

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2412559

面向光轴指向测量系统的光斑质心 高精度实时解算方法*

马浚轩^{1,2}, 李红^{1,2}, 张旭^{1,2}, 朱云鸿^{1,2}, 祝连庆^{1,2,3}

(1. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016; 3. 广州南沙光子感知技术研究院 广州 511462)

摘要:针对遥感卫星相机光轴指向测量系统的CMOS图像传感器易受空间环境影响,导致图像缺陷,进而影响光斑质心解算精度的问题,本文提出了一种高精度的光斑质心实时解算方法。仿真分析结果表明该方法能够准确地追踪图像中光斑位置的变化,从而验证了其分步解算策略的可行性。分别采用分步法、OTSU质心法和高斯拟合法对测量系统所采集的图像进行光斑质心的实时解算。实验结果显示,分步法的实时性好,光斑识别成功率最高,质心解算平均偏差和标准差最小,分别为0.026和0.029 pixels。该方法可以为光轴指向测量系统提供可靠的数据支撑。

关键词: 夹角测量系统;模板匹配;实时处理;FPGA

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

High-precision real-time algorithm for spot centroid determination in optical axis pointing measurement system

Ma Junxuan^{1,2}, Li Hong^{1,2}, Zhang Xu^{1,2}, Zhu Yunhong^{1,2}, Zhu Lianqing^{1,2,3}

(1. Key laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 3. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, China)

Abstract: The images produced by the CMOS sensor of the high-orbit satellite's optical axis pointing measurement system are prone to degradation due to the harsh space environment. This degradation adversely affects the quality of the images and compromises the accuracy of the spot centroid results. To combat this issue, this study proposes a method for high-precision, real-time determination of spot centroid. Simulation analysis results show that this method can accurately track changes in the spot position within images, validating the feasibility of its step-by-step calculation strategy. The study employed the progressive method, OTSU centroid method, and the Gaussian fitting method for the real-time computation of spot centroids from images acquired by the measurement system. The experimental results show that the progressive method has good real-time performance, the highest success rate of spot location, and the smallest average deviation and standard deviation of centroid calculation, being 0.026 and 0.029 pixels, respectively. This approach provides reliable data support for optical axis pointing measurement systems.

Keywords: included angle measuring system; template matching; real-time processing; FPGA

0 引言

随着遥感技术的快速发展,对卫星光学载荷的指向

精度和稳定性要求越来越严格^[1-3]。然而,遥感卫星受到机械振动^[4]、空间热辐射^[5]和金属疲劳^[6]等,都可能造成其关键结构发生微小形变^[7],导致相机光轴指向发生偏移,进而降低遥感成像质量和定位精度。对于高轨遥感

卫星,其指向误差控制在角秒级,对地面目标的成像定位偏差仍可能达到约 200 m^[8]。

通过在卫星相机和姿态传感器所在结构上部署 3 组夹角测量仪与反射镜,构建闭环的光轴指向测量系统。使用夹角测量仪解算得到 3 组平面坐标数据,并对其进行空间角度的反演计算,实现对光轴指向变化的实时监测。然而,卫星在轨运行期间,图像传感器受恶劣空间环境影响导致图像出现各种类型的缺陷,降低光斑质心解算的精度^[9]。因此,设计一种精度高、抗干扰能力强的光斑质心解算方法是保证遥感卫星相机光轴指向高精度实时监测的重要前提。

在不同研究领域中,对算法的效率、精度和抗干扰能力有着不同的要求。现有研究中基于空间环境下的光斑质心解算方法众多,在光通信研究^[10]领域中,要求实现对光斑持续稳定的跟踪;针对激光测高仪^[11]应用,要求算法对地面反射特性差异和光斑形态变化引起噪声的较强抑制能力;在星敏感器星图^[12]识别研究中,要求实现光斑质心的高精度实时解算。

常用的光斑质心解算方法有质心法^[13-14]、高斯拟合法^[15]和椭圆拟合法^[16-18]。质心法因为其简单、快速等优点,可以实现 FPGA 上部署,但是该方法抗噪能力较差;高斯拟合法相对复杂,对于符合高斯分布的光斑的质心解算精度高^[19],但是计算资源的消耗较大;椭圆拟合法可以准确解算受干扰导致变形的光斑质心,但是其资源占用更多,且计算时间更长。因此,在涉及下位机场景的应用中,通常选择质心法与其他相关算相结合的模式。吴浩等^[20]在质心法的基础上加入了模板匹配,增强了算法对背景干扰的能力;Xi 等^[21]研究了窗口大小对算法精度的影响;Zhou 等^[22]提出了一种在 FPGA 上实现基于固定窗口定位的快速星心提取方法。

