

文章编号: 1001-3806(2015)04-0533-04

高速激光光斑检测系统的设计与实现

李一芒, 盛磊, 陈云善

(中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为了实现激光通信系统对信标光的捕获、跟踪与瞄准, 采用嵌入式图像处理技术设计了基于现场可编程门阵列器件的高速激光光斑检测系统, 对分辨率为 $300\text{pixel} \times 300\text{pixel}$ 、帧频 1000Hz 序列图像中的激光光斑目标进行了提取操作。采用 1 维滤波算子构造方位滤波器进行图像预处理, 同时便于硬件实现, 滤波后经阈值分割、形态学开运算与连通域分析, 最后提取了激光光斑的形心位置信息。结果表明, 所设计系统能够对包含激光光斑目标的高帧频图像进行实时处理。目标形心提取频率可以满足激光通信系统在动态链路建立方面的要求。

关键词: 图像处理; 激光通信; 现场可编程门阵列; 方位滤波器; 实时处理

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.023

Design and implementation of high-speed laser spot detection systems

LI Yimang, SHENG Lei, CHEN Yunshan

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

Abstract: In order to realize beacon acquisition, tracking and pointing (ATP) of laser communication, a high speed laser spot detection system was designed based on field-programmable gate array and embedded image processing technology. Laser spots of targets in the sequence images with $300\text{pixel} \times 300\text{pixel}$ resolution and 1000Hz frame rate were extracted. 1-D filtering operator position filter was used to process the images and the hardware was implemented at the same time. After filtering, threshold segmentation, morphological opening operation and connected region analysis, centroid position information of laser spot were extracted. The experimental results show that the system is capable of real-time processing of high-frame rate images containing targets' laser spot. The extracting frequency of target centroid can meet the requirement of the dynamic link setup of laser communication.

Key words: image processing; laser communication; field-programmable gate array; local filter; real-time processing

引言

由于激光通信系统具有带宽、高速、抗截获能力强、抗干扰能力强和轻小型等突出优点, 使其非常适合深空、星际、星地、空空、空地等链路通信, 因此在近年来得到了迅速发展^[1-3]。激光通信链路的建立与保持离不开对信标光的捕获、跟踪与瞄准 (acquisition, tracking and pointing, ATP)^[4]。基于数字图像处理的光斑目标位置信息提取是 ATP 中的一项关键技术, 其提取速度与精度直接影响链路的通断, 开展相关研究有着重要的意义。

对基于数字图像处理的激光通信光斑检测技术的研究主要可分为算法理论和实际应用两个方面。算法方面, ZHANG 等人^[5]提出了基于噪声特性的自动阈值

处理算法; LIU 等人^[6]提出了基于圆心拟合的中心定位算法; SUN 等人^[7]提出了基于小波的光斑去噪算法; SHAO^[8]提出了修正的单点灰度值算法。上述对于算法的研究均是通过仿真环境进行处理效果的验证, 其硬件可移植性和算法实时性尚有待考量。在应用方面, LU 等人^[9]提出的基于粒子滤波的方法应用于分辨率为 $640\text{pixel} \times 480\text{pixel}$ 、帧频为 24Hz 的序列图像中; CHENG^[10]采用中值滤波实现了分辨率 $1024\text{pixel} \times 1040\text{pixel}$ 、帧频 25Hz 序列图像的光斑提取; XU 等人^[11]提出的基于上三邻域连续点计数法能够对分辨率 $320\text{pixel} \times 256\text{pixel}$ 、帧频 83Hz 的图像进行实时处理。随着对激光通信研究的不断深入, 对提取光斑目标的频率要求也越来越高, 100Hz 及以下的提取频率已经不能满足动态链路的建立与保持。

国外一些学者通过以现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 为核心器件的系统已经实现了对高帧频图像的实时处理, 为提高国内在研的激光通信系统在图像方面的处理速度, 本文中针对

作者简介: 李一芒 (1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事数字图像处理方面的研究。

E-mail: liyimangkj@126.com

收稿日期: 2014-06-19; 收到修改稿日期: 2014-07-11

高速序列图像中激光光斑目标的检测问题设计了基于 FPGA 的实时图像处理系统,提出了基于 1 维滤波算子的方位滤波器,并实现了分辨率为 300pixel × 300pixel,帧频 1000Hz 序列图像的预处理与激光光斑中心位置的实时提取。

