

激光通信光斑图像高速采集与实时处理系统

王莹¹, 伞晓刚²

(¹长春职业技术学院信息技术分院, 吉林 长春 130033;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为了解决激光通信系统中对信标光捕获、跟踪与对准的高实时性技术难题, 设计了基于 FPGA 的高速激光光斑采集与处理系统。首先, 采用高速摄像机与 FPGA 设计了激光光斑采集与处理硬件电路。然后, 采用中值滤波与形态学滤波对图像进行背景抑制和目标增强。最后, 对滤波后的图像分别计算光斑的形心和质心, 并通过加权平均后将光斑中心位置传输至控制系统中, 控制快速反射镜完成对目标的跟踪。所设计系统的实时提取像素分辨率为 256×256 , 帧频为 10 000 Hz。实验结果表明, 所设计系统能够对包含激光光斑目标的超高帧频图像进行实时处理, 能够提高基于快速反射镜的闭环控制带宽。

关键词 激光通信; 高速采集; 现场可编程门阵列; 实时处理

中图分类号: TN271

文献标识码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20204001.124

High Speed Acquisition and Real-time Processing System for Laser Communication Spot Image

Wang Ying¹, San Xiaogang²

(¹Changchun Vocational Institute of Technology, Information Technology Branch, Changchun, Jilin 130033, China;

²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract In order to solve the technical problem of high real-time beacon acquisition, tracking and alignment in laser communication system, a high-speed laser spot acquisition and processing system based on FPGA is designed. Firstly, the hardware circuit of laser spot acquisition and processing is designed by using high-speed camera and FPGA. Then, median filtering and morphological filtering are used to suppress the background and enhance the target. Finally, the centroid and centroid of the spot are calculated respectively for the filtered image, and the centroid position of the spot is transmitted to the control system by weighted averaging. The fast mirror is controlled to track the target. The real-time extraction pixel resolution of the system is 256×256 , and the frame rate is 10 000 Hz. The experimental results show that the designed system can process the ultra-high frame rate images containing laser spot targets in real time and improve the closed-loop control bandwidth based on fast reflector.

Key words laser communication; high-speed acquisition; FPGA; real-time processing

0 引言

随着科学的发展, 航空航天突飞猛进, 激光通讯技术的研究已经成为研究热门。激光通讯技术能够实现远距离、精准、快速的信息传输, 并且具有较强的抗干扰性能。在研究激光通讯技术时, 快速的捕获、精准跟踪、准确的瞄准 (Acquisition, Tracking and Pointing, ATP) 等方向的研究是激光通讯领域的重中之重^[1-4]。

目前, 数字图像处理技术的发展^[5-7], 为激光通

信技术的研究提供了更多的便利。采用数字图像处理技术实现激光通信中光斑识别与检测的研究, 已经成为提取光斑目标位置信息的关键技术。各个研究单位都开展了光斑位置信息检测的研究。查阅文献, 国外研究机构采用 FPGA 实现了较高帧频的图像处理系统^[8]。在国内对于光斑检测的算法主要包括: 自动阈值处理算法^[9], 圆心拟合的中心定位算法^[10], 基于小波的光斑去噪算法^[11], 单点灰度值算法^[12]等。这些方法都是在仿真环境下进行实验研

收稿日期: 2019-03-03; 收到修改稿日期: 2019-05-24

基金项目: 教育部职业院校课题-2018-2020 年信息化教学研究课题 (项目编号: 2018LXB0130)

作者简介: 王莹 (1982—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向 电子信息。E-mail: yingying8213@163.com

伞晓刚 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向 激光通信和结构设计。E-mail: sanxg@ciomp.ac.cn