针对夹角测量仪采集图像特点,本文提出了一种基于互相关模板匹配法定位、质心法计算的光斑质心解算方法。该方法优化了模板匹配的参数,并通过补偿模型对质心解算的结果进行了修正,在保证精度的同时,具备较好的实时性,适合在资源有限的下位机中部署。有效地实现了光斑质心的高精度实时定位,为测量光轴指向的动态变化提供了可靠的数据支撑。

1 光轴指向测量系统的光斑质心提取原理

1.1 光轴指向测量系统原理

光轴指向测量系统由 3 组夹角测量仪和反射镜形成闭环结构来实现对卫星相机光轴指向变化的测量,其测量原理如图 1 所示。夹角测量仪是基于光学自准直技术原理设计的光学仪器,通过解算反射光斑在图像传感器上的位移,实现被测轴向上角度变化的测量。系统通过

对 3 组夹角测量仪角度变化数据进行融合处理,解算得到空间中指向的变化,从而实现对遥感卫星光轴指向的持续监控与精准测量。

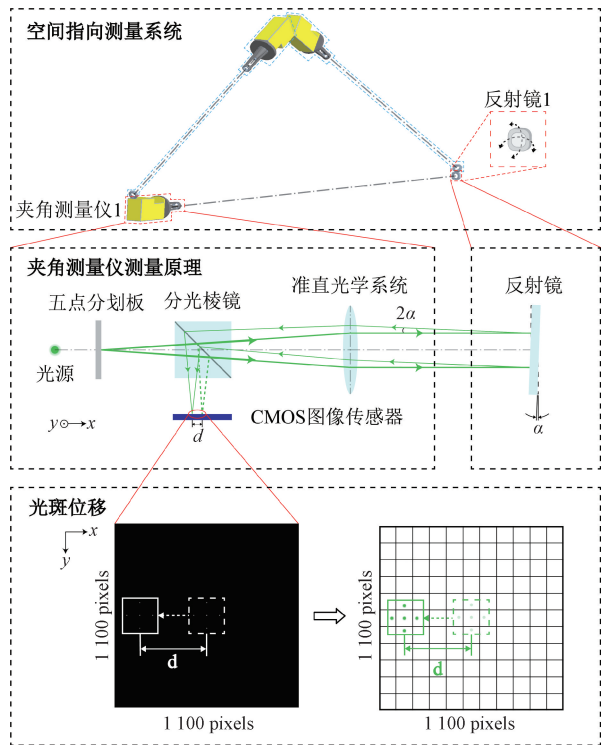


图1 光轴指向测量系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of optical axis pointing measurement system

1.2 夹角测量仪光斑质心解算方法

通过对夹角测量仪采集到的图像进行预处理、光斑定位和质心计算的分步处理方法,完成对光斑在图像上位移的解算,从而实现对角度变化的间接测量。在图像中,目标光斑可以被认为符合二维高斯函数的分布,其有效像素通常分布在 11×11 pixels 的区域中。其中,灰度值较高的像素集中在中心 5×5 pixels 区域内,分步法使用该区域内的数据进行光斑质心解算。

图像预处理包含对图像数据进行零扩展并对其上离散噪声进行中值滤波实现平滑处理,提升图像质量,从而为后续光斑定位提供更为准确的数据基础。

光斑定位通过使用改进互相关模板匹配方法来实现,图像上第 i 行第 j 列像素的相关系数 $R(i, j)$ 为:

$$R(i, j) = \sum_{k, l} I(i+k, j+l) T(k, l) \quad (1)$$

式中: I 为待匹配区域; T 为目标光斑模板。

在使用传统的互相关方法时,原图的亮度会影响模板匹配的效果。因此本文在互相关方法的基础上,把得到的相关系数除以窗口内的像素和,从而得到改进后的相关系数。该系数受背景亮度变化影响相对较小,可以

有效的区分背景与目标区域。

使用灰度加权质心法对光斑定位和相关滤波后得到的 5×5 pixels 数据进行处理, 光斑质心坐标为:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M i \cdot I(i, j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)}, y_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M j \cdot I(i, j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)} \quad (2)$$