1 系统硬件设计

已有的激光光斑检测系统其硬件设计主要分为基于计算机和基于 FPGA 与数字信号处理器(digital signal processor, DSP)架构两种方案。基于计算机处理的方案通过图像采集卡获取相机拍摄的图像信息,由计算机完成对图像的处理及对光斑中心位置的提取等任务。在高帧频情况下,普通计算机很难完成对图像数据的实时处理,使用研华工控机运行 Visual Studio2008 软件编写的图像处理软件对包含光斑的分辨率为 300pixel × 300pixel 的图像进行目标提取,每幅图像需耗时 0.707s,采用高性能多核计算机并辅以多线程技术虽然能提高这一方案下的数据处理能力,但同时会大幅提高成本,且计算机内部资源需要通过操作系统进行调度,因此这一方案的资源利用率低,实现难度大。基于 FPGA + DSP 的方案是目前实时图像处理领域常用架构, FPGA 主要担负数据缓存和信号控制等任务, DSP 则主要进行数据运算。由于 DSP 进行数据运算时是顺序执行,因此其对高帧频图像的实时处理能力存在一定局限,使用以 TMS320C6678 型 DSP 为核心器件的图像处理平台对包含光斑的分辨率为 300pixel × 300pixel 的图像进行目标提取,每幅耗时约 0.032s。上述方案均不能满足对 1000Hz 频率的图像进行实时处理的需求。随着电子技术的不断发展, FPGA 在保留其并行处理能力的同时,能够进行除法和卷积等运算操作,为保证系统的实时处理能力,本文中的设计光斑检测系统以 FPGA 作为核心芯片展开,在硬件设计中,采用赛灵思公司(Xilinx)的 XC5VLX110T 型 FPGA 芯片为核心运算器件。该款 FPGA 内部资源丰富,根据其技术资料显示,有 17280 个资源单元,每个资源单元内包括 4 个显示查找表和 4 个触发器,拥有 5328 × 1000 块随机存储器可作为缓存;运算能力方面,该 FPGA 拥有 64 个 DSP48E 数字信号运算内核,能够进行卷积、除法等复杂运算。利用 XC5VLX110T 型 FPGA 内的功能内核和丰富的存储资源可以实现对高帧频图像的实时处理与通信控制等功能,其框图如图 1 所示。

系统主要由 FPGA 及外围电路组成。系统的主要工作过程为图像接收模块接收相机采集到的图像信号,并将数字图像信息传输至缓存模块中,图像处理模

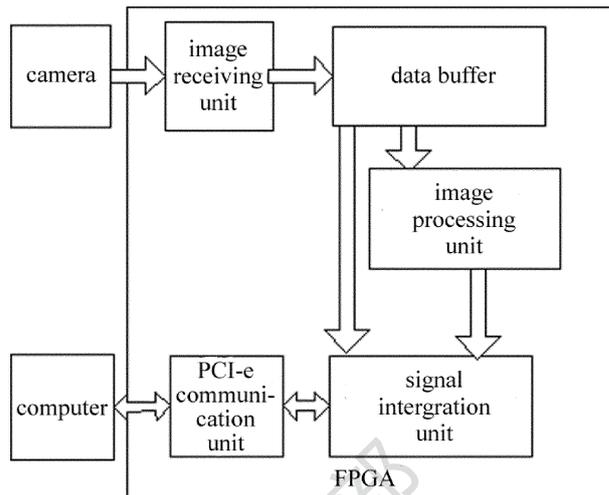


Fig. 1 System framework

块从缓存依次提取数据并进行滤波和光斑中心提取等操作,图像处理模块将提取的光斑中心坐标值传输至信号整合模块中,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,通过 PCI-e 通信模块将原始图像信息与光斑中心坐标传输至主控计算机中。

2 系统算法流程

图像处理模块是高速激光光斑检测系统的核心部分,其设计工作流程如图 2 所示。

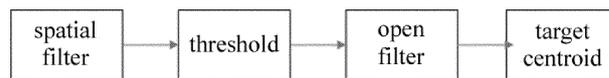


Fig. 2 Design flow of image processing unit

为保证系统的实时性,在对图像进行预处理时设计采用空域滤波,与频域滤波相比, FPGA 的并行处理机制更适合实现空域滤波算法。数字图像信息是 1 组 2 维数字信号,因此在设计时首先从 2 维滤波器入手展开研究,拉普拉斯-高斯(Laplacian of Gaussian, LOG)算子是典型的 2 维滤波算子。设原始图像可以表示为 $f(x, y)$, 2 维 LOG 算子的定义式为:

$$L(x, y) = -\frac{1}{2\pi\sigma^4} \left[2 - \left(\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} \right) \right] \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right) \quad (1)$$

式中, σ 为原始图像 $f(x, y)$ 的高斯分布标准差,算法基本思想如下:图像以 2 位数字信号形式与高斯算子卷积达到平滑效果,拉普拉斯算子将边缘点转换成零交叉点,通过交叉零点来实现对图像边缘的检测。由于高斯函数关于轴对称,因此 LOG 算子属于各向同性算子,当目标性状不规则时,采用经典 LOG 算子滤波不能对不同方向的边缘进行有效的检测,而且不利于 FPGA 进行算法实现。为解决上述问题,本文中提出 1

