

基于 FPGA 的红外光斑中心实时检测

陈兴美,严壮志

(上海大学 通信与信息学院,上海 200072)

摘要:红外光斑中心检测在红外自动验光仪、红外测距仪等光学测量和检测仪器中是一项关键技术,检测算法的精度、速度直接影响光学测量的精度及速度。目前的检测处理系统多是基于 PC 机的,存在着实时性、稳定性问题。在总结各种检测算法的基础上,基于重心法使用 FPGA 实现了低信噪比红外光斑中心的实时检测。在实验电路中,先使用视频解码芯片 SAA7113 将模拟 CCD 视频信号转化为 CCIR656 格式数字信号;再在 FPGA 内部使用流水线结构进行直方图计算,计算阈值,二值化图像,五次二值图像收缩,五次二值图像膨胀处理以去除噪声,然后计算重心坐标。实验电路对红外自动验光仪中产生的视网膜反射红外光斑 PAL 制式视频图像信号能在 1/25 s 完成一幅图像的检测。而普通 PC 完成同一过程需要 1 s 左右。文章介绍了基于 FPGA 实现方案。

关键词: FPGA; 红外光斑; 图像处理; 中心检测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)04-0401-05

Real-time detection of infrared spot based on FPGA

CHEN Xing-mei, YAN Zhuang-zhi

(Institute of Communication & Information, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The infrared spot detection is the key technique used in optical measurement and detection instruments, such as infrared automation optometry, infrared range finder. The precision and speed of the detection algorithm affect those of the optical measurement system directly. The detection system is currently based on PC, with the question of real-time and stability. There is a way to realize real-time detection for low SNR infrared spot using FPGA based on gravity model. In test circuit, firstly, analog CCD video signal is converted to CCIR656 digital video signal using the video decoder chip SAA7113; secondly, in FPGA, a streamline structure is used for histogram calculating, binary image, five times eroding and five times dilating for filtering noise, then the coordinate of centre of cavity is calculated. The test circuit can finish the spot detection in one image in 1/25 s for PAL infrared spots video signal from infrared automation optometry, which was generated by retina reflecting. It requires about 1 s for finishing the above process for one normal PC. The scheme based on FPGA is presented.

Key words: FPGA; Infrared spot; Image processing; Spot detection

收稿日期:2004-08-05; 修订日期:2004-10-10

作者简介:陈兴美(1976-),男,湖北钟祥县人,硕士,主要从事生物医学工程方面的研究。

0 引言

红外光斑中心检测在红外自动验光仪、红外测距仪等光学测量和检测仪器中是一项关键技术,检测算法的精度、速度直接影响了光学测量的精度及速度。

传统的红外光斑中心检测处理系统多基于 PC 机,如图 1 所示。光斑中心检测算法主要有三种:重心法、Hough 变换法和基于圆拟合法^[1-5]。但传统的系统很难满足实时要求,并且稳定性、便携性不好,不能适应恶

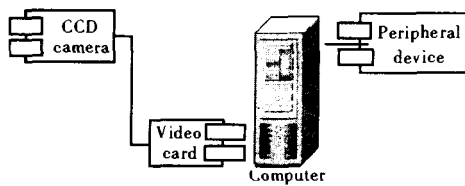


图 1 基于 PC 机的检测系统

Fig.1 Detection system based on PC

劣的环境,性价比不高。为此,提出一个基于 FPGA 的红外光斑中心实时检测处理系统,如图 2 所示。在系统中,FPGA 完成简单而费时的光斑中心检测任务,DSP/ARM 单片机完成计算任务,这样整个系统很容易满足实时要求,稳定性和性价比也得到提高。

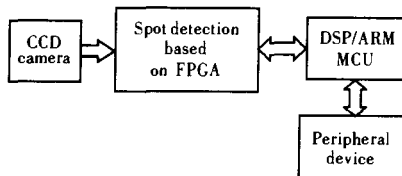


图 2 基于 FPGA 的检测系统

Fig.2 Detection system based on FPGA

1 算法分析

中心检测算法主要有三种:重心法、Hough 变换法、基于圆拟合法。对于一幅 CCD 采集的原始图像,三种方法都需要先滤波,再图形分割,二值化,后两种还需光斑边缘提取。经过处理后的二值图像再经 Hough 变换等方法提取中心坐标等参数。

Hough 变换比较容易 FPGA 实现,能检测任意曲线,适用范围广,但占用 FPGA 资源非常多^[6,7],因此系

统价格高。由于基于圆拟合法使用除法、根方运算较多^[1],不易 FPGA 实现。这里采用重心法实现,算法原理如下。

假设光斑图像处于二维平面坐标系中,大小为 $M \times N$,光斑图像是经过预处理后得到的二值图像,可表示为:

$$g(i,j) = \begin{cases} 1(\text{光斑}) \\ 0(\text{背景}) \end{cases} \quad (1)$$

重心法计算的光斑中心 (x_0, y_0) 为:

$$\begin{cases} x_0 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N jg(i,j) / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j) \\ y_0 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N ig(i,j) / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j) \end{cases} \quad (2)$$