式中: (x_0, y_0) 是光斑的质心坐标; $I(i, j)$ 是图像上像素坐标为 (i, j) 的灰度值。

分步法通过使用光斑中心局部区域像素的灰度值进行灰度加权质心计算, 因此得到的结果相较于基于光斑

全部像素的质心计算结果会存在一定偏差。通过补偿模型对结果进行修正, 以提高质心解算精度。

2 算法设计与 FPGA 实现

2.1 含噪声的光斑图像分析

夹角测量仪采集到的正常和含有各种缺陷的光斑图像如图 2 所示。正常情况下, 目标光斑处像素灰度值特征显著, 可以通过阈值划分等方法实现光斑定位, 配合质心算法可以实现光斑位移的测量。

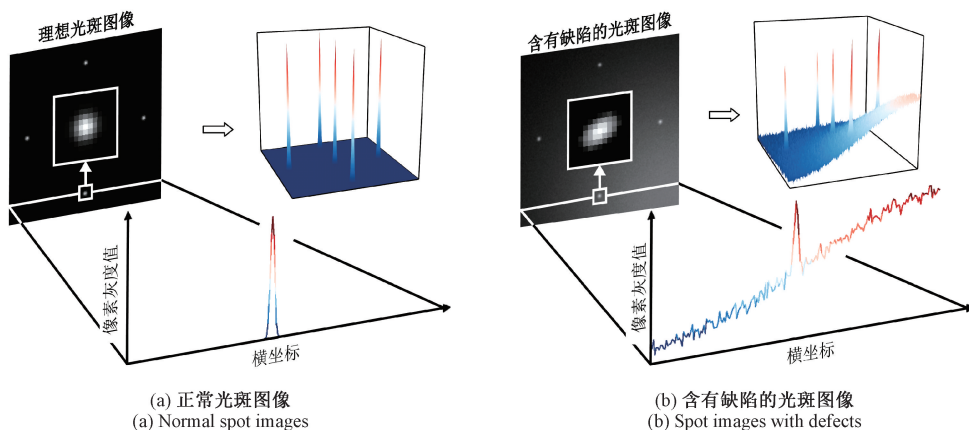


图 2 正常和含有缺陷的光斑图像分析

Fig. 2 Analysis of normal and defective spot images

但是, 当系统受到空间辐射、环境杂散光和传感器电噪声等影响时, 会造成光斑图像像素灰度值出现波动, 导致图像出现各种类型的缺陷, 进而降低光斑识别的成功率和质心解算的准确度。本文研究了图像中含有高斯噪声、光斑形态变化和传感器亮度不均匀缺陷时对光斑质心解算精度的影响。

高斯噪声可能导致算法选取目标光斑区域时, 丢失有效像素或引入无效像素, 导致结果出现偏差; 光斑形态变化, 可能导致质心解算精度降低以及质心偏移; 传感器亮度不均匀会使光斑的对比度降低, 影响光斑定位的成功率, 同时导致质心计算结果受亮度权重的变化而产生偏移。

2.2 算法设计

通过对光斑图像进行分析, 设计了一种分步求解光斑质心的方法, 算法步骤与具体细节如下:

1) 读取输入的图像数据流, 同时对图像边界进行 4 pixels 的零扩展, 缓存 4 行数据后, 与后续输入组成第 1 个 5×5 pixels 的滑动窗口。通过预处理消除原始图像上孤立的噪声, 平滑目标光斑附近的强噪声;

2) 缓存预处理后的 4 行数据, 与后续输入组成第 2

个 5×5 pixels 的滑动窗口, 计算窗口中心像素的相关系数, 并存储目标区域内相关系数最大的中心点坐标和以其为中心点的 5×15 pixels 的窗口像素数据;

3) 通过 1×11 pixels 滤波模板对 5×15 pixels 的窗口数据进行相关滤波, 使用得到 5×5 pixels 的数据计算其灰度加权质心坐标;

4) 应用参数修正模型对质心结果进行补偿。

分步法通过先定位光斑, 再解算质心的方式, 有效减少了各类图像缺陷对质心定位造成的干扰。此外, 优化了图像处理流程, 减少了计算量, 加快了处理速度。这种改进使得分步法更适合在下位机中部署。其处理流程如图 3 所示。

通过向模拟正常情况下的光斑图像中注入高斯噪声、加入高斯基底以及模拟光斑形态变化生成了仿真图像。其中, 高斯基底是根据二维高斯函数生成的, 函数式为:

$$I(x, y) = A \exp \left\{ - \left[\frac{(x - x_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y - y_1)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\} \quad (3)$$

