

文章编号 1004-924X(2015)08-2393-07

大气激光通信光斑图像的快速复原与实时检测

高世杰^{1,2*}, 盛磊¹, 吴志勇¹, 朱立禄¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对大气湍流对激光通信中对信标光的捕获、跟踪与对准(ATP)的影响,提出了基于盲解卷积的快速复原与实时检测算法。采用一维点扩散函数重新构造方位退化模型,取代了原有经典二维退化模型;改进了约束共轭梯度算法中的约束算子,并通过改进的共轭梯度迭代算法求得对原始图像的估计;最后通过连通域计算提取估计结果中的光斑中心位置。采用现场可编程门阵列和数字信号处理器实现所提出的共轭梯度算法并提取光斑中心位置,满足了系统实时性要求。实验表明,所提出的快速复原算法能够实时复原分辨率为 200 pixel \times 200 pixel,帧频为 100 Hz 的光斑图像,所提取的信标光光斑中心位置与事后计算结果的误差小于 1 pixel,能够满足激光通信系统对信标光的实时跟踪要求。

关键词:大气激光通信;图像处理;图像复原;捕获跟踪对准;实时检测;共轭梯度算法

中图分类号:TP391.4;TN929.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2393

Rapid restoration and real-time detection on spot image of atmospheric laser communication

GAO Shi-jie^{1,2*}, SHENG Lei¹, WU Zhi-yong¹, ZHU Li-lu¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: 13604329504@163.com*

Abstract: For the effects of atmospheric turbulence on Acquisition, Tracking and Pointing (ATP) of the beacon in laser communication, a rapid restoration and real-time detection algorithm based on blind deconvolution was proposed. A local degradation model was proposed based on one dimensional Point Spread Function (PSF) instead of the normal two dimensional model. Then the constraint operator of the classic constrained conjugate gradient algorithm was improved, and the original image was estimated by the improved conjugate gradient iterative algorithm. Finally, the centroid of the beacon was calculated from the estimation image by connected component analysis. To meet the real-time requirement, a Field Programming Gate Array (FPGA) and Digital Signal Processors (DSPs) were used to realize the proposed algorithm and to extract the central position of a spot. Experimental results indicate that the real-time restoration on the image with 200 \times 200 pixels and 100 Hz frame rate have been obtained by the proposed algorithm. The error between the real-time re-

收稿日期:2014-08-26;修订日期:2014-09-30.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重大创新专项资助项目;中国科学院研究所学科情报可持续发展能力建设三期项目(No. 院 1336)

sult and the after one calculation is less than 1 pixel, which meets the requirements of the laser communication system for real-time tracking on the beacon.

Key words: atmospheric laser communication; image processing; image restoration; Acquisition Tracking and Pointing(ATP); real time detection; conjugate gradient algorithm

1 引言

激光通信系统具有高带宽、高速度、抗截获能力强、抗干扰能力强和结构轻巧等突出优点,非常适用于深空、星际、星地、空空、空地等链路通信,因此近年来得到了迅速发展。激光通信链路的建立与保持离不开信标光的捕获、跟踪与对准(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)系统^[1-5]。ATP 系统一般采用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)等光学成像器件对激光进行定位。受湍流的影响^[6-8],当激光通信链路经过大气时,ATP 系统所获得的激光光斑图像是退化后的图像,这会导致跟瞄精度下降甚至无法完成对目标的捕获^[9]。

对于因退化产生的光斑破碎问题,工程中常采用形态学闭运算进行处理,该方法计算量较小,能够符合系统实时性要求,但其仅能处理破碎光斑,对于湍流造成的其它影响没有解决能力,并且在处理破碎光斑时,形态学算子会使目标中心位置发生改变,影响光斑中心检测精度^[10]。国内外学者针对大气湍流导致图像退化这一问题提出了许多解决方法,可归纳为以下三种:第一种是多帧重构法^[11],其通过获取大量短曝光时间图像,经事后处理计算并重构目标图像。第二种是 Babcock 首次提出的自适应光学法^[12],它是利用机械补偿原理校正波前畸变。该方法需要首先测量大气湍流引入的畸变相位,然后在发射光场加入补偿量,以抵消大气湍流对波前的影响。第三种是盲复原方法^[13],该方法利用观察到的退化图像分别对目标图像和点扩散函数(Point Spread Function, PSF)进行估计,从而达到图像复原的目的。3 种方法中,多帧重构法属于事后处理方法,其算法原理与 ATP 系统的实时性要求相矛盾;自适应光学实现方式复杂,成本高昂且不易维修;盲复原方法若不进行迭代则复原效果不佳,若迭代次数过多则又会使图像复原过程难以满足 ATP 系统的实时性要求。