究的,其实际应用效果并不明确。目前已实际应用的研究中,文献[13]提出了采用粒子滤波算法实现了对 640×480 分辨率图像的 24 Hz 帧频的检测;文献[14]提出采用中值滤波法实现了对 $1\,024 \times 1\,024$ 分辨率图像的检测,并实现了 25 Hz 帧频响应;文献[15]提出了采用三邻域计数法实现对 320×256 图像的 83 Hz 的处理。根据前期的调研,目前的激光通信技术对图像处理的帧频要求在 $1\,000\text{ Hz} \sim 3\,000\text{ Hz}$ 范围,研制高帧频响应的光斑图像处理系统,能够满足激光通信的要求,有效提高通讯系统的性能。

为此,本文设计了一种基于 FPGA 硬核的高实时性激光光斑图像处理系统,能够有效的对高速图像中的光斑目标进行定位与检测。该系统能够准确实现对分辨率 256×256 图像的 $10\,000\text{ Hz}$ 预处理和光斑位置的检测。

1 系统硬件设计

传统的光斑检测系统主要采用计算机为核心进行输出处理。以计算机为核心时,是要通过图像采集卡实现对摄像机图像信息的接收,进而传输到计算机中,实现对光斑中心位置的计算。当需要处理的图像帧频过高时,高速的图像处理对计算机硬件要求极高,极大的提高了设计成本。同时,传统方法也有采用 FPGA+DSP 进行图像处理的系统设计。这种方法虽然采用 FPGA 实现对图像的高速采集,但是受 DSP 单线程运行的限制,图像处理速度仍然实现不了太高。

为提高数据处理能力,本文设计了一种采用 FPGA 硬核的高速图像采集和处理系统。由于 FPGA 硬核是高端 PPGA 中的一种内部资源,它能够在保证 FPGA 的快速处理能力的同时,进行卷积、除法等复杂运算。采用 FPGA 内核设计数据处理系统,能够极大的提高数据运算速度。

所设计的硬件电路原理如图 1 所示。图中主要包括计算机、FPGA 芯片和摄像机。

其中, FPGA 芯片为 XILINX 公司生产的 XC5VLX110T 型号 FPGA。该芯片用 17 280 个逻辑单元,每个单元内含有 4 个查找表和 4 个触发器;同时拥用 $5\,328 \times 1\,000$ 块随机存储器。该 FPGA 内部拥有 64 个 DSP48E 数字信号处理运算硬核,可以实现卷积、除法等复杂运算。本文所设计的所有输出处理硬件电路,都由 FPGA 内部逻辑电路组成,按照功能划分, FPGA 内部主要包括:图像采集单元、数据

缓存、图像处理单元、信号整合单元和 PCIe 传输单元。工作时,输出采集单元接收来自摄像机的图像数据,并将图像高速的缓存存在数据缓存中;图像处理单元读取缓存的图像,实现对光斑中心位置的定位等运算;信号整合模块将图像与其光斑中心坐标信息进行数据合并,将光斑信息通过 PCIe 传输单元传输到计算机中,供显示及后续处理。

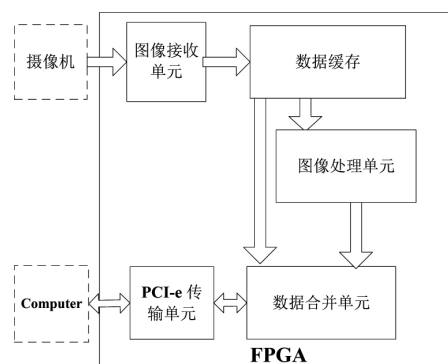


图 1 系统组成框图

Fig. 1 Systematic block diagram

2 基于图像预处理的光斑中心计算

ATP 系统对于光斑位置的定位运算,是通过图像目标检测的方法实现的。目前常用的目标检测方法主要包括:单幅图像检测法和序列图像检测法。序列图像检测法需要根据多帧的图像运算才能输出一组运算结果,不适合高帧频的系统设计。因此,本文采用单幅图像检测法,先进行预处理,再计算目标的中心位置,其工作原理如图 2 所示。

