

融合遗传算法和BP神经网络的光斑定位方法

张景源 陈北北 杨永兴 朱庆生 李金鹏 赵金标

Positioning algorithm for laser spot center based on BP neural network and genetic algorithm

ZHANG Jing-yuan, CHEN Bei-bei, YANG Yong-xing, ZHU Qing-sheng, LI Jin-peng, ZHAO Jin-biao

引用本文:

张景源, 陈北北, 杨永兴, 朱庆生, 李金鹏, 赵金标. 融合遗传算法和BP神经网络的光斑定位方法[J]. *中国光学*, 2023, 16(2): 407-414. doi: 10.37188/CO.2022-0084

ZHANG Jing-yuan, CHEN Bei-bei, YANG Yong-xing, ZHU Qing-sheng, LI Jin-peng, ZHAO Jin-biao. Positioning algorithm for laser spot center based on BP neural network and genetic algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 407-414. doi: 10.37188/CO.2022-0084

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于小波神经网络的光纤陀螺误差补偿方法

A fiber optic gyro error compensation method based on wavelet neural network

中国光学 (中英文). 2018, 11(6): 1024 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1024>

基于卷积神经网络的候选区域优化算法

Region proposal optimization algorithm based on convolutional neural networks

中国光学 (中英文). 2019, 12(6): 1348 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1348>

基于改进的加速鲁棒特征的目标识别

Object detection based on improved speeded-up robust features

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 719 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0719>

剪切散斑干涉技术及应用研究进展

Research progress in shearography and its applications

中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 300 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0300>

Canny算法的GPU并行加速

Parallel acceleration of Canny algorithm based on GPU

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 737 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0737>

范围限制的自适应亮度保持多阈值直方图均衡算法研究

Range limited adaptive brightness preserving multi-threshold histogram equalization algorithm

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 726 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0726>

文章编号 2097-1842(2023)02-0407-08

融合遗传算法和 BP 神经网络的光斑定位方法

张景源^{1,2}, 陈北北^{1,2}, 杨永兴^{1,2}, 朱庆生^{1,2,3*}, 李金鹏^{1,2,3}, 赵金标³

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230022;

2. 中国科学技术大学 南京天文仪器研制中心, 江苏 南京 210042;

3. 中科院南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042)

摘要: 针对振动环境中传统光斑中心定位算法存在的处理时间长、精度低等问题, 本文提出一种基于遗传算法优化 BP 神经网络的光斑定位方法。使用 BP 神经网络对光斑位置进行预测, 并通过遗传算法对神经网络进行优化。构建 BP 神经网络模型, 将使用质心、形心、高斯拟合等方法求出的光斑中心位置以及形心法求出的光斑半径作为输入, 对光斑真实中心位置进行预测。并使用遗传算法优化神经网络的权值和阈值, 以增强预测效果。实验过程中, 通过对光学系统外加干扰模拟振动环境, 采集数据用于神经网络训练和算法验证。实验结果表明, 优化前后的标定测试迭代次数分别为 55 和 29, 平均误差分别为 0.81 像素和 0.45 像素。由本文结果可知, 在遗传算法的优化下, 神经网络算法的迭代速度和预测精度均有所提高。

关键词: 遗传算法; BP 神经网络; 图像处理; 激光光斑中心

中图分类号: TP249

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0084

Positioning algorithm for laser spot center based on BP neural network and genetic algorithm

ZHANG Jing-yuan^{1,2}, CHEN Bei-bei^{1,2}, YANG Yong-xing^{1,2}, ZHU Qing-sheng^{1,2,3*},

LI Jin-peng^{1,2,3}, ZHAO Jin-biao³

(1. *University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China;*

2. *Nanjing Research Center of Astronomical Instruments, University of Science and Technology of China, Nanjing 210042, China;*

3. *Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)*

* *Corresponding author, E-mail: 85482014@163.com*

Abstract: Aiming at the problems of long processing time and low accuracy of the traditional laser spot center positioning algorithm used in a vibrating environment. We proposed a laser spot center positioning method based on a genetic algorithm optimized BP neural network. A BP neural network was applied to predict the spot center position and a genetic algorithm was applied to optimize the neural network. Based on the BP neural network, the gray weighted centroid method, centroid method, Gaussian fitting method were used to

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(No.12003067)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12003067)

obtain the spot center position, and the centroid method was used to obtain the radius of laser spot, on the above basis, we predicted the actual center position of the spot. Genetic algorithms were used to optimize the weights and thresholds of neural networks to improve prediction accuracy. An experimental platform is established to simulate the vibration environment by applying perturbations to the optical system and the data is collected to train neural network and verify the algorithm. The experimental results show that the number of calibration test iterations before and after optimization is 55 and 29, and the average errors are 0.81 pixels and 0.45 pixels, respectively. Under the optimization of the genetic algorithm, the iteration speed and prediction accuracy of the neural network algorithm is improved.