为了减小激光通信系统信标光图像受大气湍流的影响,本文通过改进约束共轭梯度迭代算法,

提出激光光斑退化图像的快速盲复原方法。在对光斑图像进行快速复原的基础上,对光斑目标与背景进行分割,并通过连通域计算实时提取复原后的光斑中心位置信息。

2 盲解卷积

设 CCD 采集到的退化后的数字图像信息为 $g(x, y)$, 则退化过程由下式给出:

$$g(x, y) = \sum_i \sum_j f(i, j) h(x-i, y-j) + n(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为理想的原始图像, $*$ 为卷积算子, $h(x, y)$ 为点扩散函数, $n(x, y)$ 为噪声。对式(1)进行傅里叶变换并通过移项可得:

$$F(u, v) = G(u, v) / H(u, v) - N(u, v) / H(u, v). \quad (2)$$

对上式进行傅里叶反变换,即可在已知退化图像 PSF 和噪声的条件下求出对理想原始图像的估计:

$$\hat{f}(x, y) = \text{FFT}^{-1}[F(u, v)]. \quad (3)$$

由于在求解原始图像估计值时涉及卷积运算,因此上述过程称为解卷积或去卷积。在实际应用中,大气湍流所对应的 PSF 不是完全已知的,也不能通过先验知识给出,必须利用观测图像所包含的信息对 PSF 进行估计,从而实现对图像的恢复,上述过程称为盲解卷积。图像盲复原中的一类常用算法即是通过盲解卷积的方式求得原始图像的估计值。

在盲解卷积运算中,如果不利用迭代对 PSF 的估计直接进行解卷积,则图像复原效果不好,计算出的光斑中心位置误差大。而采用多次迭代提升复原效果,又会使算法用时增加,影响系统的实时性。为满足激光通信系统对信标光的跟踪速度和瞄准精度的要求,本文将在基于盲解卷积算法的基础上通过两种方式减少算法耗时:第一是优化盲解卷积中的迭代过程,加快收敛速度;第二是通过 FPGA+多 DSP 的多核并行嵌入式系统提升系统的计算能力。

100 Hz。为验证基于嵌入式板卡的实时处理通道在进行快速复原与实时检测过程中的实时性与准确性,在实验中加入了图像分路与时标叠加系统,该系统将数字图像数据 1:1 复制并在图像第一行添加时标码后分两路输出。其中一路传输给安装有图像采集卡的计算机 A 进行实时存储,事后采用多帧重构法进行图像恢复,并提取光斑中心位置信息作为真值;另一路传输至嵌入式实时图像处理板卡中,板卡将处理后的图像和光斑中心位置信息经 PCI-e 口保存在计算机 B 中。