维 LOG 算子概念,其中 1 维高斯分布函数为:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式中, μ 是高斯分布的期望值。当 $\mu = 0$, 对其求二次微分并取反得到 1 维 LOG 算子 $L(x)$ 的表达式如下:

$$L(x) = \frac{d^2}{dx^2}g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \left(1 - \frac{x^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

(3) 式是关于 x 的一元函数,而待处理图像均为 2 维数字信号,采用 1 维算子滤波仅能从行方向或列方向对图像进行处理,因此需设计多方位滤波器对 2 维数字图像信号进行滤波。

为表述方便,以整幅图像的左上角为坐标原点,行方向从左至右建立 x 轴,列方向从下至上建立 y 轴,则原始红外图像可以表示为 $f(x,y)$,根据 1 维 LOG 算子函数定义多方位滤波算子如下:

$$L_{ML}(i) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{l=1}^4 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l^3} \left(1 - \frac{i^2}{\sigma_l^2}\right) \exp\left(-\frac{i^2}{2\sigma_l^2}\right)$$

$$\begin{cases} l = 1, i = x, (x = -M_2, \dots, -1, 0, 1, \dots, M_1) \\ l = 2, i = y, (y = -M_4, \dots, -1, 0, 1, \dots, M_3) \\ l = 3, i^2 = x^2 + y^2, (x = y = -M_6, \dots, -1, 0, 1, \dots, M_5) \\ l = 4, i^2 = x^2 + y^2, (x = -y = -M_8, \dots, -1, 0, 1, \dots, M_7) \end{cases} \quad (4)$$

式中,下标 l 是不同方向的滤波算子标号, σ_l 表示各方位的高斯分布标准差。将原始图像同多方位滤波算子进行卷积运算得到滤波后图像 $I(x,y)$ 可表示为:

$$I(x,y) = f(x,y) * L_{ML}(i) \quad (5)$$

式中,“ $*$ ”表示卷积运算。(4)式与(5)式表明,多方位滤波算子能够对原图像各点与其八邻域点所构成的射线方向对图像进行滤波。滤波效果与序列长度 M_j ($j=1,2,\dots,8$) 和 σ_l 有关。 σ_l 越大,对噪声的滤波效果越好,但会丢失越多的边缘信息; σ_l 越小,对目标的检测效果越好,但对噪声的平滑能力就越弱。序列长度越长,滤波效果越好,但各方位的 1 维滤波算子是关于变量平方的 e 负指数函数,当变量的绝对值很大时,算子函数值接近于 0,因此序列长度过长没有意义,反而会影响运算速度。设置不同方向的 σ_l 值与序列长度可以针对包含不同目标类型的图像进行滤波。由于实际工程中,光斑所成形状不是严格的圆形,因此通过设置不同的 σ_l 值能够适合对相应形状光斑的处理。

在阈值分割算法方面,为保证系统实时性,设计中采用控制计算机动态设定全局阈值;为解决光斑破碎的问题,在阈值分割后进行了二值化图像的形态学开

运算;最后通过 FPGA 进行连通域分析与目标提取的操作,确定图像中是否包含光斑目标,如果有则输出目标形心的坐标值。

3 实验结果及分析

搭建的实验平台如图 3 所示。

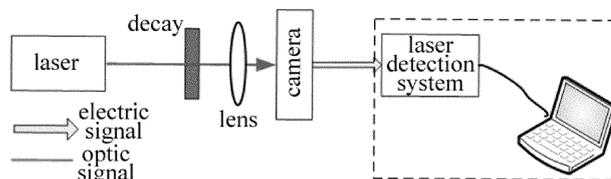


Fig. 3 Experiment platform

激光器波长为 850nm,测得衰减后的输出功率为 10.5nW,相机是输出接口为 Camera Link 的 MC-1302 型工业相机,调整分辨率为 300pixel × 300pixel,帧率 1000Hz,曝光时间 0.9ms,主控计算机选用 Amax 某小