式中: $I(x, y)$ 光斑的灰度值; A 为光斑灰度峰值; σ_1 和 σ_2 为两个方向上的标准差; (x_1, y_1) 为高斯基底的中心位置。

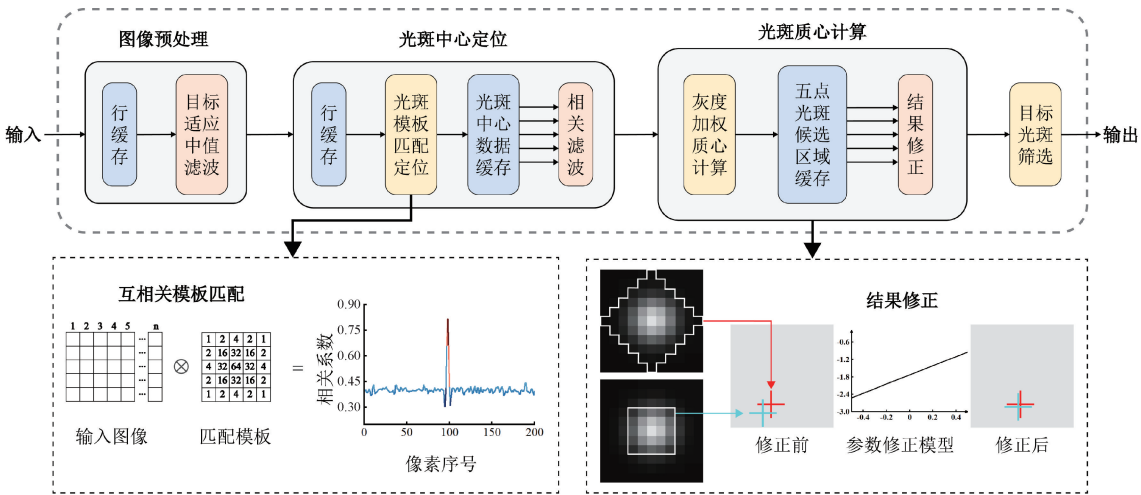


图 3 光斑质心解算方法流程

Fig. 3 Flowchart of spot centroid method

分别使用分步法、基于 OTSU 阈值分割的质心法以及基于边缘检测的高斯拟合法来进行图像光斑质心解算。

在处理不含缺陷的光斑图像时,3 种方法均可以准确的解算光斑质心,精度大于 0.01 pixels。

3 种方法对仿真图像加入不同图像缺陷后解算得到光斑质心均方根误差的对比如图 4 所示。其中,加入的高斯噪声均值为 2 000;高斯基底加在光斑所在的位置上,其标准差在 50~100;模拟光斑变形是将圆形光斑置换为离心率为 0.6 的椭圆形光斑。

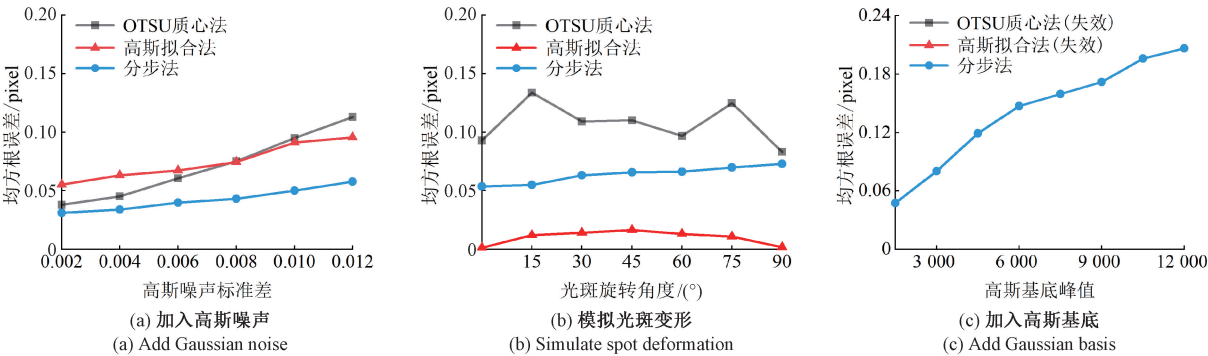


图 4 3 种光斑质心解算方法对含有不同缺陷图像的处理结果

Fig. 4 Results of three spot centroid methods for images containing different defects