Key words: genetic algorithm; BP neural network; image processing; laser spot center

1 引言

激光光束在传输时,由于大气湍流^[1]或平台振动等因素的影响,会出现光束抖动现象,导致目标靶面接收到的光束中心位置发生偏移,甚至使光斑脱离靶面^[2-3]。为了减少或避免光束抖动对光学仪器精度的影响,需要通过调节光学系统,改变光束指向,使失调光束回归正常,即进行光束指向控制^[4-5]。光束指向控制在天文观测、激光测距^[6]、自由空间光通信^[7]、激光制导^[8]等领域中都有广泛的应用^[9]。在对光束进行指向控制时,要精确判断光斑中心位置,因此激光光斑定位的精度和稳定性至关重要。

在对激光光斑进行中心定位时主要有两种方法^[10]。一是通过分析图像的灰度分布信息进行中心定位,主要包括灰度质心法^[11]和高斯拟合法^[12-13]。灰度质心法适用于光斑能量分布均匀的情况;高斯拟合法在光斑灰度值为高斯分布的情况下有效,但计算时间过长。另一种是通过光斑的边缘形状信息进行光斑中心定位,主要有形心法、Hough 变换^[14]和椭圆拟合法^[11, 15]。形心法原理简单,但对光斑边缘形状要求较高;Hough 变换法对噪声、变形等有较好适应性,但计算量过大,不适用于实时处理的情况;椭圆拟合法对光斑对称性要求较高,在光斑边缘质量不好时处理效果较差。

为克服传统光斑定位算法的不足,近年来已提出多种定位方法:安哲^[16]使用 BP 神经网络对大气湍流影响下的激光光斑中心位置进行预测;刘岳飞^[17]使用光流法对目标位置进行预测;曹瑜彬^[18]使用深度学习的方法对光斑质心位置进行

预测;梁慧慧^[19]等针对目标易受到形变、遮挡以及尺度变化导致跟踪失败的情况,提出了一种改进的多特征融合的目标跟踪算法;兰旭婷^[20]等将特征融合与注意力机制相融合用于目标跟踪;张博^[21]等利用光流场模型实现了对多通道视频目标的跟踪;迟书凯^[22]等人提出了一种基于编码标记点的高精度运动估计方法。其中使用 BP 神经网络对光斑中心进行预测,原理简单,预测效果较好,且方便应用于工程实践中,但容易陷入局部最优值,使误差增大。

本文考虑对 BP 神经网络进行优化,以减少算法处理时间,提高预测精度。基于 BP 神经网络,使用由灰度质心、形心、高斯拟合等方法求得的光斑中心位置和由形心法求得的光斑半径对光斑真实中心位置进行预测。同时,为克服 BP 神经网络收敛于局部最优值的缺点,使用遗传算法对 BP 神经网络的权值和阈值进行优化。

本文将遗传算法优化神经网络方法应用于特定场景,对振动环境下的光斑定位进行研究。在实际应用时,考虑到虽然振动具有随机性,但一定时间之内环境振动又具有一定的相关性,因此在进行光斑中心定位时,先采集一定数量的光斑图像,使用这些光斑样本对神经网络进行训练,待训练完成后,再对光斑中心位置进行预测。

2 结合遗传算法和 BP 神经网络的光斑中心定位算法

将遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 与 BP 神经网络 (Back Propagation) 相结合,可以有效减少光斑中心定位的处理时间,并提高定位精度,优化后的算法流程如图 1 所示。