重心法的算法流程如图 3 所示。

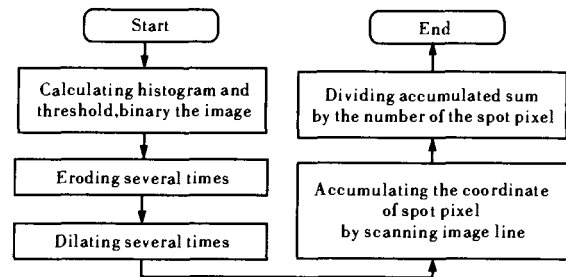


图 3 红外光斑中心检测重心法流程图

Fig.3 Flow chart of infrared spot detection based on gravity model

以下是红外光斑中心检测重心法 FPGA 实现系统的介绍。

2 检测系统组成

CCD 模拟视频信号经视频解码转化为 YUV 数字信号,将一帧图像的第一场信号缓存到 RAM/FIFO 中,再根据第一场信号求得的阈值,对第一场信号和第二场信号二值化后形成两条数据流,同步输入到二值图像处理模块,经过几次收缩膨胀滤出噪声后,根据光斑像素坐标进行累加,再经除法器得出重心坐标后,通过接口电路传输到单片机。检测系统框图如图 4 所示。

视频解码芯片选用 SAA7113H,因为只需亮度信

号,同 PHILIPS 公司的其他视频解码芯片 SAA7111、SAA7115、SAA7118 相比,具有更高的性价比。

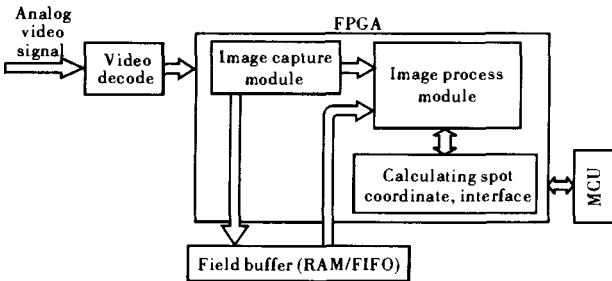


图 4 光斑检测系统框图

Fig.4 Block diagram of spot detection system

FPGA 选用 Altera 公司 Cyclone 系列中的 EP1C6, 该系列 2002 年下半年推出,采用 0.13 μm 硅工艺技术。内部有 5980 个逻辑单元,20 个 M4K RAM 块,两个锁相环电路。使用内部的锁相环对外部的时钟信号带通滤波,可以提高系统的稳定性。

场缓冲存储器可选用大于 288×720 bytes 容量的 RAM 或 FIFO,用于缓冲第一场的数据,该数据作为奇数行,当采集到第二场数据作为偶数行时,两路信号同时从图像采集模块和缓冲存储器移出给图像处理模块处理。

3 图像采集、图像处理、重心计算和单片机的接口

3.1 图像采集

使用状态机完成,通过行同步、场同步、帧同步信号改变状态机的状态,采用 SAA7113H 输出的 27 MHz 时钟信号。

由于一幅图像的上下两帧基本对称,因此可以根据第一场图像求取直方图后确定整幅图像二值化的阈值,使用一个 M4K RAM 块配置成 256×18 的 RAM 块,图像的像素值对应 RAM 的地址,对 RAM 中对应的内容进行累加。在第一场和第二场的间隙,根据 RAM 地址对 RAM 的内容从高到低相加,然后判断求阈值。在此间隙确定阈值,就可以对再从图像采集模块得到的第二场数据和缓冲存储器中的第一场数据逐像素的二值化了。

3.2 图像处理

在实际光学测量中,由于存在的散斑、被测物面反射特性不均匀以及光学系统的影响,导致光斑信号强度分布极不均匀,经过 CCD 采集的图像信噪比较低,使用阈值对图像进行分割以后,需要通过二值图像的运算进行处理。

图像处理模块采用流水线并行处理结构,由于只对亮度信号进行处理,所以时钟频率为 13.5 MHz。流水线由几个相似的膨胀、收缩子块串联组成,子块由抽头移位寄存器和膨胀/收缩模块组成,如图 5 所示。

