

文章编号:1007-2780(2019)09-0862-09

4K 裸眼立体显示系统设计

严飞^{1,2*}, 宋振声¹, 刘银萍³, 刘卿卿^{1,2}, 蔡静怡¹

(1. 南京信息工程大学 自动化学院, 江苏 南京 210044;

2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;

3. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要:随着医疗显示技术的进步, 医疗内窥镜摄像系统已经由主流的 2D (Two Dimensions) 显示向 3D (Three Dimensions) 显示发展, 图像清晰度也从高清 (High Definition, HD) 向超高清 (Ultra High Definition, UHD) 转变。因此, 本文设计开发了一种基于 FPGA 的 4K (3 840 × 2 160) 裸眼立体显示系统。首先, 系统对双路 3G-SDI 图像采集并进行 YUV 到 RGB 的格式转换。其次, 使用 Xilinx 提供的 VPSS 核实现图像的缩放, 同时解决高速图像数据带宽与 DDR3 存储器带宽间的匹配问题。最后, 通过 SBS (Side by Side) 的拼接方式, 将满足立体图像输出格式的视频源通过立体显示器输出。该系统从前端立体图像的采集到后端立体图像的输出, 需要经过格式变换、缩放、缓存、同步以及拼接等多个处理过程。实验结果表明, 采用参考时钟为 148.5 MHz 的双路 SDI 输入, 经 FPGA 的实时处理后可实现分辨率为 3 840 × 2 160、刷新率为 60 Hz 的 SBS 拼接格式图像, 该图像可直接驱动裸眼立体显示器。

关键词: 医疗成像; 立体显示; FPGA; 4K

中图分类号: TN391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193409.0862

Design of 4K bare-eye stereoscopic display system

YAN Fei^{1*}, SONG Zhen-sheng¹, LIU Yin-ping², LIU Qing-qing¹, CAI Jing-yi¹

(1. Automation College, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Cooperative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China;

3. College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: With the development of medical display technology, medical endoscope camera system has developed from the mainstream 2D (Two Dimensions) display to 3D (Three Dimensions) display, and image definition has also changed from high definition (HD) to ultra high definition (UHD). There-

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61605083, No.61701244); 江苏省自然科学基金 (No.BK20150903); 江苏省高校自然科学基金 (No.16KJB510023)

Supported by Natural Science Foundation of China (No.61605083, No.61701244); Natural Science Foundation of Jiangsu Province of (No.BK20150903); Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions (No.16KJB510023)

* 通信联系人, E-mail: fyan@nuist.edu.cn

fore, this paper designed and developed a 4K medical stereo display system based on FPGA. Firstly, the system carried on dual 3G-SDI image acquisition and YUV to RGB format conversion. Secondly, the VPSS core provided by Xilinx was used to realize image scaling, and the matching problem between high-speed image data bandwidth and DDR3 memory bandwidth was solved. Finally, the video source satisfying the stereo image output format was output by the stereo display through the splicing mode of SBS (Side by Side). The system from the front end stereo image acquisition to the back end stereo image output, needed to go through format transformation, scaling, caching, synchronization and Mosaic and other processes. Experimental results show that the dual-channel SDI input with a reference clock of 148.5 MHz and real-time processing by FPGA can achieve a SBS Mosaic image with a resolution of $3\ 840 \times 2\ 160$ and a refresh rate of 60 Hz, which can directly drive the naked eye stereo display.

Key words: medical imaging; stereoscopic display; FPGA; 4K

1 引言

视觉在人们日常生活中扮演着重要的角色,研究表明人类 80% 的环境信息是通过视觉获取的^[1],这说明视觉是人们获取外界信息最主要的方式。近年来,随着 3D 电影行业的火热,立体显示技术被推向一个新的发展热潮。立体显示具有很好的立体感和纵深感,被广泛应用于医疗等领域^[2]。

在国外,2010 年世界上首例 3D 内窥镜微创手术在英国吉尔福德顺利实施^[3]。BAIaraimi 等人于 2014 年针对 3D 内窥镜摄像系统与传统 2D 内窥镜系统的优劣做了相关研究。研究发现,对于未经过视觉问题矫正的新手来说,他们操作 3D 内窥镜系统时可以更快地上手,并且重复操作和操作错误次数均比他们操作传统 2D 内窥镜要少^[4]。Storz 等人在比较传统的 2D 内窥镜系统和 3D 内窥镜系统时,针对操作精度和工作速度方面进行了测试研究。在其中的 4 项任务中,参与者在 3D 系统中操作的错误和操作的时间比 2D 系统下少。有经验的外科医生在 3D 系统下操作困难的任务时则节省了更多的时间^[5]。Sinha 等人对 200 例 3D 腹腔镜手术和 200 例 2D 腹腔镜手术进行了分析,统计结果直接体现了 3D 内窥镜较传统 2D 系统在手术时的优势^[6]。另外,一些研究表明,3D 内窥镜摄像系统在微创手术中的表现都要优于传统的 2D 内窥镜系统^[7~9]。Kong 等人对 3D 内窥镜系统与传统 2D 系统的性能进行了比较。在这项研究中,新手在使用 2D

