

# 捕获、跟踪、瞄准系统滤波算法对光斑位置检测精度的影响

李一芒 盛磊 高世杰

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** 针对激光通信捕获、跟踪、瞄准系统对光斑位置检测精度的需求,提出了基于互补金属氧化物半导体探测器的光斑位置检测精度评价方法,并用此方法量化了常用的滤波算法对光斑位置检测精度的影响。利用高精度位移平台测试相机的随机误差和系统误差,分别采用中值滤波、均值滤波、高通滤波、形态学滤波对光斑图像进行处理,并计算滤波后光斑的质心位置,比较滤波前后光斑位置的检测精度,评价滤波算法对位置检测的影响。实验表明,滤波会降低光斑位置检测精度,进而根据实验结果提出了避免上述精度降低问题出现的方法。

**关键词** 光通信; 捕获跟踪瞄准; 位置检测精度; 滤波算法; 探测器

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.110602

## Influence of Filtering Algorithm for Spot Position Detection Accuracy of Acquisition, Tracking and Pointing System

Li Yimang Sheng Lei Gao Shijie

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

**Abstract** For laser communication acquisition, tracking and pointing system on the spot position detection accuracy demand, based on complementary metal oxide semiconductor detector, light spot position detection accuracy evaluation method, and using this method to quantify the commonly used filtering algorithm on the spot position detection accuracy effect are proposed. High precision displacement platform is used to test camera, random error and systematic error, then the median filtering, mean filtering, high pass filtering, morphology filtering processing of spot images are applied, and the filtered centroid positions are calculated. The light spot position detection accuracy before and after filtering is compared, and the influence of filtering algorithms on detecting position is evaluated. Experiments show that the accuracy of the spot detection can be reduced and the method of avoiding the deterioration of accuracy of the problems mentioned above is proposed according to the experimental results.

**Key words** optical communications; acquisition, tracking and pointing; position detection accuracy; filtering algorithm; detectors

**OCIS codes** 060.2605; 120.1880; 040.5160

## 1 引言

美国航空航天局(NASA)2014年公布了其“激光通信科学光学载荷”实验结果,仅用时3.5 s将时长37 s的高清视频成功从国际空间站传回地面<sup>[1]</sup>,NASA专家介绍,完成此实验的跟踪瞄准难度相当于9 km外用肉眼观察头发丝,由此可见捕获、跟踪、瞄准(ATP)技术在激光通信系统中的重要性和困难性。目前的激光通信ATP系统在探测信标光时,一般采用三类器件:电荷耦合器件(CCD)、四象限雪崩管探测器(QAPD)和互补金属氧化物半导体探测器(CMOS)<sup>[2]</sup>。CMOS探测器集成化程度高,功耗小,易于实现大规模面阵,其灵活的开窗功能还可进一步提高帧频,且易于修改光斑跟踪中心。这些优势使得CMOS探测器易于满足远距

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-06-25; 网络出版日期: 2015-10-14

基金项目: 国家863计划(2014AA7031010B)

作者简介: 李一芒(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事光通信设备图像处理方面的研究。

E-mail: liyimangkjd@126.com

离激光通信 ATP 系统中粗跟踪探测相机大视场的需求,也易于实现精跟踪探测相机的高帧频<sup>[3]</sup>。

基于 CMOS 探测的激光光斑目标亚像素提取精度直接关系到激光通信 ATP 系统的跟瞄精度。目前对 CMOS 探测器的光斑亚像素提取精度已有很多研究:中国科学院上海技术物理研究所钱峰等<sup>[4]</sup>分析了探测器噪声和像元占空比有限对目标提取精度的影响;国防科学技术大学陈运锦等<sup>[5]</sup>基于高精度电动位移台分析了光斑质心定位误差;长春理工大学刘智等<sup>[6]</sup>基于快速反射镜进行了 CMOS 探测相机的亚像元细分精度实验。在激光通信系统实际工程应用中,ATP 系统并不是直接通过重心算法提取目标中心位置,而是在重心计算前进行中值滤波等图像预处理操作以消除或减弱噪声,提高信噪比,上述文献中缺少对图像预处理算法在影响精度方面的分析。