从仿真结果可以看出,分步法在面对高斯噪声时效果最好;当面对光斑出现较大程度的变形时,由于分步法只使用了中心 5×5 pixels 的光斑局部像素数据,因此解算精度相比于高斯拟合法较差,但仍优于 OTSU 质心法;在目标光斑处加入高斯基底模拟传感器亮度不均匀时,OTSU 质心法和高斯拟合法由于阈值划分不合理,解算后与实际位置偏差过大,导致解算失败。而分步法可以有效抑制上述图像缺陷的干扰,实现质心的高精度解算,提高夹角测量仪测量的准确性。

2.3 算法的 FPGA 实现

对光学成像系统和夹角测量仪实际采集图像进行分

析,生成用于仿真测试的光斑图像。分步法程序通过 Xilinx 推出的 Vivado 2017.4 软件进行设计、编译、仿真和测试,分步法光斑质心解算仿真实验结果如图 5 所示。在工作频率为 50 MHz 的情况下,一帧图像处理时间约为 24.8 ms。在进行 FPGA 程序设计时,质心解算过程中数据处理的精度为 1‰。

通过对仿真光斑图像注入随机噪声生成 100 张仿真图像,并分别在 PC 和 FPGA 上使用分步法对其进行光斑质心解算,光斑位移变化值如图 6 所示。经计算,分步法在 PC 和 FPGA 上光斑质心解算误差控制在 3‰以内,解算后得到的光斑质心坐标基本保持一致。

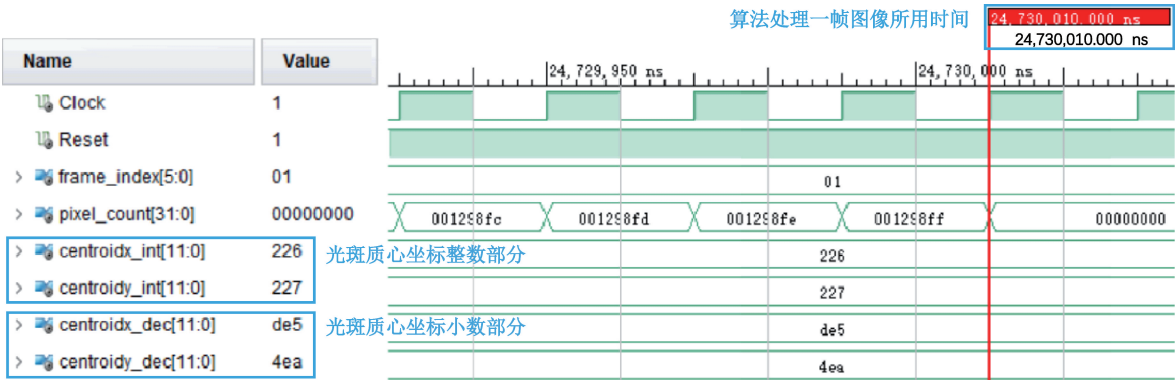


图 5 分步法光斑质心解算仿真

Fig. 5 Simulation of spot centroid calculation using the progressive method

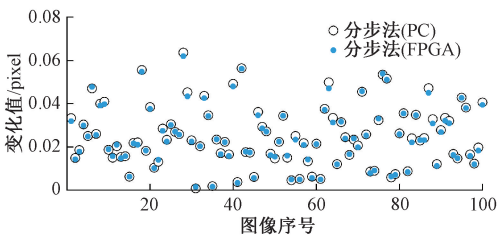


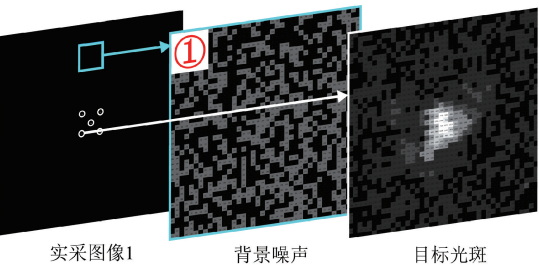
图 6 分步法在 PC 与 FPGA 上结果对比

Fig. 6 Comparison of results of progressive method on PC and FPGA

3 实验及结果分析

3.1 实验环境搭建

对夹角测量仪进行实验,将实验系统放置在气浮式光学平台上,并使用防风罩避免空气流动的影响。夹角测量仪中使用 GMAX2505 CMOS 图像传感器采集大小为 1 100×1 100 的光斑图像。实验在维持恒温恒湿的 1 000 级超净环境中进行,保持温度为 20.5℃,湿度为 34.0%。在保证实验系统受外界干扰影响最低时,使用 Camera Link 采集卡对夹角测量仪接收到的图像进行实时捕获。