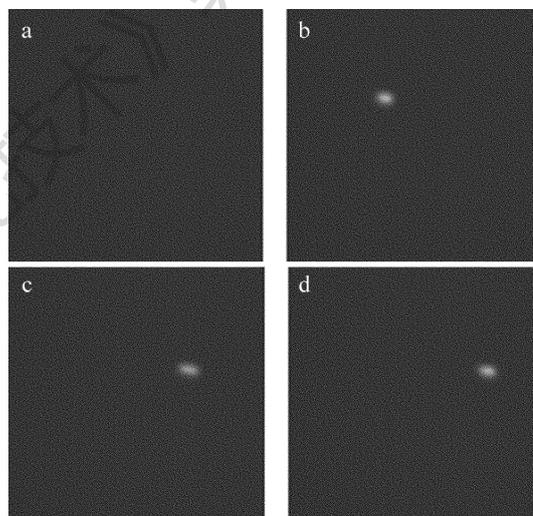


Fig. 4 Results of original images

a—frame 5 b—frame 1143 c—frame 2874 d—frame 3266

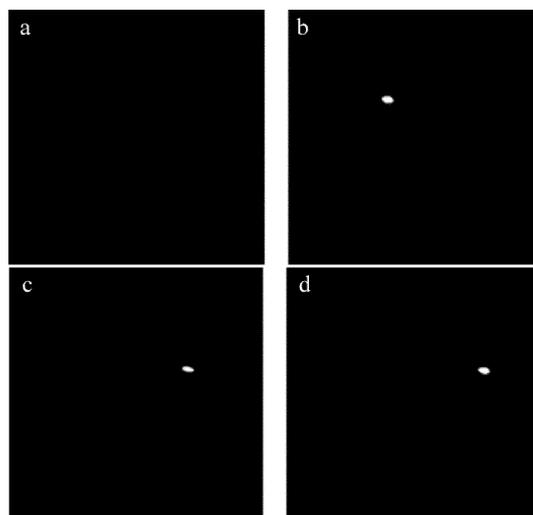


Fig. 5 Processing results

a—frame 5 b—frame 1143 c—frame 2874 d—frame 3266

型工作站。实验时,激光经衰减后照射在相机上,数字图像信号经 Camera Link 口传输至光斑检测系统中,检测系统将处理后得到的结果经 PCI-e 传输至主控计算机上,主控计算机能够显示并存储所得到的结果。图 4 是采集得到的原始图像,图 5 是处理后得到的图像。

实时输出的光斑中心形心位置与事后通过 MATLAB 对原图质心进行的比较结果如表 1 所示,其中当未发现激光光斑时,给出的目标坐标值为(0,0)。

Table 1 Comparison between centroid and gravity

frame	centroid (x,y)	gravity (x,y)
5	(0,0)	(0,0)
1143	(117.3, 105.5)	(117.18, 105.62)
2874	(213.1,102.6)	(212.89,102.77)
3266	(235.8,121.5)	(236.03,121.29)

通过 5000 帧图像实时形心计算结果与事后质心计算结果进行比较,将事后质心结果看作真值,则形心计算误差平均值为: x 方向 0.21pixel, y 方向 0.15pixel。

经测试检验,系统运行时,需占用 12% 的块随机存储器和 54% 的运算单元,系统硬件延时约 4 μ m,算法延时约 12 μ m,单幅图像处理时间为 0.03ms,小于 0.9ms 的单幅曝光时间。

4 结 论

设计了用于高帧频序列图像激光光斑目标提取的图像采集与处理系统,系统以现场可编程门阵列为核心器件,系统通过方位滤波器对图像进行预处理,采用连通域分析提取目标形心,实现了对高帧频图像中的激光光斑中心的检测。该系统应用于激光通信系统中,可为动态链路的建立与保持提供必要的实时参量

信息。

参 考 文 献

- [1] GREGORY M, HEINE F, KAMPFNER H, *et al.* Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. *Optical Engineering*,2012,53(3):031202.
- [2] SOVA R M, SLUZ J E, YOUNG D W, *et al.* 80Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal[J]. *SPIE*, 2006,6304:630414.
- [3] HU Z,JIANG H L,TONG S F, *et al.* Research on ATP system technology of laser communication terminal in space[J]. *Acta Armamentarii*,2011,32(6):752-757(in Chinese).
- [4] LI X. Optimization research on link and communication performance for intersatellite laser communications[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2013:1-6(in Chinese).
- [5] ZHANG H Zh, YAO M, LI P, *et al.* Research of image processing method of far-field laser spots[J]. *Laser Technology*,2013,37(4):460-463(in Chinese).
- [6] LIU H L, HOU W, FAN Y L, *et al.* An improved algorithm of laser spot center location[J]. *Computer Measurement & Control*,2014,22(1):139-141(in Chinese).
- [7] SUN J P,JIANG J. PURE-LET-based fast denoising algorithm for laser spot imagery[J]. *Journal of China Coal Society*,2013,9(9):1710-1714(in Chinese).
- [8] SHAO W B. Research on the optimization design for the facular image processing algorithm in satellite optical communications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2013:22-36(in Chinese).
- [9] LU N,KE X Z,ZHANG H. Research on APT coarse tracking in free-space laser communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2010,39(5):943-949(in Chinese).
- [10] CHENG Y. Research on laser spot tracking syssem for space laser communication[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology,2012:12-37(in Chinese).
- [11] XU W Y, BAI T Z, LIU Y, *et al.* Real-time laser facula detection based on top-three-neighborhood-region continuous-pixels numbering [J]. *Acta Optica Sinica*,2013,33(12):138-143(in Chinese).