和 3D 操作时间上没有太大的差异,但是 3D 系统上的操作误差明显比 2D 要少^[10]。

在国内,2012 年首例 3D 内窥镜下肾盂旁囊肿切除术在于北京协和医院顺利进行^[11]。蒋堃等人针对传统内窥镜和 3D 内窥镜技术治疗效果进行了对比研究^[12]。就肾上腺肿瘤切除术的案例对比发现,使用 3D 内窥镜系统进行手术的时间比传统内窥镜手术时间缩短很多,并且手术中出血量也少。李汉忠和刘皓等分别就 3D 内窥镜系统在泌尿外科手术和膀胱前列腺切除手术中的成功应用^[13-14],国内首例 3D 内窥镜在神经外科手术中成功实施,见证了 3D 内窥镜在高难度手术中的成功应用^[15]。由此可见,3D 内窥镜提供的 3D 医疗影像给医生带来很好的立体视野的优势,并且手术操作准确性大大提高。

针对 3D 内窥镜摄像系统的研究,Liu 等人提出以 FPGA 为核心的小体积、低成本、高性能的辅助式 3D 内窥镜系统,能显著降低手术体腔损伤的风险^[16]。也有部分学者利用其他技术手段对传统 2D 内窥镜进行立体化处理,例如 Oh 等人提出的对 2D 腹腔镜成像系统进行三维重建的研究^[17]。另外,Lee 等人提出的利用特征追踪技术对内窥镜系统进行深度采样进而生成深度图,可以将传统的 2D 内窥镜视频进行 3D 可视化转换^[18]。Zhao 等人提出了一种基于交互式三维导航系统的图像导航手术,可以提高医学成像效果和诊断准确性,为图像引导手术相关方向提供了参考价值^[19]。

综上所述,立体显示已经被证实能够为医生诊断病人提供非常好的帮助。本文拟开发一种基于 FPGA 的 4K 裸眼立体显示系统,旨在为医用高清

晰 3D 显示领域提供一种切实可行的设计方案。

2 系统组成

立体显示系统控制卡如图 1 所示,包括 4 路 SDI 输入接口、4 路 SDI 环路输出接口、DP 输出接口、DDR3 存储模块以及外围电路(电源电路、配置电路和时钟电路)模块,硬件组成部分如图 2 所示。其中,4 路 SDI 输入接口在 FPGA 逻辑设计时仅用了 2 路,其余两路输入为冗余设计。

系统支持 3G-SDI 视频输入和 DP 1.2 视频输出。系统主控芯片使用的是型号为 XC7K325TFFG900-2 的一款 FPGA,属于 Xilinx 公司 Kintex 7 系列。



图 1 立体显示系统控制卡

Fig.1 Control card of stereo display system

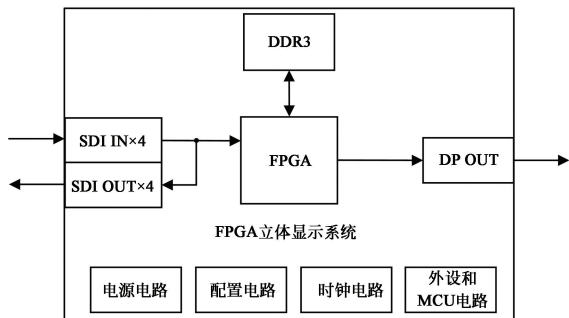


图 2 立体显示系统硬件组成

Fig.2 Hardware components of three-dimensional display system

据 FPGA 特性如下:

(1)采用 FFG900 封装,速度等级为-2;

(2)拥有 16 个 GTX(GTX Transceivers,7 系列 FPGA 高速吉比特收发器)收发器,传输速率高达 6.6 Gbit/s;