本文依据已有理论与方案设计了基于高精度位移平台的亚像素提取精度检测实验,在实验中加入中值滤波、高通滤波和形态学滤波等工程中常用的图像预处理算法,分析了滤波算法对光斑位置检测精度的影响。根据实验结果,在一些情况下,使用滤波器会降低光斑位置检测精度而不使用滤波器则会引入噪声干扰,本文提出了 ATP 系统在进行图像预处理时避免上述情况出现的方法。

## 2 基于图像预处理的光斑质心计算

ATP 系统对激光光斑目标的位置信息提取,一般通过目标检测的方式实现。目标检测算法按系统特点可分为单帧图像检测和序列图像检测。序列图像检测算法同单帧图像检测算法相比,前者检测效果一般优于后者,但序列图像检测需要处理多帧图像才能输出一次目标信息,因此序列图像检测算法的位置信息提取频率较低,不能满足 ATP 系统在精跟踪工作模式下的实时性要求。单帧检测的一般步骤是先进行预处理,然后进行阈值分割,最后计算目标的质心位置,工作过程如图 1 所示。

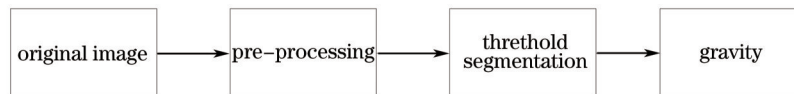


图 1 光斑目标位置提取步骤

Fig.1 Extraction procedure of spot target position

激光通信 ATP 系统在处理光斑图像时,常用的预处理算法有中值滤波、高通滤波和形态学滤波。近年来有关小波和剪切波的滤波算法研究越来越丰富,基于小波或剪切波的预处理算法在处理效果方面一般优于中值滤波等经典算法,尤其小波与剪切波的多尺度几何分析能够对不同情况的目标有较好的滤波效果,但计算过程比较复杂,高频率条件下很难保证实时性<sup>[7-12]</sup>。中值滤波是图像预处理中使用较为广泛的一种去噪算法,结构简单,易于实现,对于斑点噪声和椒盐噪声效果明显。为表述方便,以图像中任意一点为坐标原点,行方向自左至右建立  $x$  轴,列方向自下至上建立  $y$  轴,则原始图像可以表示为  $f(x,y)$ ,则中值滤波后的图像可表示为

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

式中  $\text{median}$  是取集合中所有元素的中值,  $g_m(x,y)$  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。除中值滤波外,高通滤波也常用于图像预处理中,尤其是去掉低频噪声的干扰。激光光斑图像本质上是一类二维数字信号,且目标区域的信号频率高于背景频率,因此高通滤波器能够起到目标增强的作用。巴特沃斯高通滤波器是信号处理中最典型的一类高通滤波器,其传递函数  $H(u,v)$  表示为

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [F_0/F(u,v)]^{2n}}, \quad (2)$$

式中  $F_0$  为截止频率,  $n$  为级数。滤波过程为:首先对数字图像进行二维傅里叶变换,得到其频域表达式;然后按选取的参数将频域表达式与高通滤波传递函数进行卷积运算;最后对所得卷积结果进行二维逆傅里叶变换,得到处理后的各点灰度值。

数学形态学在图像预处理中应用的原理是利用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状。Top-hat 算子是基于数学形态学运算的一种滤波算子,定义为

$$g_{\text{TH}}(x,y) = f(x,y) - [f(x,y) \circ b], \quad (3)$$

式中“ $\circ$ ”表示形态学开运算,即先腐蚀后膨胀,  $b$  是形态学操作中的结构元素。

对于图像  $f(x,y)$ , 其质心计算公式为

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

$(g_x, g_y)$  分别表示目标质心坐标, 单位是 pixel,  $\omega_g$  是权重, 计算方式为

$$\omega_g = \begin{cases} f(x,y) - T, f(x,y) \geq T \\ 0, f(x,y) < T \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $T$  是图像分割时所取的阈值。

