, 24(6): 1211-1218.
- Zhu B, Wen D S, Wang F. Improved bayer-pattern demosaicking and its hardware design [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 24(6): 1211-1218. (in Chinese)
- [14] Kolta R W B, Aly H A, Fakhr W. A hybrid demosaicking algorithm using frequency domain and wavelet methods [C]// *International Conference on Image Information Processing*, 2011: 1-6.

作者简介: 李华(1980—), 女, 陕西西安人, 硕士, 讲师, 从事基于可编程逻辑器件的图像处理相关的研究与教学工作, 主要研究方向为数字图像处理。E-mail: irico_zb@qq.com