(3)拥有 500 个 I/O,分别有 350 个支持 1.2 V 至 3.3 V I/O 电压的 HR(High-range,高范围)I/O 和 150 个支持 1.2~1.8 V I/O 电压的 HP(High-performance,高性能)I/O。其中高性能 I/O 口为 FPGA 与外部高速器件之间数据交互提供保障。

该系统采用模块化的设计思路,对系统图像采集模块、图像格式解析模块、图像处理模块以及图像输出模块进行详细设计。其中图像处理模块包括图像缩放、图像缓存以及图像拼接。

前端采集到的图像经过缩放处理、同步缓存后再拼接输出。图像输入为 1920×1080 ,经过缩放模块后放大至 1920×2160 ,最后两路视频拼接为 4K(3840×2160)输出,输出的图像采用 SBS 拼接方式。图像处理过程如图 3 所示,在设计各个模块时,以单路图像处理的方式进行设计,当两路图像同时处理时,能够直接复用部分功能模块,以达到节约资源的目的。

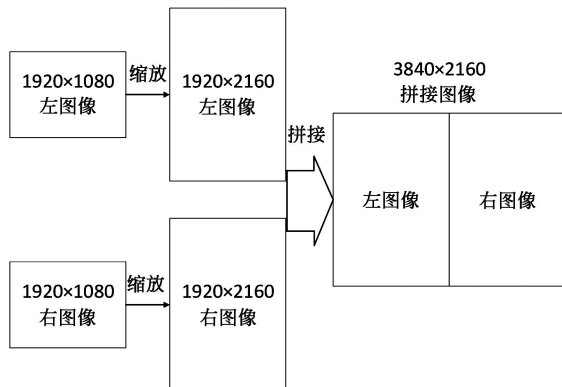


图 3 本文图像处理流程

Fig.3 Image processing process in this paper

3 3G-SDI 图像输入解析

SDI 输入参考时钟为 148.5 MHz 和 148.5/1.001 MHz,硬件上由时钟管理芯片 SI5338 提供。另外,该参考时钟频率也兼容 HD-SDI 模式。SDI 输入逻辑设计框图如图 4 所示。

SDI 输入逻辑设计模块中,主要包括 GTX 模块以及 SDI 模块。GTX 模块包含 GTX 收发器(7 Series FPGAs Transceivers),根据 GTX 收发器的结构特性,其参考时钟可以直接接入 CPLL 或者通过 GTX Common 模块接入 QPLL。

SDI 模块包含 SMPTE Core 和 Control 模

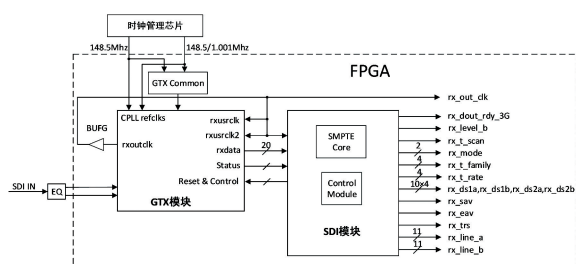


图4 SDI输入逻辑设计框图

Fig.4 Block diagram of SDI input logic design

块。SMPTE Core 支持 SD-SDI、HD-SDI、3G-SDI Level A、3G-SDI Level B-DL 和 LeveB-DS 传输模式,在本文中仅讨论 3G-SDI 传输模式。Control 模块用于当 SDI 输入模式改变时重配置 GTX 核以及实时检测 SDI 输入比特率。SDI 模块输出的 rx_ds1a 、 rx_ds1b 、 rx_ds2a 和 rx_ds2b 为视频数据,其中 rx_ds1a 和 rx_ds2a 用于输出视频信号的亮度分量, rx_ds1b 和 rx_ds2b 用于输出视频信号的色彩分量。仅当传输 3G-SDI level B 信号时, rx_ds2a 和 rx_ds2b 才有有效值输出。

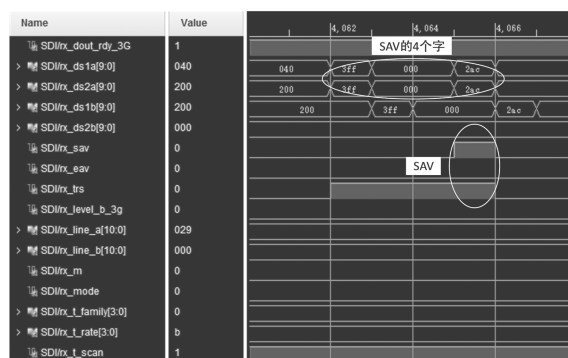


图5 3G-SDI Level A 解析

Fig.5 Analysis of 3G-SDI Level A

在 3G-SDI Level B 模式下,数据流双链路传输,在链路上存在 EAV 的 4 个字时, rx_trs 信号被置高。采集到的数据如图 5 所示, $rx_level_b_3g$ 为高电平,表示当前传输的是 3G-SDI Level B 视频流。