当图像经预处理操作后, (5)式中  $\omega_g$  会发生变化, 进而导致  $(g_x, g_y)$  发生变化。由于在常用的滤波算法中, 许多算法采用非线性运算, 其滤波结果与原图像的分布特点有关, 因此滤波算法对质心计算的影响难以用公式的形式统一地表示出来, 需要通过实验比较是否采用滤波算法所得质心计算结果。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验平台

实验平台主要由激光器, 微位移平台, 平行光管, 镜头, 相机和实时图像处理系统组成, 如图 2 所示。

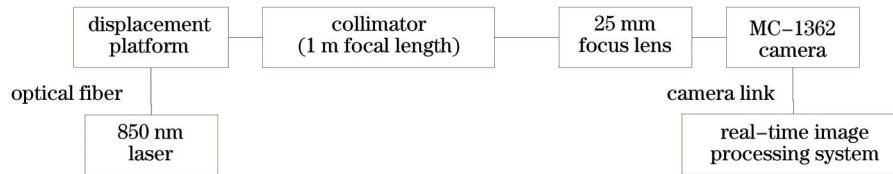


图 2 实验平台框图

Fig.2 Diagram of experiment platform

实验过程中, 波长为 850 nm 的激光器通过光纤与固定在微位移平台的反射端口相连, 出射的 850 nm 激光经光管准直后传输至焦距为 25 mm 的接收镜头处, 25 mm 镜头连接着 MC-1362 型高速 CMOS 相机, 相机将采集到的图像信号传输至实时图像处理系统中, 系统对图像进行处理并提取目标位置信息, 并将结果输出。微位移平台每次水平移动 100  $\mu\text{m}$  并记录时长为 5 s 共 5000 帧图像, 移动总距离为 2000  $\mu\text{m}$ 。在设计实时图像处理系统方面, 应满足像素分辨率为 300 pixel $\times$ 300 pixel, 工作频率为 1000 Hz 的实时性要求。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 Studio 2008 软件编写的图像处理软件对包含光斑的分辨率为 300 pixel $\times$ 300 pixel 的图像进行目标提取, 每幅图像耗时 0.707 s, 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。基于 FPGA+DSP 的方案是目前实时图像处理领域的常用架构, 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 300 pixel $\times$ 300 pixel 的图像进行目标提取, 每幅耗时约 0.032 s。上述方案均不能满足对 1000 Hz 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, 同时降低系统成本, 提出了基于 2 片 Xilinx 公司 Spartan 3FPGA 的硬件平台设计方案, 该方案不但能够保证目标位置信息提取的实时性, 同时与采用 K7, V6 等 FPGA 芯片相比, 能够降低设计成本和系统复杂度, 系统设计框图如图 3 所示。

实时处理系统主要由 2 片 Spartan 3FPGA 配以外围电路组成, 平台通过 PCI-e 插槽能够与计算机连接并进行数据交互。FPGA 的功能划分如下: FPGA 1 中设计了数字图像接收单元和 PCI-e 通信控制单元, 即实现了 camera link 协议和 PCI-e 协议的片上驱动功能; FPGA2 中设计了图像处理单元和信息合成单元, 目

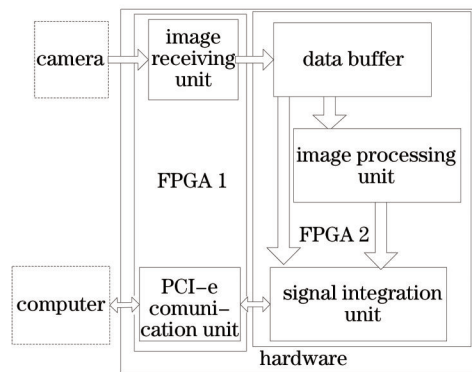


图3 硬件系统设计框图

Fig.3 Diagram of designed hardware system

标处理单元主要进行图像的滤波、阈值分割、连通域分析和多位置信息的提取,信号合成单元则将所提取信息与原始图像叠加,并送至PCI-e通信控制单元中。上述设计实现了数据交互与数据处理的相对独立,降低了硬件描述语言进行程序设计的复杂度。