光斑中心位置坐标包含 x 轴和 y 轴两部分。只对单一坐标轴进行训练和预测即可对算法进行验证, 因此实验中只处理 x 轴坐标。

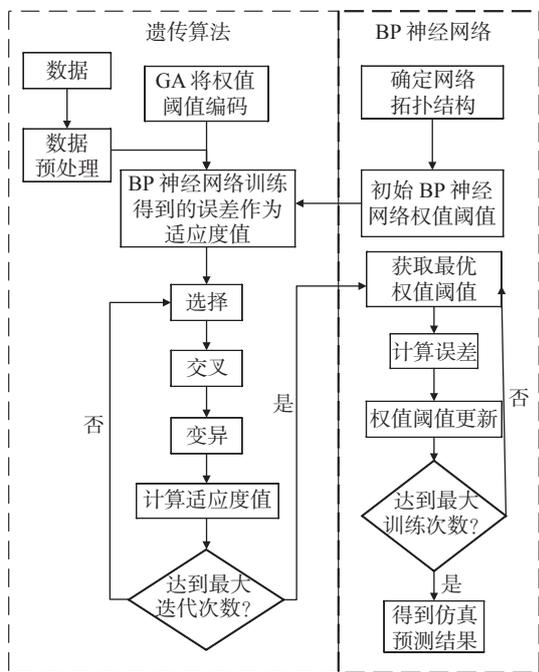


图 1 遗传算法优化 BP 神经网络流程图

Fig. 1 Flow chart of genetic algorithm combined with BP neural network

2.1 BP 神经网络结构

传统的神经网络结构如图 2 所示。

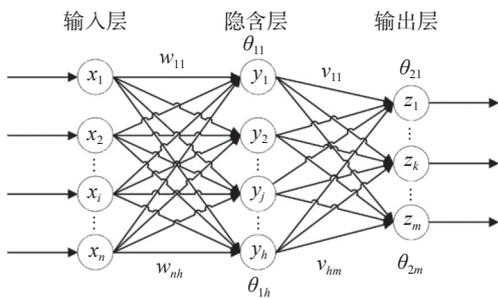


图 2 传统的 BP 神经网络结构

Fig. 2 Structure of traditional BP neural network

图 2 中输入层和输出层的神经元数目 n 、 m 由神经网络模型决定; w_{ij} 和 v_{jk} 为神经元的权值, θ_{1j} 和 θ_{2j} 为神经元的阈值。隐含层神经元的个数 h 可由公式 (1) 计算得到。

$$h = \sqrt{n+m} + \delta \quad (1)$$

其中 δ 为 1 ~ 10 之间的常数。

构建神经网络模型, 将灰度质心法、形心法、

高斯拟合法求得的光斑中心位置以及采用形心法计算得到的光斑半径作为输入, 光斑实际位置作为输出, 即 n 等于 4, m 等于 1, 如图 3 所示。

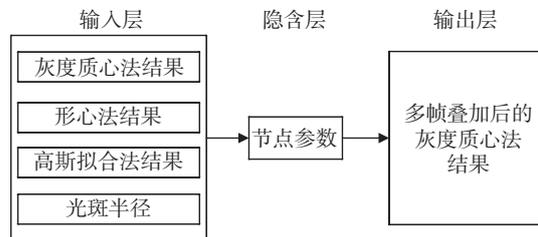


图 3 本文构建的神经网络模型

Fig. 3 Structure of the proposed neural network model

神经网络的学习率会对训练结果产生较大影响, 学习率设置过小, 会增加训练次数, 网络收敛较慢; 学习率过大则会降低网络结构的稳定性。传统的神经网络学习率为固定值, 取值范围一般为 10^{-6} ~1, 本文使用学习率退火的方式提高网络的学习效率, 更新公式如公式 (2) 所示。

$$\lambda_t = \lambda_0 \times e^{-0.05t} \quad (2)$$

其中, λ_t 为第 t 次训练时的学习率, λ_0 表示初始学习率, 本文设置为 0.1。

2.2 遗传算法优化

遗传算法在对机器学习的参数进行优化和对最优值进行求解等问题上应用广泛。使用遗传算法对 BP 神经网络进行改进, 可对神经网络的结构参数, 如权值和阈值进行优化^[23]。神经网络的权值和阈值对网络训练结果有很大影响, 但很难直接对参数进行计算, 一般将它们初始化为 $[-0.5, 0.5]$ 区间的随机数。使用遗传算法可以对初始权值和阈值进行优化 (见图 1)。

交叉概率和变异概率的选择会影响遗传算法的全局寻优能力和收敛速度。传统遗传算法中, 交叉概率和变异概率的值为常数, 一般设置为 0.3~0.8 和 0.001~0.1 之间的固定值。