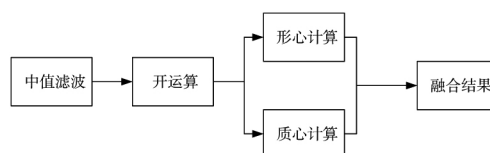


图 2 图像处理模块设计流程

Fig. 2 Design flow of image processing module

在处理时,首先要经过中值滤波和形态学开运算的预处理,然后计算目标光斑的形心和质心,最后经过融合输出结果。

2.1 预处理运算

以图像中行方向建立 x 轴,列方向建立 y 轴,并设图像为 $f(x, y)$ 。那么,经过中值滤波后,图像变为

$$g_m(x, y) = \text{median}_{(x, y) \in D} [f(x, y)] \quad (1)$$

式中, $g_m(x, y)$ 表示中值滤波后的图像, D 是 (x, y)

的定义域,在此处为整幅图像, *median* 表示求定义域所对应的值域的中值。

形态学开运算是采用一定形态的结构元素对图像中的对应形状进行提取和度量的运算。本文在运算中,定义一种滤波算子 Top-hat,其表达式为

$$g_{TH}(x,y) = g_m(x,y) - [g_m(x,y) \circ b] \quad (2)$$

式中“ $\circ$ ”表示形态学开运算,即先腐蚀后膨胀, b 为形态学操作中的结构元素。采用式(2)中的滤波算子对图像 $g_m(x,y)$ 进行进一步的预处理,最终得到预处理后的图像为 $J(x,y) = g_{TH}(x,y)$ 。

2.2 定位运算

在理想的通信环境下,ATP 系统捕获到的应是包含 1 个符合二维高斯分布的圆形高亮光斑图像,在计算目标位置信息时,只计算该高斯光斑的形心或质心即可。然而在远距离近海面使用环境下,激光束在传输过程中会受到大气湍流等因素的干扰,造成所捕获图像中的光斑有漂移、闪烁和破碎等现象,会出现分布不规则,强度不均匀的光斑目标。针对上述现象,本文提出了一种融合位置信息的光斑定位算法,所需的基本位置信息包括全局目标的形心和质心。经过 3.1 节的预处理后得到的图像为 $J(x,y)$,则全局目标形心和全局目标质心计算公式分别如式(3)、式(4)所示

$$\begin{cases} c_x = \frac{\sum_{(x,y) \in D} x \omega_c(x,y)}{\sum_{(x,y) \in D} \omega_c(x,y)} \\ c_y = \frac{\sum_{(x,y) \in D} y \omega_c(x,y)}{\sum_{(x,y) \in D} \omega_c(x,y)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} g_x = \frac{\sum_{(x,y) \in D} x \omega_g(x,y)}{\sum_{(x,y) \in D} \omega_g(x,y)} \\ g_y = \frac{\sum_{(x,y) \in D} y \omega_g(x,y)}{\sum_{(x,y) \in D} \omega_g(x,y)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, (c_x, c_y) 和 (g_x, g_y) 分别为全局目标形心坐标和全局目标质心坐标, D 是 (x,y) 的定义域,在此处为整幅图像, ω_c 和 ω_g 分别是权重,计算方式为

$$\omega_c = \begin{cases} 1, J(x,y) \geq T \\ 0, J(x,y) < T \end{cases} \quad (5)$$

$$\omega_g = \begin{cases} J(x,y) - T, J(x,y) \geq T \\ 0, J(x,y) < T \end{cases} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, T 是图像分割时所取阈值。然后,采用式(7)计算融合形质心的光斑中心位置

$$\begin{cases} l_x = m_1 c_x + m_2 g_x \\ l_y = m_1 c_y + m_2 g_y \end{cases} \quad (7)$$

式中, m_1, m_2 分别是形心和质心的权重,且满足 $m_1 + m_2 = 1$ 。 m_1 和 m_2 的值将通过在实验过程中静态条件下光斑中心位置误差最小的准则确定。