### 3.2 实验结果与分析

实验首先比较了在不移动微位移平台的条件下,是否采用滤波算法所得到的随机误差,即在平台移动前连续采集5000帧图像并通过经典贝塞尔公式计算目标质心的标准差。采集所得图像如图4。

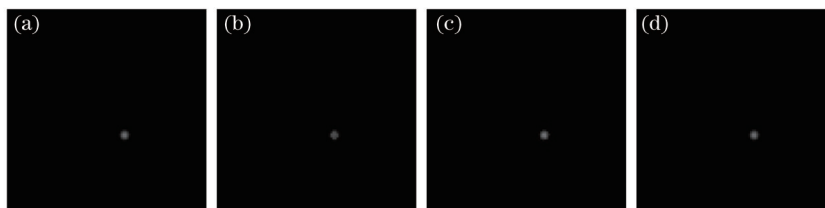


图4 不同算法处理后的图像采集结果

Fig.4 Image based on different processing algorithm

所得随机误差如表1所示,单位是pixel。

表1 随机误差结果比较

Table 1 Comparison of random error

Algorithm	Error of $x$	Error of $y$	Total error
Original	0.0073	0.0062	0.0096
Median	0.0152	0.0134	0.0202
High-pass	0.0118	0.0097	0.0153
Morphology	0.0145	0.0126	0.0192

从表中可以看出,虽然误差值不大,均小于0.03 pixel,但采用滤波算法所得到的随机误差要明显大于原始图像的随机误差。重复上述实验,原图随机误差始终小于0.01 pixel,而采用滤波算法的随机误差则在0.02 pixel左右,说明在实验环境下,采用滤波算法会增大目标质心提取的随机误差。

测量系统误差的方法为:微位移平台每次水平移动100  $\mu\text{m}$ 并记录时长为5 s共5000帧的图像,依次移动20次,根据移动前后的真实质心坐标值之差相等的特征,可以计算系统误差。为保证上述计算系统误差方法的正确性,测试了微位移平台等量移动的重复性,在正向移动20次后反向移动20次,如此反复5遍,能够在每个位置得到10个质心数据,其随机误差和偏差峰值如表2所示,单位是pixel。

从表2中可以看出,平台进行移动时,因偶然性所带来的误差小于0.01 pixel。分别计算原图像和采用中值滤波、高通滤波和形态学滤波后的系统误差结果如图5所示。



表2 重复性测试结果

Table 2 Repeatability test results

Position / $\mu\text{m}$	Mean error	Peak error	Position / $\mu\text{m}$	Mean error	Peak error	Position / $\mu\text{m}$	Mean error	Peak error
0	0.0019	0.0073	700	0.0016	0.0055	1400	0.0013	0.0047
100	0.0012	0.0038	800	0.0016	0.0058	1500	0.0015	0.0048
200	0.0015	0.0053	900	0.0017	0.0067	1600	0.0017	0.0062
300	0.0017	0.0066	1000	0.0019	0.0071	1700	0.0012	0.0040
400	0.0015	0.0050	1100	0.0015	0.0049	1800	0.0019	0.0075
500	0.0014	0.0049	1200	0.0014	0.0045	1900	0.0015	0.0057
600	0.0013	0.0045	1300	0.0016	0.0056	2000	0.0017	0.0069