(a) 实采光斑图像1分析
(a) Analysis of practically acquired speckle image 1

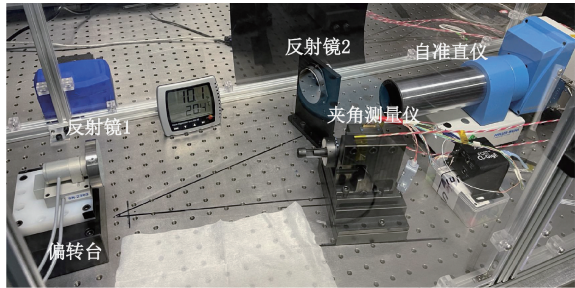
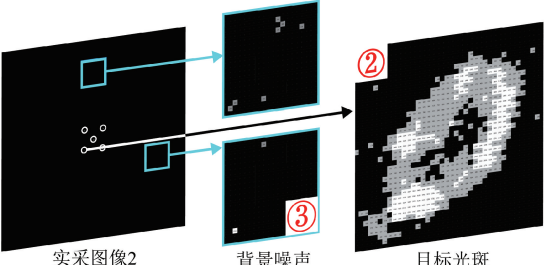


图 7 夹角测量仪实验图

Fig. 7 Experiment system of included angle measuring instrument

3.2 算法的 FPGA 部署

单次实验共持续 1 000 s,在实验过程中,每 10 s 采集一次光斑图像,共采集 101 张图像。在对系统进行地面测试期间,微小的环境变化也会对夹角测量仪采集图像产生显著影响,导致各种类型的图像缺陷。如图 8(a)中①所示为实验时出现漏光现象,导致背景出现杂散噪声;图 8(b)中背景相对均匀,噪声较少。但是目标光斑附近出现了如②所示受环境光等因素导致的光晕效果;



(b) 实采光斑图像2分析
(b) Analysis of practically acquired speckle image 2

图 8 夹角测量仪实采图像

Fig. 8 Measured image of included angle measuring instrument

同时,CMOS 图像传感器上出现坏点,会导致采集图像上出现如③所示的与目标光斑灰度值相近的噪点。

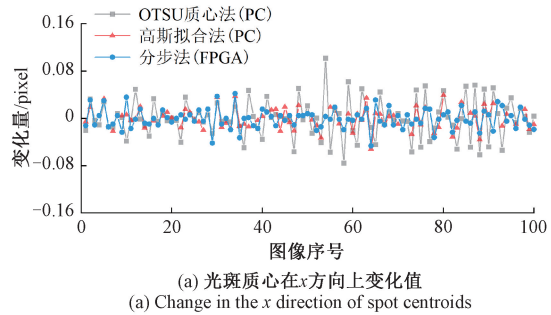
本文中针对光轴指向测量系统的夹角测量仪光斑质心解算方法在 Xilinx 公司的 XC7Z020-2CLG400I FPGA 上实现,并通过 Verilog 硬件描述语言将其部署至实验平台。分步法通过单次扫描方式来获取图像数据,按照从左到右、从上到下的顺序,依次读取分辨率为 $1\ 100\times 1\ 100$ pixels 的图像。该方法中分步处理机制通过在读取数据的同时,执行数据缓存和相应的处理操作,发挥了 FPGA 并行处理能力的优势。当一帧图像读取完成后,只需要几行数据缓存的延时后,系统就能够完成对图像数据的处理,在确保数据输入的连续性和系统解算的实时性的同时,提升了系统的工作效率。分步法在 FPGA 中资源占用情况如表 1 所示。

表 1 FPGA 资源汇总

Table 1 Occupied FPGA resources summary

Slice Logic	Used	Available	Utilization/%
LUTs	10 616	53 200	19. 95
FF	5 367	106 400	5. 04
IO	91	125	72. 80

系统具备高效连续处理图像数据的能力,且质心解算的精度达到小数点后 3 位,保证了结果的准确性



和可靠性。

3.3 不同算法的效果对比

分别使用分步法、OTSU 质心法以及高斯拟合法对实验采集的图像数据进行光斑质心解算,3 种方法的光斑定位成功率如表 2 所示。

表 2 光斑定位成功率

Table 2 Success rate of spot centroid determination

光斑质心解算方法	%	
	中心光斑	全部光斑
OTSU 质心法	100	100
高斯拟合法	73. 3	39. 6
分步法	100	100

在处理实验采集的 101 张图片中,使用高斯拟合法时光斑定位成功率最低,只能识别 73. 3% 的图像上中心光斑,和 39. 6% 的图像上全部 5 点光斑;分步法和 OTSU 质心法则可以识别本次实验中全部图像的 5 点光斑,说明两种方法都具有较好的稳定性。