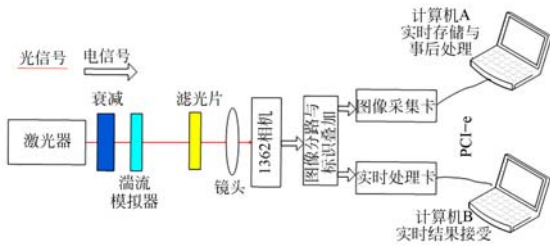


图 1 实验平台框图
Fig.1 Experimental platform

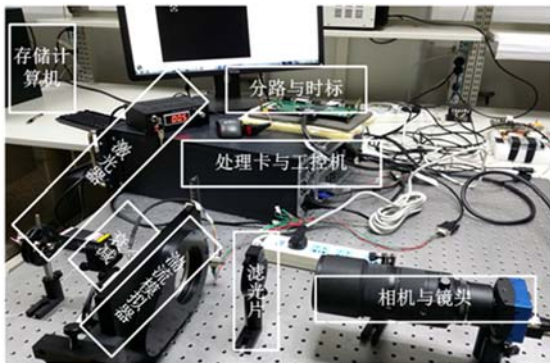


图 2 实验场景图
Fig.2 Experimental scene

为证明本文所提算法的正确性和实时性,进行了如下两个实验:实验一基于计算机实时存储结果,分别采用形态学闭运算方法、本文所提方法和多帧重构法对光斑进行复原,并以多帧重构法的复原结果为标准,比较本文所提方法与基于形态学闭运算方法的光斑中心位置提取误差;实验二比较实时处理结果与事后处理结果的光斑位置信息与时标信息是否能一一对应。

为使湍流模拟器所模拟的大气湍流尽量接近真实情况,课题组在大连旅顺相距 8.9 km 的 2 个站点(庙西、炮台山)进行了大气折射率结构常数的测量实验。该地晴朗天气下,气温约为 20

℃,下午 3 点至 5 点的 C_n^2 值的浮动区间为 $1.8 \times 10^{-14} \sim 9.2 \times 10^{-14}$ 。依此设置湍流模拟器中相关参数,使其模拟结构常数 C_n^2 在 $1.8 \times 10^{-14} \sim 9.2 \times 10^{-14}$ 内的大气干扰。