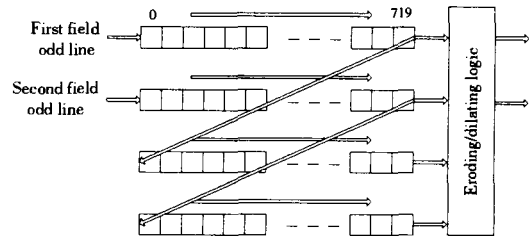


图 5 图像处理子模块

Fig.5 Image processing sub-module

带 4 抽头的移位寄存器组由 M4K RAM 块配置而成,每个移位寄存器组有 720×4 bits 的 RAM 单元。

膨胀/收缩逻辑模块如图 6 所示,其中触发器 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 构成一组, $b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3$ 构成一组。组合逻辑块根据八邻域或四邻域膨胀、收缩公式^[8]很容易使用与门、或门等逻辑门电路组合实现完成^[9,10]。组合逻辑的输出为下一图像处理子块提供信号,这样就完成了一级处理。从图像采集模块得到的第二场数据和缓冲存储器中的第一场的数据的二值化后的数据经过这样的几级膨胀/收缩处理,达到最终要求。

以四邻域收缩处理为例,根据收缩处理定义公式^[8]容易得出图 6 的两个组合逻辑块要实现的逻辑功能公式为:

$$Output_1 = Q_b \& Q_a \& Q_b \& Q_c \quad (3)$$

$$Output_2 = Q_c \& Q_b \& Q_c \& Q_a \quad (4)$$

式中 $Output_1, Output_2$ 分别为上下两个组合逻辑块的输出; Q_b 为触发器 b_2 的输出,以此类推。

根据公式(3)、(4),使用 4 个两输入的与门逻辑门电路组合实现完成逻辑功能。

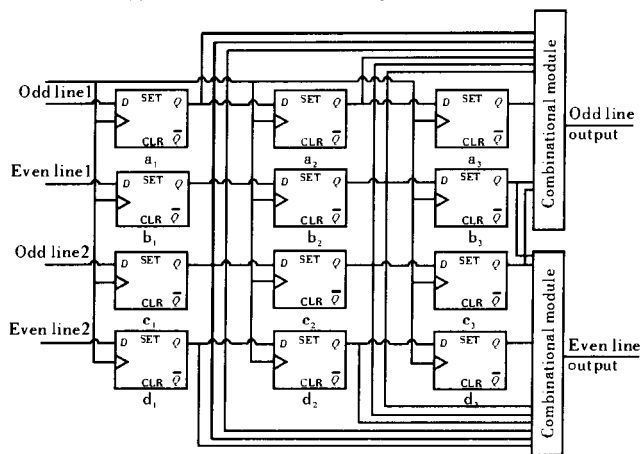


图 6 腐蚀/膨胀逻辑模块

Fig.6 Eroding/dilating logic module

3.3 重心计算和单片机的接口

图像处理,根据输出信号得到光斑的像素位置坐标,进行累加,直到一幅图像扫描结束。然后进行除法计算得出重心坐标,存到一个双时钟 FIFO 中,可以慢速地通过接口电路传给单片机进行更进一步的计算,除法计算也可由单片机完成。

4 试验结果和结论

在红外电脑验光仪中,红外光束经眼球照射到视网膜上反射回来,通过 CCD 采集产生 PAL 制式视频信号,接到图像采集卡得到光斑的原始图像,如图 7 所示,经过计算机处理得到除去噪声的图像,如图 8 所示。图 7 是一幅大小为 720×576 的含有一个圆形光斑的原始 CCD 图像,图 8 是经过图像分割、二值化开运算处理滤除噪声后的图像。8 幅图像的计算机测试



图 7 原始 CCD 图像(720×576)

图 8 处理后图像

Fig.7 Original CCD image (720×576) Fig.8 Image after processing

结果如表 1 所示。

将同样的视频信号接到上述电路,得到的测试结果如表 2 所示。检测一幅图像的时间为 1/25 s,因此可以实时检测。比较计算机测试结果和实验电路测试结果可以看出,两者的精度基本相同,而普通计算机检测一幅图像约需 1 s。

表 1 计算机检测结果

Tab.1 Detection result of computer

| Detection NO. | Horizontal coordinate | Vertical coordinate |
|---------------|---|---------------------|
| 1 | 343.56 | 271.76 |
| 2 | 343.60 | 271.84 |
| 3 | 343.12 | 273.45 |
| 4 | 342.90 | 272.33 |
| 5 | 341.30 | 271.45 |
| 6 | 341.98 | 272.43 |
| 7 | 342.35 | 272.48 |
| 8 | 342.79 | 271.07 |
| Outcome | Horizontal coordinate (average value:342.7000, mean square:0.7906) Vertical coordinate (average value: 272.1013, mean square: 0.7363) | |