根据各方法光斑质心解算的结果,计算出光斑质心坐标在 x,y 方向上的变化量、偏差平均值和偏差的标准差。3 种方法解算光斑质心在 x,y 方向上的变化值如图 9 所示;平均偏差和偏差的标准差如表 3 所示。

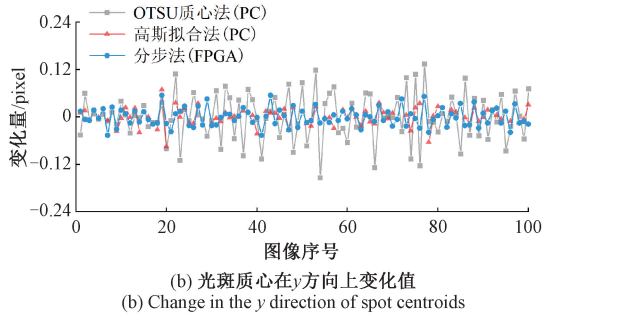


图 9 3 种方法解算后的光斑质心变化值

Fig. 9 Results of spot centroid variations solved by three methods

表 3 光斑质心平均偏差值和偏差的标准差

Table 3 Mean deviation value and deviation standard of spot centroid

光斑质心解算方法	平均偏差	标准差
pixel		
OTSU 质心法	0. 047	0. 052
高斯拟合法	0. 031	0. 034
分步法	0. 026	0. 029

从结果可以看出,对于实验采集的光斑图像,使用 OTSU 质心法解算光斑质心位移的平均偏差和标准差最

大,分别为 0. 047 和 0. 052 pixels;高斯拟合法的平均偏差和标准差次之,分别为 0. 031 和 0. 034 pixels;分步法的平均偏差和标准差最小,分别为 0. 026 和 0. 029 pixels。说明在上述 3 种方法中,分步法的准确性最高,整体偏差波动最小,处理效果优于 OTSU 质心法和高斯拟合法。

4 结 论

本文针对光轴指向测量系统受复杂空间环境影响导致解算精度下降的问题,提出了一种基于 FPGA 实现

的光斑质心解算方法。通过对图像进行预处理、光斑识别和质心计算等分步操作,实现了光斑质心的高精度实时解算。实验证明,与常用的 OTSU 质心法和高斯拟合法的解算结果相比,分步法解算质心的平均偏差最小,抗干扰能力最强,在工作频率为 50 MHz 的情况下,对于 $1\ 100 \times 1\ 100$ pixels 的图像处理时间为 24.8 ms,保证了角度变化测量的准确性和实时性,从而为测量系统在复杂空间环境下对光轴指向进行实时监测提供了技术保证。