解析后的图像需要进行 YUV 到 RGB 的格式转换,然后使用 Xilinx 提供的 VPSS 核实现图像缩放,每路视频放大至 $1\,920 \times 2\,160$ 再拼接输出,下节重点阐述图像的缩放过程。

4 图像缩放

本文使用 VPSS 核实现双三次插值缩放算法仅适用于逐行扫描的图像,即需要输入图像满足从左到右和从上到下的扫描方式,有效输出图像也按此顺序给出。

视频缩放是一种二维滤波操作形式,可以近似为公式(1)。其中, x 和 y 是图像上离散的像素点的坐标, $P_o(x, y)$ 是在 (x, y) 位置生成的输出像素; $P_i(x, y)$ 是参与运算的输入图像的 (x, y) 位置的像素;在双三次插值缩放算法中, $C(i, j)$ 是取决于双三次插值基函数的系数数组; H_{Taps} 和 V_{Taps} 分别为滤波器中的水平和垂直步长,在双三次插值中,步长为 4,即新产生的像素是由源图像中 16 个关联像素点计算而来。

$$P_o(x, y) = \sum_{i=H_{Taps}-1}^{i=0} \sum_{j=V_{Taps}-1}^{j=0} P_i[x - (H_{Taps}/2) + i, y - (V_{Taps}/2) + j] \times C(i, j). \quad (1)$$

缩放模块中,先对图像进行垂直滤波运算,产生一个中间结果 P_{int} ,见式(2), $A[i]$ 是垂直插值系数权重。

$$P_{int}[x, y] = \sum_{i=H_{Taps}-1}^{i=0} P_i[x, y - (V_{Taps}/2) + i] \times A[i]. \quad (2)$$

垂直分量的输出结果 P_{int} 输入到水平滤波运算中,见式(3), $B[i]$ 是水平插值系数权重。

$$P_o[x, y] = \sum_{i=H_{Taps}-1}^{i=0} P_{int}[x - (H_{Taps}/2) + i, y] \times B[i]. \quad (3)$$

垂直和水平运算分离意味着可以简化乘法操作,以达到节省 FPGA 资源的目的。例如,在图像缩放过程中,输出期望像素 P 在源图像中的位置如图 6 所示, $F_0 \sim F_{15}$ 为点 P 关联的 16 个像素。

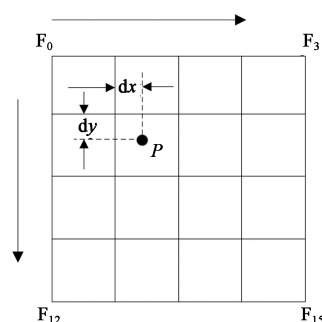


图6 期望像素的位置

Fig.6 Position of the desired pixel

系数权重通过将期望像素位置的小数部分 dx 和 dy 计算得出,水平方向系数权重 $A[i]$ 和垂

直方向系数权重 $B[i]$ 如式(4)所示。

在双三次插值算法中,采用不同的插值基函

$$\begin{cases} A=[\text{coef}(1+dy) & \text{coef}(dy) & \text{coef}(1-dy) & \text{coef}(2-dy)] \\ B=[\text{coef}(1+dx) & \text{coef}(dx) & \text{coef}(1-dx) & \text{coef}(2-dx)] \end{cases} \quad (4)$$

数,其计算量以及缩放效果都有所不同,常用的基函数如 keys 的双三次插值基函数如式(5)所

示,它是一个连续并且具有连续一阶导数的函数。

$$\text{coef}(i)=\begin{cases} \frac{3}{2}|i|^3-\frac{5}{2}|i|^2+1, & 0<|i|\leq 1 \\ -\frac{1}{2}|i|^3+\frac{5}{2}|i|^2-4|i|+2, & 1<|i|\leq 2 \\ 0, & |i|>2 \end{cases} \quad (5)$$