3 实验结果及分析

3.1 实验平台搭建

为验证所设计系统的性能,搭建了实验平台,如图 3 所示。

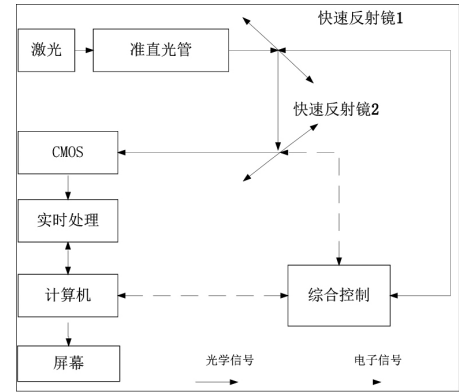


图 3 实验平台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental platform

图 3 中实验平台由激光器、准直光管、2 套快速反射镜、快反镜控制器、高速 CMOS 相机、实时图像处理系统和主控计算机组成。除计算机外,其它设备和器件均放置在气浮平台上。激光器发射 850 nm 波段的激光,经光管准直,先后入射到第一和第二个快速反射镜上。所使用相机是输出接口为 Coaxpress 的 MC-3082 型 CMOS 相机,调整分辨率为 256×256 , 帧率 10 000 Hz, 曝光时间 0.09 ms, 其功能为接收两次反射后的光信号,并将数字图像信号输出至实时处理系统中。实时处理系统完成图像处理和光斑中心位置提取,并将图像信号和目标位置信息合并后传输至计算机中进行显示和存储。主控计算机选用 Amax 某小型工作站。此外,计算机还能够向快反镜控制器发送命令,从而控制两个快反镜的状态。实物图如图 4 所示。

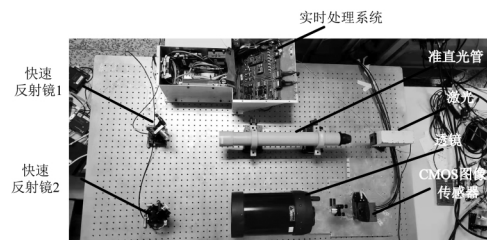


图 4 实物图

Fig. 4 Experiment diagram

实验时,令快速反射镜 1 为扰动源,使光斑位置在靶面范围内不停地快速变化,同时根据实时处理系统提供的目标位置信息,令快速反射镜 2 完成对动态目标的跟踪。计算机软件界面如图 5 所示,主要功能包括:显示原始图像、显示目标形心位置、显示目标质心位置、设置融合算法权重、并能够设置相机参数。

静态环境下,对光斑图像进行采集,并对光斑进行定位运算。将定位运算得到的值与设定的光斑位置值进行做差运算,得到脱靶量。此时,脱靶量曲线如图 6 所示。可以看出,在未加入任何干扰的原始静态环境下,系统误差为 0.034 像素,系统误差较

小。所设计的系统可以实现 10 000 Hz 帧频的图像光斑处理与定位。

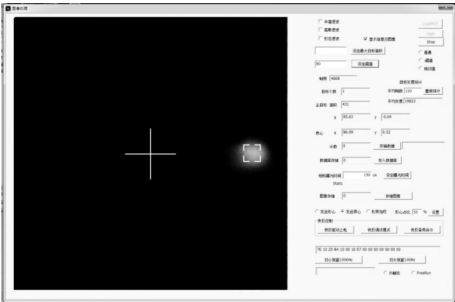


图 5 软件功能界面
Fig. 5 Software Functional Interface

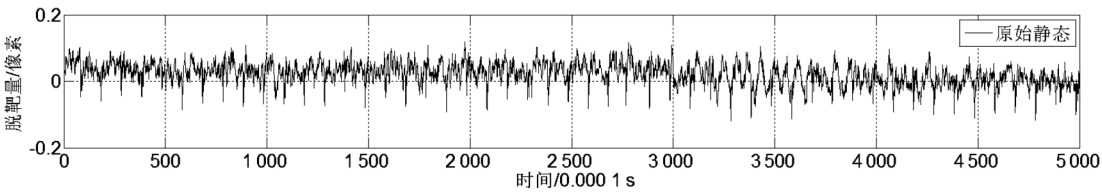


图 6 静态时光斑定位的脱靶量
Fig. 6 Miss distance of static spot location

3.2 快速扰动光斑实验

采用快速反射镜 1 模拟大气湍流等扰动,开启快速反射镜 1 后,对光斑施加 200 Hz 的快速抖动,并开启系统进行实验。四幅图像采集结果如图 7 (a)~图 7(d)所示。