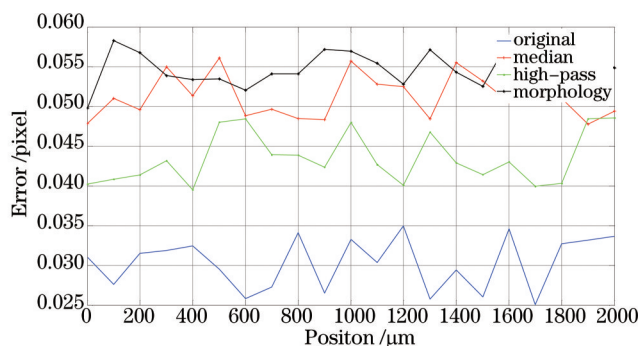


图5 等量位移后的系统误差

Fig.5 Systematic error after isometric displacement

从图5中可以看出,当采用滤波算法后,系统误差变大,由平均0.03 pixel增大为平均0.05 pixel。综合表1和图5的结果可以得出,在实验环境下,采用滤波算法计算所得的质心误差要大于直接计算质心的误差。综合(1)~(5)式和实验结果,说明滤波算法会使图像中的像素点产生变化,而这一变化并不是关于原图像质心对称的,因此当对图像滤波后,所得质心计算结果的误差会增大。然而在ATP系统实际应用中,一般需要采用滤波算法去除图像中的噪声,为尽量减小甚至避免滤波算法对质心提取精度的影响,可以使用局部图像滤波方法,即通过连通域分析或特征匹配等算法判断像素点属性,如果属于目标,则不进行滤波处理,如果属于背景或孤立的噪声点,则进行滤波处理。

## 4 结 论

针对激光通信ATP系统探测相机定位精度的问题,在国内已有分析方法和实验结果的基础上,提出了经典滤波算法对光斑位置检测精度影响的实验室量化方法,由于在实际工程中,ATP系统均会采用滤波算法对图像进行预处理,因此分析其对光斑检测精度的影响有着重要的意义。结果表明,在实验室环境下,使用滤波算法后计算得到的目标质心的随机误差和系统误差均大于基于原图的计算结果,误差增大了0.02 pixel,较原始计算结果相比,误差增大了约50%。在实际应用中,需要改变ATP系统的图像去噪和预处理策略,减少甚至避免对质心提取精度的影响。

## 参 考 文 献

- Zhu Guiwei. Optical payload for lasercomm science (OPALS) demonstration experiment carried out[J]. Space International, 2005, 1: 58-62.  
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.
- Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 670-680.  
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.
- Li Xin. Optimization Research on Link and Communication Performance for Intersatellite Laser Communications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.  
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: 哈尔滨工业大学, 2013.

- 4 Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.*. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205007.  
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 Chen Yunjin, Feng Ying, Wei Li'an, *et al.*. Experiment research on subpixel location error of the facula centroid[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(2): 80-84.  
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, 37(2): 80-84.
- 6 Liu Zhi, Zhai Linpei, Hao Zhihang. Sub-pixel measurement accuracy experiment of complementary metal oxide semiconductor imager[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 118-124.  
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, 34(1): 118-124.
- 7 Zhou Jie. The Modified Algorithms of Median Filtering Applied in Image Processing[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007.  
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.
- 8 Sun Cuijuan, Yang Weiping, Shen Zhenkang, *et al.*. IR background suppression based on spatial matched filtering[J]. Infrared Technology, 2003, 25(1): 36-39.  
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, 25(1): 36-39.
- 9 Dong Hongyan, Li Jicheng, Shen Zhenkang. Small target detection based on high-pass filtering and order filtering[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(5): 596-598.  
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, 26(5): 596-598.
- 10 Li Qiuhua, Wang Housheng, Zou Zili. Detection of dual band IR small target fusion detection based on wavelet transformation and grayscale morphology filtering[J]. Signal Processing, 2006, 22(3): 312-316.  
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, 22(3): 312-316.
- 11 Qin Hanlin, Li Jia, Zhou Huixin, *et al.*. Infrared dim and small target background suppression using shearlet transform [J]. J Infrared Millim Waves, 2011, 30(2): 162-166.  
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抑制[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 162-166.
- 12 Guan Bin. Improved self-adaptable anisotropic Laplacian of Gaussian operator[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(12): 2292-3007.  
关 斌. 一种改进的自适应各向异性 LOG 算子[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(12): 2292-3007.

栏目编辑: 刘丰瑞