本文通过动态调整交叉概率和变异概率以提高处理效果。在迭代初期, 使用较大的交叉及变异概率扩大全局搜索范围。在迭代后期, 选择较小的值以加快收敛速度。

交叉概率如公式 (3) 所示:

$$P_c = 0.5 \times \left(1 - \frac{n}{n_{\max}}\right) + 0.3 \quad (3)$$

变异概率如公式 (4) 所示:

$$P_m = 0.099 \times \frac{n}{n_{\max}} + 0.001, \quad (4)$$

其中, n_{\max} 为最大迭代次数, n 为当前迭代次数。随着迭代次数的增加, 交叉概率由 0.8 降至 0.3, 变异概率由 0.001 增加至 0.1。

实验中, 种群规模设置为 50, 遗传算法的迭代次数设置为 100。

3 实验验证

为验证算法的实际应用效果, 进行模拟实验。自行搭建实验环境, 通过对光学系统外加干扰模拟振动环境, 并采集图像。实验时 CCD 采集光斑图像的帧频是 90~100 frame/s, 外加干扰的频率为 5 Hz。为保证求得的光斑中心的“实际位置”尽量准确, 本文将多帧叠加后取平均的图像的光斑中心位置作为“实际位置”。实验中外加干扰的频率为 5 Hz, 因此叠加的图像所处时间范围应在 0.1 s 左右, 本文使用 10 帧图像进行叠加后取平均。

灰度质心法适用于光斑灰度分布均匀的情况, 而高斯拟合法则对光斑灰度值分布接近高斯分布的情况效果较好。使用多帧叠加取平均后, 基本能保证光斑灰度分布均匀, 但难以保证光斑呈现高斯分布。因此本文使用多帧叠加取平均后, 通过灰度质心法计算得到的光斑中心位置作为该时间段内光斑“实际位置”。

3.1 实验环境与数据采集

实验采集环境如图 4 所示, 主要由光学系统、CCD 相机、计算机以及随机扰动控制器组成。随机扰动控制器可以对光学系统添加随机扰

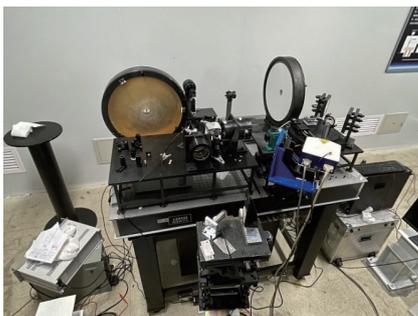


图 4 实验硬件平台

Fig. 4 Experimental hardware platform

动, 用来模拟光学系统在实际环境中受到的外部干扰。

振动通过 PI 公司生产的压电摇摆台 S330 产生, S330 使光学平台产生振动, 用来模拟环境振动。通过研华公司生产的 PCI-1727U 同步模拟输出卡对压电摇摆台进行控制, 输出卡可以产生指定振幅和模式的电压。为保证实验效果, 大部分光学系统在使用时均放置在隔振平台上, 可以隔绝大部分高频振动, 因此本文只对低频扰动进行模拟。实验中输出卡输出幅度为 1 V, 频率为 5 Hz 的方波。实验数据表明, 添加 1 V 的干扰时, 光斑中心振动幅度为 $\pm 2 \sim 3$ pixel, 此时灰度质心法计算得到的光斑中心在 x 轴的变化情况如图 5 所示。

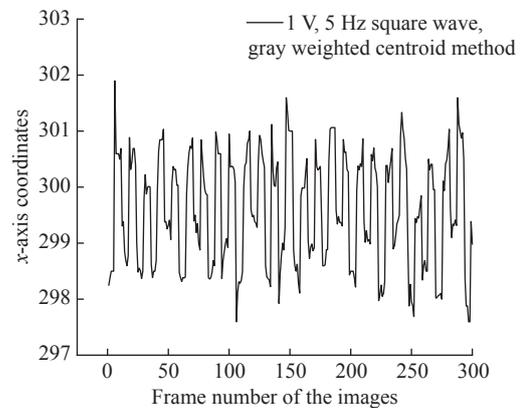


图 5 光斑在 x 轴抖动情况

Fig. 5 The vibration curves along x -axis for the spot center

实验时 CCD 采集光斑图像的帧频为每秒 90~100 frames/s 之间, 图像采集步骤如下:

(1) 调整光学系统和 CCD 相机, 使得激光光斑位于 CCD 像面适当位置;