4.2 结果与分析

受到大气湍流干扰情况下的激光光斑图像如图 3 所示。

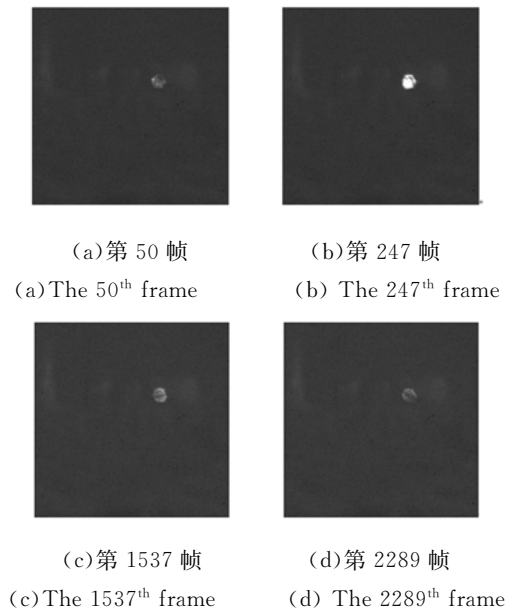


图 3 原始光斑图像

Fig.3 Original laser spot images

采用形态学闭运算方法滤波并进行图像分割后得到的结果如图 4 所示。

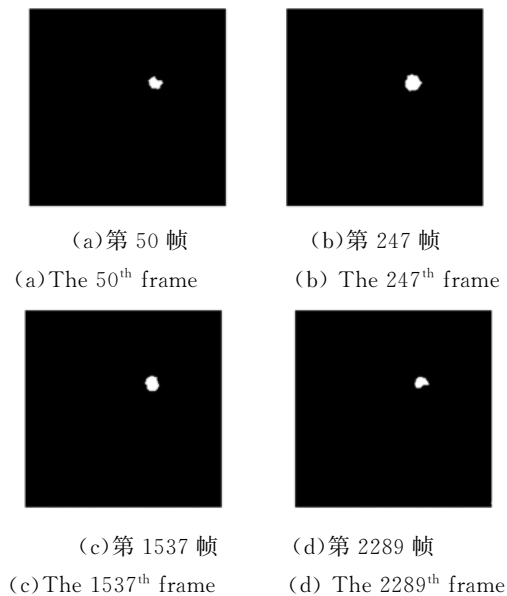


图 4 闭运算结果

Fig.4 Results of morphology algorithm

采用本文所提方法滤波并进行图像分割后得到结果如图 5 所示。

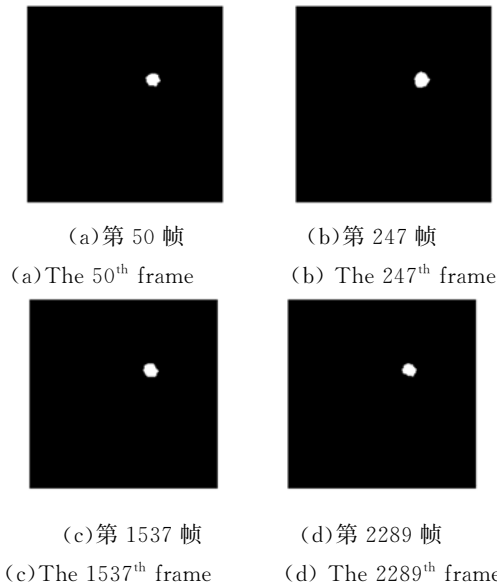


图 5 本文所提算法的处理结果

Fig. 5 Results of proposed algorithm

事后采用多帧重构方法所得的结果如图 6 所示。以多帧重构法所得结果作为光斑中心位置真值,计算得到的位置坐标为(129.35,76.62)。



图 6 多帧重构处理结果

Fig. 6 Results of multi-frames reconstructed process

分别采用基于形态学的光斑中心提取算法和本文提出的光斑中心提取算法对采集到的 1 140 frame 数据进行处理,得到的结果如表 1 所示。

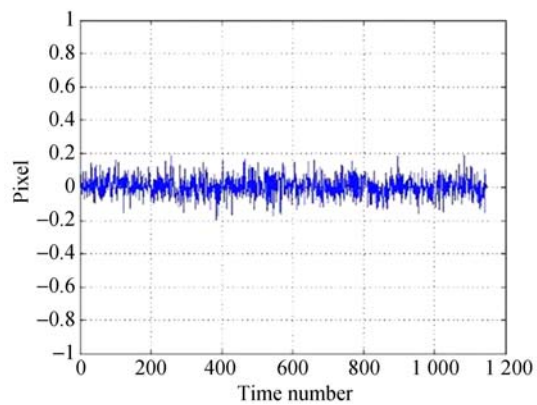
表 1 形心计算结果比较

Tab. 1 Comparison of centroids calculated by morphology method and proposed method

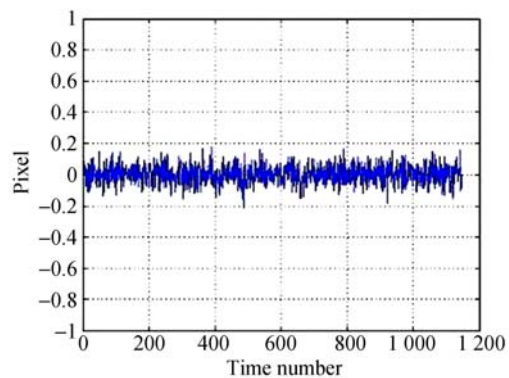
	形态学算法	本文提出算法
X_{mean}	126.73	130.07
X_{min}	123.54	127.98
X_{max}	133.62	131.95
Y_{mean}	78.19	75.91
Y_{min}	73.25	75.08
Y_{max}	79.84	77.23

从表 1 可以看出,以多帧重构法所得的结果作为真值时,形态学算法在 X 方向的平均误差为 2.62 pixel,Y 方向的平均误差为 1.57 pixel,在 X 方向的最大误差为 5.81 pixel,Y 方向的最大误差为 3.37 pixel;采用本文所提算法在 X 方向的平均误差为 0.72 pixel,在 Y 方向的平均误差为 0.71 pixel,在 X 方向的最大误差为 2.60 pixel,在 Y 方向的最大误差为 1.54 pixel。

将基于本文所提算法的实时目标中心位置信息与事后提取结果进行比较,结果如图 7 所示。



(a) X 方向
(a) In X direction



(b) Y 方向
(b) In Y direction

图 7 实时处理与事后比对结果比较
Fig. 7 Comparison of results by real-time processing and afterwards methods

X 方向误差绝对值均值为 0.048 3 pixel,标准差为 0.037 7,最大误差为 0.194 pixel。Y 方向误差绝对值均值为 0.048 2 pixel,标准差为