参考文献

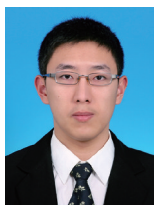
- [1] CHEN X D, ZHAN H Y, FAN SH Y, et al. High-accuracy real-time attitude determination and imagery positioning system for satellite-based remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, DOI:10.1109/TGRS.2023.3316151.
- [2] LI J S, LI D, LIU SH, et al. Fine guidance sensor attitude determination system of the high-accuracy satellite mission[C]. Advances in Precision Instruments and Optical Engineering: Proceedings of the International Conference on Precision Instruments and Optical Engineering, 2021. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 11-18.
- [3] WAHBALLAH W A, ELTOHAMY F, BAZAN T M. Influence of attitude parameters on image quality of very high-resolution satellite telescopes [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 57(2): 1177-1183.
- [4] LI L, YUAN L, WANG L, et al. Recent advances in precision measurement & pointing control of spacecraft [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(10): 191-209.
- [5] ZHANG H, ZHAO X M, MEI Q, et al. On-orbit thermal deformation prediction for a high-resolution satellite camera[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 117152-117160.
- [6] 孙广开, 李红, 吴越, 等. 遥感航天器在轨结构微变形光纤监测技术发展综述[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 1-14.
SUN G K, LI H, WU Y, et al. Development of optical fiber monitoring technology for micro deformation of remote sensing spacecraft on-orbit structure: A review[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 1-14.
- [7] 韩首榜, 董明利, 孙鹏, 等. 遥感卫星外壳摄影测量网络定向方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 200-207.
HAN SH B, DONG M L, SUN P, et al. Photogrammetric network orientation of remote sensing satellite outer surface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 200-207.
- [8] 李悦昕, 祝连庆, 张旭, 等. 高轨遥感卫星光轴指向误差夹角测量系统标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 160-166.
LI Y X, ZHU L Q, ZHANG X, et al. Research of calibration method for optical axis pointing error included angle measuring system on high orbit remote sensing satellite[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 160-166.
- [9] CUI Y H, FENG J, LI Y D, et al. Proton radiation effects of CMOS image sensors on different star map recognition algorithms for star sensors[J]. Electronics, 2023, 12(7): 1629-1643.
- [10] 刘天赐, 董科研, 张博, 等. 空间光通信光斑中心网格化 BP 神经网络定位方法[J/OL]. 中国激光, 1-14 [2024-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20231214.0022.042.html>.
LIU T C, DONG K Y, ZHANG B, et al. A grid based BP neural network localization method for space optical communication spot center[J/OL]. Chinese Journal of Lasers, 1-14 [2024-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20231214.0022.042.html>.
- [11] 袁小棋, 李国元, 唐新明, 等. 星载激光光斑影像质心自动提取方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 135-141.
YUAN X Q, LI G Y, TANG X M, et al. Centroid automatic extraction of spaceborne laser spot image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 135-141.
- [12] FAN Y M, XIAO H, CAO W W, et al. FPGA implementation of real-time star centroid extraction algorithm[C]. 2019 IEEE 2nd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). IEEE, 2019: 395-399.
- [13] LI X X, LI X Y, WANG C X. Optimum threshold selection method of centroid computation for Gaussian spot[C]. AOPC 2015: Image Processing and Analysis. APOC, 2015, 967517: 1-8.
- [14] DING J Q, DAI D K, TAN W F, et al. Implementation of star centroid extraction based on FPGA[C]. Thirteenth International Conference on Graphics and Image Processing (ICGIP 2021). SPIE, 2022, 120830Q: 1-7.

- [15] 王国军. 高斯拟合光斑定位算法推导及性能探讨[J]. 光学仪器, 2023, 45(1): 67-72.
WANG G J. Derivation and performance discussion of simulated spot location algorithm based on Gaussian fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 45(1): 67-72.
- [16] 吴建霖, 蒋理兴, 李晨阳, 等. 基于单目红外的远距离多测点振动测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 255-263.
WU J L, JIANG L X, LI CH Y, et al. Study on the remote multi-points vibration measurement method based on single infrared camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 255-263.
- [17] 李华, 孙永荣, 赵科东, 等. 锥套定位的高精度点圆特征提取算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 190-196.
LI H, SUN Y R, ZHAO K D, et al. High-precision point-circle feature extraction algorithm for refueling drogue positioning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 190-196.
- [18] HAN K L, PEI H D, HUANG ZH T, et al. Non-cooperative space target high-speed tracking measuring method based on FPGA [C]. 2022 7th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). IEEE, 2022: 222-231.
- [19] TJORVEN D, JORIS D S, BART V. An accurate and efficient gaussian fit centroiding algorithm for star trackers [J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 2014, 61(1): 60-84.
- [20] 吴浩, 张勇, 李欣, 等. 光电跟踪系统高精度模板匹配跟踪算法[J]. 红外技术, 2022, 44(12): 1301-1308.
WU H, ZHANG Y, LI X, et al. High-precision template matching tracking algorithm for optoelectronic tracking system[J]. Infrared Technology, 2022, 44(12): 1301-

1308.

- [21] XI J B, SONG Z X, GAO W. Sub-pixel location with phase transfer function for star tracker [C]. Eighth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation. SPIE, 2013, 87590U: 1-7.
- [22] ZHOU F Q, ZHAO J X, YE T, et al. Fast star centroid extraction algorithm with sub-pixel accuracy based on FPGA [J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2016, 12(3): 613-622.

作者简介



马浚轩, 2021 年于北京工业大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与光电器件。

E-mail: 15910595039@163.com

Ma Junxuan received his B.Sc. degree from Beijing University of Technology in 2021. He is currently a master student in the School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include optical fiber sensing and optoelectronic devices.



祝连庆(通信作者), 分别在 1982 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail: lqzhu_bistu@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1982 and 1989, and received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes fiber sensing technology, fiber laser and optoelectrical precision measurement technology.