通常来讲,FPGA 执行插值运算时,插值系数数组的权重值被定义成一个小查找表,这样可以节省 FPGA 运算资源的使用。

图像缩放模块逻辑架构如图 7 所示。AXI4 总线用于配置 Scaler 模块的工作模式,图像先经过 Video In to AXI4-Stream 模块转换成 AXI4S 的形式输入到 Scaler 模块,在 Scaler 模块内图像并以 AXI4S 的形式参与运算及输出。Video Timing Controller 与 AXI4-Stream to Video Out 协同工作,vtg_ce 信号用于使能 Video Timing Controller 输出时序给 AXI4-Stream to Video Out 用于输出图像数据以及时序。

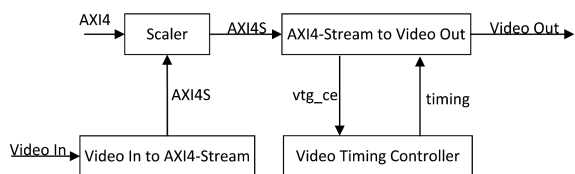


图 7 缩放模块逻辑架构

Fig.7 Logical architecture of scaling module

缩放后,将两路分辨率为 $1\,920\times 2\,160$ 的图像存储到内存中,读取时采用左右拼接的输出方案,实现 $3\,840\times 2\,160$ 的图像数据流,然后将该数据流按照 DP 图像时序输出,即实现双路 3G-SDI 图像的 SBS 格式输出。

5 DP 图像输出

根据裸眼 3D 显示器的技术规格,需提供固

定拼接方式的 3D 图像输入格式。有 2 种拼接方式的 3D 图像格式,分别为 SBS 和 TOP-BOTTOM 的拼接方式。SBS 拼接方式即左边一半为左图,右边一半为右图。TOP-BOTTOM 即左、右图上下排布,上一半为左图,下一半为右图。该系统采用 SBS 拼接方式,拼接后的图像采用 DP 1.2 接口输出,输出逻辑设计框图如图 8 所示。

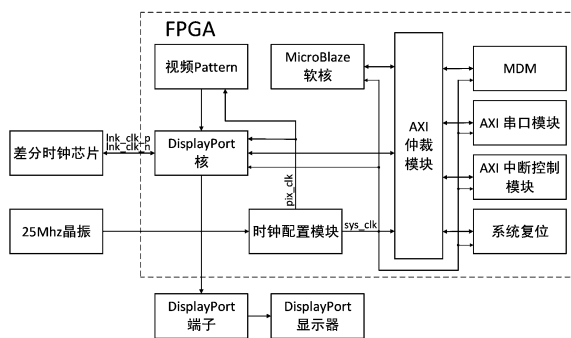


图 8 DP 输出逻辑设计图

Fig.8 Diagram of DP output logic design

输出部分包括时钟配置模块、系统复位模块 MicroBlaze 处理器、AXI 仲裁模块和一些 AXI4 接口的外设。AXI4 外设包括串口 UART 模块、中断控制模块和 DP 核。各模块之间通过 AXI4 总线挂在 AXI 仲裁模块上。视频信号由 DP 核输出,通过 DP 端子输出到带有 DP 接口的显示器。

图像输出模块的设计,包括图像输出逻辑设计图中的硬件时钟配置、输出接口配置、图像输出

时序以及 MicroBlaze 软核控制流程几个部分,旨在输出 $3\,840 \times 2\,160@60\text{ Hz}$ 的图像。

图像输出模块用到的时钟分别为 sys_clk, pix_clk 和 DP 参考时钟 lnk_clk_p, lnk_clk_n。sys_clk 为 Microblaze 处理器和 AXI 域时钟,其频率为 100 MHz。DP 核参考时钟为 135 MHz 差分时钟,由时钟管理芯片 SI5338 提供。视频像素时钟 pix_clk 频率根据实际图像分辨率、帧率以及采用几线制像素输出接口共同决定。这里采用 4 像素接口输出 $3\,840 \times 2\,160@60\text{ Hz}$ 图像,因此 pix_clk 频率为 148.5 MHz。DisplayPort 核定制为 DP 1.2,色彩深度为 16 bit,支持 4 像素接口,最大通道数为 4,最大链接速率为 5.4 Gbit/s。

DisplayPort 物理层使用双向 AUX 通道接口信号,4 个高速通道的 4 个收发器映射到 FPGA 的 MGT_BANK_118 中的 4 个 GTX 收发器,DP 内核基于 AXI4-Lite 接口用以配置,支持 1.62、2.7 或 5.4 Gbps/s 的 1、2 或 4 通道的自动通道速率和宽度调整。MicroBlaze 处理器通过 AXI4-Lite 接口与 DP 核连接。用户可以通过软核对 TX 进行初始化, MicroBlaze 处理器通过对 DP 核的相关寄存器写入和读取操作来启动和维护主链路。MicroBlaze 首先完成对各 AXI 外设包括 AXI Uart lite 和 DisplayPort Source IP 的初始化,然后对 DP 核进行控制。MicroBlaze 对 DP 核的控制流程图如图 9 所示。