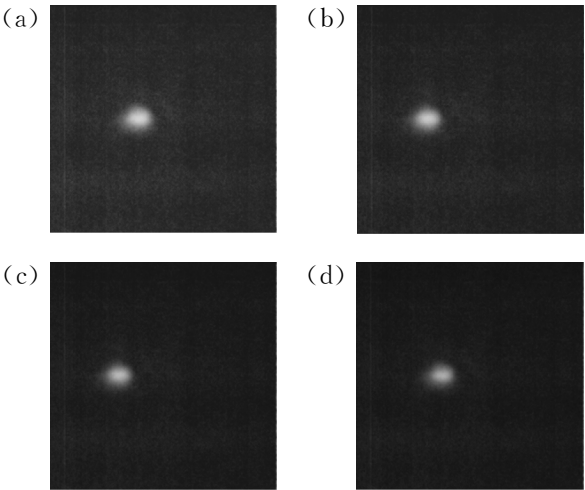


图 7 扰动后的光斑图像
Fig. 7 Disturbed Spot Image

为了验证采集系统是否可以满足激光通信的“跟踪瞄准”需求。开启快速反射镜 2,以所设计系

统计算得到的目标中心位置与预定位置的偏差作为负反馈,进行闭环跟踪。四次图像采集的结果如图 8(a)~图 8(d)所示。

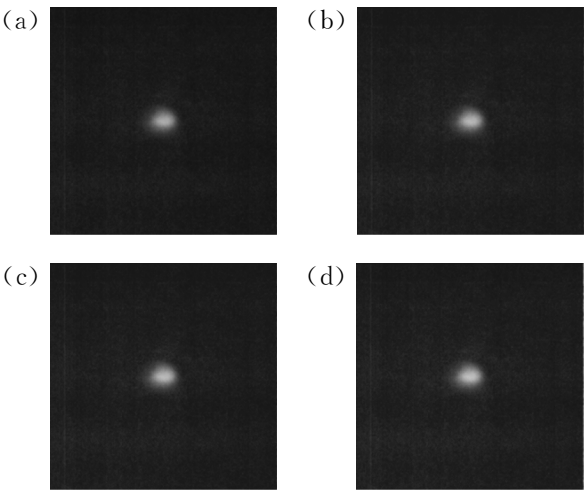


图 8 闭环跟踪后光斑序列图像
Fig. 8 Spot Sequence Image after Closed-loop Tracking

分别记录下加入扰动时的定位脱靶量和开启闭环跟踪后的定位脱靶量。对比加入扰动前(图 9(a))和开启闭环跟踪后(图 9(b))的脱靶量曲线如图 9 所示

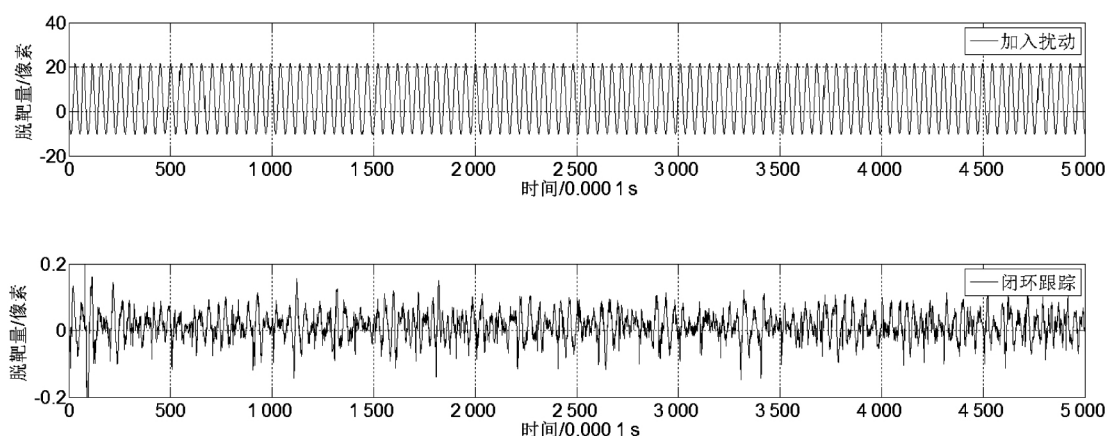


图9 光斑中心位置变化比较

Fig.9 Comparisons of the changes in the center position of the spot

图9中可以看出,当加入扰动时,开机闭环跟踪后光斑中心位置与零点位置误差约为0.045像素。与静态时系统误差接近,因此所设计系统的频响满足激光通信的跟踪瞄准要求。

4 结论

激光通信系统中的捕获跟踪瞄准问题一直是重点研究的方向,激光通信光斑检测系统的图像采集和处理频率普遍需要达到1000 Hz~3000 Hz,而继续提高对光斑图像的采集和处理频率,能够有效提升激光通信ATP系统的性能。为此,本文提出了基于MC-3082相机和Coaxpress协议的高帧频图像实时处理与目标位置检测系统,设计了基于FPGA的硬件系统,提出了快速实现检测的方法和算法流程,实现了分辨率为 256×256 ,帧频10000 Hz图像的预处理与激光光斑中心位置的实时提取。经过与伺服系统闭环控制实验验证,所设计系统满足激光通信的性能需求。

参考文献

- [1] 朱贵伟. “激光通信光学有效载荷”计划——美国星地激光通信演示验证[J]. 国际太空, 2015(1): 58-62.
- [2] 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 670-680.