表 2 实验电路检测结果

Tab.2 Detection result of test circuit

| Detection NO. | Horizontal coordinate | Vertical coordinate |
|---------------|--|---------------------|
| 1 | 342.91 | 273.02 |
| 2 | 341.20 | 272.45 |
| 3 | 343.51 | 271.31 |
| 4 | 342.89 | 272.39 |
| 5 | 341.06 | 271.05 |
| 6 | 341.58 | 272.84 |
| 7 | 342.53 | 271.63 |
| 8 | 343.26 | 272.17 |
| Outcome | Horizontal coordinate (average value:342.3675, mean square:0.9553), Vertical coordinate (average value: 272.1075, mean square: 0.7123) | |

从上面可以看到图像处理时钟频率为 13.5 MHz,实际上对于一般的 FPGA 速度可以提高 10 倍以上,即使实时处理的图像像素可以达到四百万。利用上述提出的二值图像处理架构通过改变组合逻辑可以实

现一般的二值图像处理,例如,边缘检测、细化、抽骨架、剪枝等。

参考文献:

- [1] KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering (孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法. 红外与激光工程), 2002, 31(3): 275-279.
- [2] YANG Yao-quan, SHI Ren, YU Xi-ning. An algorithm to raise the location precision of laser spot center based on Hough transform [J]. Acta Optica Sinica (杨耀权, 施仁, 于希宁. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法. 光学学报), 1999, 19(12): 1655-1660.
- [3] CHEN Xiao-dong, LI Wei-min, LI Jing, et al. Error analysis of the center of gravity method when used to get the position of a facula[J]. Optical Technique (陈晓东, 李为民, 李静, 等. 利用重心法求光斑信号位置的误差分析. 光学技术), 2000, 26(1): 5-8.
- [4] Pratt W K. Digital Image Processing. 2nd ed [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [5] LI Xiao-feng, LUO Tong, DENG Ke, et al. Analysis and experiment of CCD-applied spatial optical communications light spot position locating gravity center calculation[J]. Optical Communication Technology (李晓峰, 罗彤, 邓科, 等. 采用 CCD 的空间光通信光斑位置提取重心算法的分析及实验. 光通信技术), 2004, 6: 13-15.
- [6] Meribout M, Ogura T, Nakanishi M. On using the CAM concept for parametric curve extraction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(12): 21-26.
- [7] San J L, Dinstein I. Projection-based geometrical feature extraction for computer vision: algorithms in pipeline architectures[J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1987, 9(3): 160-168.
- [8] Kenneth R Castleman; ZHU Zhi-gang, LIN Xue-yan, SHI Ding-ji. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (Kenneth R Castleman; 朱志刚, 林学闫, 石定机. 数字图像处理. 北京: 电子工业出版社), 2002.
- [9] Pratt W K, Kabir I. Morphological Binary Image Processing with a Local Neighborhood Pipeline Processor [M]. Tokyo: Computer Graphics, 1984.
- [10] Arnold M. Verilog Digital Computer Design: Algorithm to Hardware [M]. NJ: Prentice Hall, 1998.

(上接第 393 页)

参考文献:

- [1] Jamieson T H. Thermal effects in optical systems[J]. Optical Engineering, 1981, 20: 156-160.
- [2] Veronica Povey. Athermalisation Techniques in Infrared System [A]. SPIE[C]. 655. 142-153.
- [3] Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tiajime T, et al. Multilens system design with an athermal chart[J]. Applied Optical, 1994, 33(34): 8009-8013.
- [4] WU Xiao-jing, MENG Jun-he. Approach of athermalizing infrared optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering (吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径. 红外与激光工程), 2003, 32(6): 572-576.
- [5] Savage J A. Infrared Optical Materials and Their Antireflection Coatings [M]. New York: Academic Press, 1995.
- [6] Optical Research Associates. CODEV Reference Manual [Z]. California: Optical Research Associates, 1995.
- [7] YUAN Xu-cang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (袁旭沧. 光学设计. 北京: 北京理工大学出版社), 1988.
- [8] LI Lin, WANG Xuan, ZHANG Li-qin, et al. Thermal effects for optical system and design of an analysis program[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (李林, 王焯, 张丽琴, 等. 光学系统热效应及分析软件研制. 北京理工大学学报), 2000, 20(1): 112-114.
- [9] JIAO Ming-yin. The application of diffractive optical elements in IR imaging systems[J]. Journal of Applied Optics (焦明印. 衍射光学元件在红外成像系统中的应用. 应用光学), 2000, 21(6): 17-20.
- [10] JIN Le-tian, HU Yu-xi, YANG Jian-feng, et al. Thermal aberration analysis of coaxial spherical optical systems[J]. Acta Photonica Sinica (金乐天, 胡玉禧, 杨建峰, 等. 共轴球面光学系统的热像差分析. 光子学报), 1999, 28(7): 647-650.