0.035 6,最大误差为 0.211 pixel。同事后处理结果相比,实时处理系统对光斑形心位置的提取精度达到了系统要求。通过时间序列码可以看出实时处理过程中无丢帧现象,用示波器查到的实时处理卡进行退化图像复原和目标提取的总时间约为 5 ms,如图 8 所示。

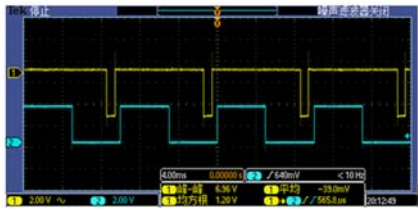


图 8 图像场信号与处理时间的时序

Fig. 8 Sequences of frame signal and processing time

参考文献:

- [1] 黄继鹏,王延杰,孙宏海,等.激光光斑位置精确测量系统[J].光学精密工程,2013,21(4):841-848. HUANG J P, WANG Y J, SUN H H, *et al.*. Precise position measuring system for laser spots[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 841-848. (in Chinese)
- [2] GREGORY M, HEINE F, KAMPFNER H, *et al.*. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. *Optical Engineering*, 2012, 53(3):031202.
- [3] 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 [C]. SPIE, 2006, 6304:6314.
- [4] LEITGEB E, AWAN M S, BRANDL P, *et al.*. Current optical technologies for wireless access[C]. *10th International Conference on Telecommunications, Zagreb: IEEE*, 2009:7-18.
- [5] SMUTNY B, KAEMPFNER H, MUEHLNIKEL G, *et al.*. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link [C]. *Free-Space Laser Communication Technologies X XI, San Jose: SPIE*, 2009, 7199: 719906.
- [6] 张亚超,胡立发,彭增辉,等.液晶波前校正器过驱动矩阵的测量方法研究[J].液晶与显示,2014,5(29):709-715. ZHANG Y CH, HU L F, PENG Z H, *et al.*. Method for characterizing the overdrive-matrix of a liquid crystal wavefront corrector[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 5(29): 709-715. (in Chinese)
- [7] 赵海丽,姜会林,王晓曼,等.空间光通信中高帧频相机动态调光技术研究[J].液晶与显示,2012,2(27):267-270. ZHAO H L, JIANG H L, WANG X M, *et al.*. Dynamic light-adjusting technology of high frame frequency CCD camera in space optical communication system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 2(27):267-270. (in Chinese)
- [8] 韩立强.大气湍流下空间光通信的性能及补偿方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:1-3. HAN L Q. *Research on Performance of Free Space Optical Communication Through Atmospheric Turbulence and ITS Compensation Method* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011:1-3. (in Chinese)
- [9] RABINOVICH W S, MOORE C I, BURRIS H R, *et al.*. Free space optical communications research at the U. S. naval research laboratory[C]. SPIE, 2010, 7587:02-1-15.
- [10] SCHMID C, MOHR R, BAUCKHAGE C. Evaluation of interest point detectors[J]. *International*

- Journal of Computer Vision*, 2000, 37(2): 151-172.
- [11] CANDLES E J, ROMBERG J. Practical signal recovery from random projections [J]. *Proc. of SPIE(S0277-786X)*, 2005, 5419: 76-80.
- [12] BABCOCK H W. *The Possibility of Compensating Astronomical Seeing* [M] Publication of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65: 229-236.
- [13] CARASSO A S. Direct blind deconvolution [J]. *Appl. Math*, 2001, 61(6): 1980-2007.
- [14] JAMES G N, ROBERT J P, TODD C T. Fast restoration of atmospherically blurred images [C]. *SPIE*, 2011, 2296: 542-553.

作者简介:



高世杰(1979—),男,吉林抚松人,博士研究生,副研究员,主要从事光通信技术的研究。E-mail: 13604329504@163.com

导师简介:



吴志勇(1965—),男,内蒙通辽人,研究员,博士生导师,主要从事光电测控设备总体技术和光通信技术方面的研究。E-mail: wuzy@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)