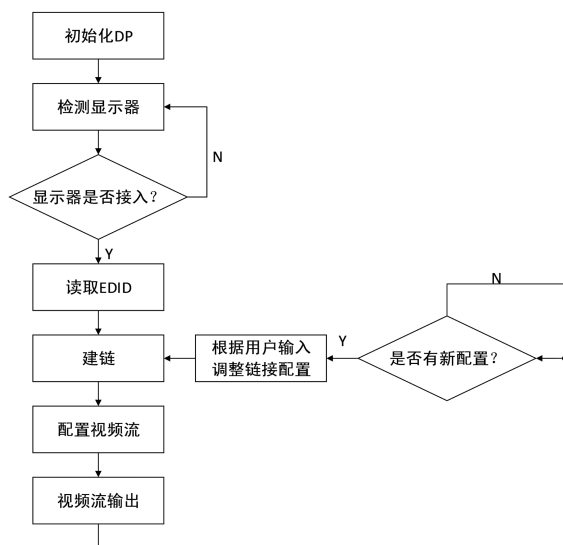


图 9 MicroBlaze 控制 DP 流程

Fig.9 Control flow diagram of MicroBlaze on DP

在 VESA 标准里面, $3\,840 \times 2\,160@60 +$ 消隐 = $4\,400 \times 2\,250@60$, 像素时钟频率为 594 MHz。若采用 4 像素接口,则像素时钟频率变为 $594\text{ MHz}/4 = 148.5\text{ MHz}$,满足设计需求。一个像素时钟传输 4 个像素,因此传输一行 $3\,840$ 个像素需要 960 个像素时钟周期。输出的 $3\,840 \times 2\,160@60\text{ Hz}$ 图像行、场各参数如表 1 所示,水平相关的几个参数是标准值的 1/4,垂直相关的几个参数与标准一致。

表 1 输出图像的行、场参数

Tab.1 Row and field parameters of output image

参数名称	实际值	标准值
H_SYNC	22	88
H_BACK	74	296
H_ACT	960	3 840
H_FRONT	44	176
H_TOTAL	1 100	4 400
V_SYNC	10	10
V_BACK	72	72
V_ACT	2 160	2 160
V_FRONT	8	8
V_TOTAL	2 250	2 250



图 10 DP 输出 $3\,840 \times 2\,160@60\text{ Hz}$ 图像

Fig.10 DP outputs $3\,840 \times 2\,160@60\text{ Hz}$ images

验证设备使用医疗 4K 超高清显示器,通过 MicroBlaze 软核配置 DP 核输出 $3\,840 \times 2\,160@60\text{ Hz}$ 的工作模式,同时 Video Pattern 模块输出 4 像素接口时序,图像数据为 47'h0000_0000_FFFF 即颜色为纯蓝色。如图 10 所示,从局部放大的显示器的控制界面可以看到当前显示的图像分辨率的信息。

```
Reading EDID to check resolution support that is going to be displayed
Edid contents:
00 FF FF FF FF FF FF 00 10 AC EC A0 4C 4E 57 30
20 1C 01 04 B5 3D 23 78 3E EE 95 A3 54 4C 99 26
0F 50 54 A5 4B 00 71 4F 81 80 A9 C0 A9 40 D1 C0
E1 00 D1 00 01 01 4D D0 00 A0 F0 70 3E 80 30 20
35 00 61 5D 21 00 00 1A 00 00 00 FF 00 35 44 57
52 48 38 38 39 30 57 4E 4C 0A 00 00 00 FC 00 44
45 4C 4C 20 55 32 37 31 38 51 0A 20 00 00 00 FD
00 31 56 0A 89 36 00 0A 20 20 20 20 20 01 84

EDID header is: 00 FF FF FF FF FF FF 00
```

图 11 显示器的 EDID 信息
Fig.11 EDID information of display

通过 AUX 通道读取的显示器的 EDID 信息如图 11 所示,EDID 信息由串口打印。

6 实验结果

对 FPGA 进行编程时,JTAG 编程器与下载电路的连接通过一个 7 PIN 间距 1 mm 的接插件端子,端子的接口定义为一种非常规接口的 JTAG 编程口。两路 SDI 输入,一路 DP 输出。验证设备使用的是普通的医疗 4K 超高清显示器。通过 MicroBlaze 软核配置 DP 核输出 3 840×2 160 @60 Hz 的工作模式。