- [3] 李鑫. 星间激光通信中链路性能及通信性能优化研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [4] 钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测

- 相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.
- [5] 李先友, 赵曙光, 段永成, 等. 基于FPGA的实时MIPI CSI-2图像采集与处理系统[J]. 电子技术应用, 2019, 45(1): 97-100.
- [6] 陈文艺, 张龙, 杨辉. HDR图像色调映射的自适应色彩调节算法[J]. 电子技术应用, 2018, 44(11): 107-110.
- [7] 徐中辉, 吕维帅. 基于卷积神经网络的图像着色[J]. 电子技术应用, 2018, 44(10): 19-22.
- [8] GUAN B. Improved self-adaptable anisotropic laplacian of gaussian operator[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 37(3): 210-212.
- [9] 陈运锦, 冯莹, 魏立安, 等. 光斑质心亚像素定位误差的实验研究[J]. 光电工程, 2010(2): 80-84.
- [10] 刘智, 翟林培, 郝志航. 互补金属氧化物半导体图像传感器亚像元细分精度实验研究[J]. 中国激光, 2007(1): 118-124.
- [11] 周杰. 应用于图像处理的中值滤波改进算法[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [12] 孙翠娟, 杨卫平, 沈振康, 等. 基于空间匹配滤波的红外背景抑制技术[J]. 红外技术, 2003(1): 36-39.
- [13] 董鸿燕, 李吉成, 沈振康. 基于高通滤波和顺序滤波的小目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2004(5): 596-598.
- [14] 李秋华, 王厚生, 邹自力, 等. 基于小波变换与灰度形态学滤波的双波段红外图像弱目标融合检测[J]. 信号处理, 2006(3): 312-316.
- [15] 秦翰林, 李佳, 周慧鑫, 等. 采用剪切波变换的红外弱小目标背景[J]. 红外与毫米波学报, 2011(4): 163-168.