Resource	Utilization	Available	Utilization %
LUT	53070	203800	26.04
LUTRAM	7354	64000	11.49
FF	62066	407600	15.23
BRAM	232.50	445	52.25
DSP	31	840	3.69
IO	179	500	35.80
GT	6	16	37.50
BUFG	19	32	59.38
MMCM	5	10	50.00
PLL	2	10	20.00

图 12 系统逻辑资源使用情况
Fig.12 Usage of system logical resource

系统逻辑资源消耗如图 12 所示,该统计数据来自 Vivado 2017.3 工具对本设计编译后的结果,BUFG、MMCM、BRAM 使用较多,占到资源的 50%以上。

系统总片上功耗主要分为设计的动态功耗和静态功耗。静态功耗分为器件静态和设计静态,器件静态表示当器件上电并且没有设置时晶体管

泄露功率,设计静态表示当器件被设置也没有切换活动时消耗的功率。本设计编译后的功耗统计如图 13 所示。

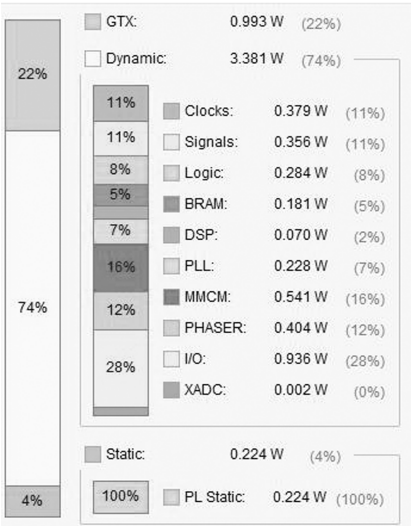


图 13 系统功耗分析
Fig.13 Analysis of system power



图 14 系统实验环境
Fig.14 System experimental environment



图 15 2D 模式 SBS 图像
Fig.15 2D mode SBS image

从图 13 可以计算出,总的片上功耗为 4.598 W,其中动态功耗占系统总功耗的 96%。FPGA 的功耗统计为系统的散热设计和电源设计提供了参考。

系统实验环境如图 14 所示,右侧显示器为 4K 高清医用裸眼 3D 显示器,左侧电脑主机为控制电脑。系统前端采用两路 SDI 信号输入,通过 DP 接口输出 SBS 格式的立体图像到裸眼 3D 显示器,显示器输出 3D 立体的效果。由于拍摄的是二维图片,所以从照片上不能明显看出裸眼 3D 效果。

输出给 3D 显示器之前的图像显示效果如图 15 所示,图像采用 SBS 拼接方式,分辨率为 $3\,840 \times 2\,160$,刷新率为 60 Hz。

7 结 论

本文设计的基于 FPGA 的 4K 裸眼立体显示系统支持参考时钟为 148.5 MHz 的双路 SDI-1080P 高清视频输入,经 FPGA 做格式变换、物理层编解码和拼接等图像处理,可获得 $3\,840 \times 2\,160@60\text{ Hz}$ 的 SBS 拼接格式图像,该图像可直接驱动裸眼立体显示器。经验证,该系统支持单人两视点观看,最佳观看距离为 2 m,可视角度为 $\pm 35^\circ$ 。本系统为高清晰 3D 显示和高速视频处理领域提供一种切实可行的设计方案,有望在医疗教学、会诊和立体手术室等领域取得更进一步的发展。

参 考 文 献:

- [1] 王嘉祺.基于 CUDA 的虚拟人视觉感知与记忆模型及其在路径规划中的应用[D].武汉:华中科技大学,2016.
WANG J Q. Virtual human visual perception and memory model based on CUDA and its application in path panning [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [2] 李超.基于双目立体视觉裸眼 3D 显示技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
LI C. Research on technology of naked-eye 3D display based on binocular stereo vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [3] MCLACHLANG. From 2D to 3D: the future of surgery? [J]. *The Lancet*, 2011, 378(9800): 1368-1368.
- [4] ALARAIMI B, EL BAKBAK W, SARKER S, *et al.* A randomized prospective study comparing acquisition of laparoscopic skills in three-dimensional (3D) *vs.* two-dimensional (2D) laparoscopy [J]. *World Journal of Surgery*, 2014, 38(11): 2746-2752.
- [5] STORZ P, BUSS G F, KUNERTW, *et al.* 3D HD versus 2D HD: surgical task efficiency in standardised phantom tasks [J]. *Surgical Endoscopy*, 2012, 26(5): 1454-1460.
- [6] SINHA R, SUNDARAM M, RAJE S, *et al.* 3D laparoscopy: technique and initial experience in 451 cases [J]. *Gynecological Surgery*, 2013, 10(2): 123-128.
- [7] ZENBUTSU S, IGARASHI T, NAKAMURA R, *et al.* 3D ultrasound assisted laparoscopic liver surgery by visualization of blood vessels [C]//*Proceedings of 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium*. Prague, Czech Republic: IEEE, 2014: 840-843.
- [8] GHEDI A, DONARINI E, LAMERA R, *et al.* 3D vs 2D laparoscopic systems: development of a performance quantitative validation model [C]//*Proceedings of 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Milan, Italy: IEEE, 2015: 6884-6887.
- [9] MURALI A, SEN S, KEHOE B, *et al.* Learning by observation for surgical subtasks: multilateral cutting of 3D viscoelastic and 2D orthotropic tissue phantoms [C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seattle, WA, USA: IEEE, 2015: 1202-1209.
- [10] KONG S H, OH B M, YOON H, *et al.* Comparison of two- and three-dimensional camera systems in laparoscopic performance: a novel 3D system with one camera [J]. *Surgical Endoscopy*, 2010, 24(5): 1132-1143.
- [11] 胡雅洁.北京协和医院成功实施国内首例 3D 腹腔镜肾盂旁囊肿切除术[J].首都医药,2013,20(7):40.
HU Y J. Beijing union medical college hospital successfully carried out the first domestic 3D laparoscopic nephropsectomy [J]. *Capital Medical*, 2013, 20(7): 40. (in Chinese)

- [12] 蒋堃,梁朝朝,周骏,等.3D 腹腔镜与传统腹腔镜技术治疗肾上腺肿瘤的疗效比较[J].中华腔镜泌尿外科杂志(电子版),2013,7(6):3-6.
JIANG K, LIANG C Z, ZHOU J, *et al.* Comparison of 3D and 2D laparoscopic adrenalectomy for adrenal neoplasm [J]. *Chinese Journal of Endourology (Electronic Version)*, 2013, 7(6): 3-6. (in Chinese)
- [13] 李汉忠,张玉石,张学斌,等.3D 腹腔镜系统在泌尿外科手术中的应用[J].中华泌尿外科杂志,2013,34(5):325-328.
LI H Z, ZHANG Y S, ZHANG X B, *et al.* Application of 3D video techniques in urological laparoscopic surgery [J]. *Chinese Journal of Urology*, 2013, 34(5): 325-328. (in Chinese)
- [14] 刘皓,林天歆,许可慰,等.3D 腹腔镜下根治性膀胱前列腺切除术的初步经验[J].中华泌尿外科杂志,2013,34(10):767-770.
LIU H, LIN T X, XU K W, *et al.* Preliminary experience of laparoscopic radical cystectomy and prostatectomy with three-dimensional laparoscopy [J]. *Chinese Journal of Urology*, 2013, 34(10): 767-770. (in Chinese)
- [15] 鲁青.国内首次在神经外科手术中启用 3D 内镜切除脑垂体瘤[J].健康博览,2017(1):12.
LU Q. Three-dimensional endoscopic resection of pituitary adenoma was used in neurosurgery for the first time in China [J]. *Health Expo.*, 2017(1):12. (in Chinese)
- [16] LIU X, LI L. FPGA-based three-dimensional endoscope system using a single CCD camera [C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Information and Automation*. Lijiang: IEEE, 2015: 614-618.
- [17] OH J, KIM K. Accurate 3D reconstruction for less overlapped laparoscopic sequential images [C]//*Proceedings of 2017 International Conference on Bio-engineering for Smart Technologies*. Paris, France: IEEE, 2017: 1-4.
- [18] LEE P Y, YAN S L, HU M H, *et al.* A computed stereoscopic method for laparoscopic surgery by using feature tracking [C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan*. Taipei, China: IEEE, 2015: 9-10.
- [19] ZHAO Y, WEI Y T, CUI X Y, *et al.* 3D display technology in medical imaging field [C]//*Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Medical Imaging Physics and Engineering*. Shenyang: IEEE, 2013: 210-214.

作者简介:



严飞(1983—),男,江苏南京人,博士,讲师,2014 年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事信息显示技术方面的研究。E-mail: fyan@nuist.edu.cn