(2) 通过随机扰动器对光学系统添加随机扰动, 模拟实际环境中的振动情况, 通过计算机控制 CCD 相机进行图像采集。采集到的图像如图 6 所示。



图 6 激光光斑图像

Fig. 6 Laser spot image

对采集到的图像进行预处理, 得到实验数据。将连续的 10 幅图像分为一组, 对第一张图像进行处理, 分别用灰度质心法、形心法、高斯拟合法计算光斑中心位置坐标, 并使用形心法计算光斑半径。对 10 幅图像进行叠加后求平均, 将此时由灰度质心法求出的光斑中心位置作为这 10 帧图像的光斑实际位置, 得到的一组数据如表 1 所示。将采集到的数据分为训练组和测试组两部分, 分别用于神经网络训练和测试。

表 1 训练数据

Tab. 1 Training data

Grayscale centering	centroid	Gaussian fitting	radius	Actual Coordinate
(252.30, 305.11)	(255.43, 309.27)	(254.17, 307.91)	7	(253.30, 307.11)

下面分别使用 BP 神经网络和优化后的神经网络进行训练。

3.2 BP 神经网络训练

将用灰度质心法、形心法和高斯拟合法计算出的光斑中心位置坐标以及采用形心法计算得到的光斑半径作为输入, 实际位置作为输出, 进行神经网络训练, 训练过程如图 7 所示。模型经过 55 次迭代, 开始收敛, 预测均方值稳定, 此时达到最佳预测效果。

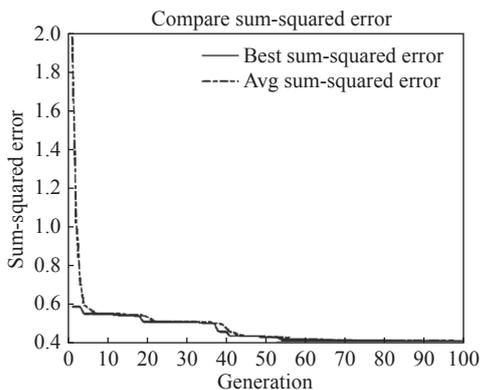


图 7 BP 神经网络训练曲线

Fig. 7 Training curve of BP neural network

3.3 GA-BP 神经网络训练

使用遗传算法对 BP 神经网络进行优化, 利用图像处理得到的数据如表 2 所示。作为初始群体, 通过神经网络调试函数的适应度, 找到最优适应度值对应的个体。使用由遗传算法得到的最优个体对网络初始权值和阈值赋值, 进行神经网络训练, 结果如图 8 所示, 此时迭代次数降低至 29 次。

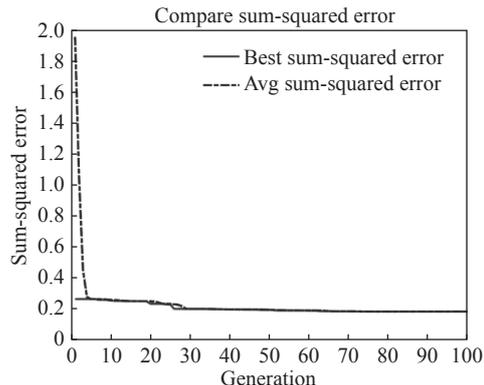


图 8 GA-BP 神经网络训练曲线

Fig. 8 Training curve of GA-BP neural network

表 2 两种网络性能对比

Tab. 2 Performance comparison of the two neural networks

Neural Network	BP	GA-BP
Number of iterations	55	29
Mean error/pixel	0.76	0.42

3.4 实验结果

分别使用 BP 神经网络和遗传算法优化后的 BP 神经网络对 20 组测试数据进行预测, 如图 9 所示。可见遗传算法优化后的神经网络的预测结果与光斑中心真实位置的拟合程度更高。

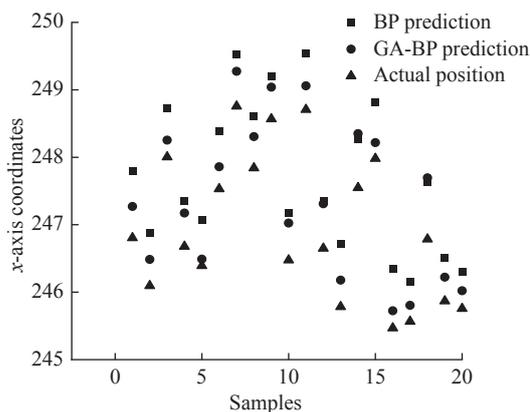


图 9 两种网络预测结果与实际位置

Fig. 9 Performance comparison of two network prediction methods

定义 E 为对测试集样本位置预测时的平均误差, 如公式 (5) 所示。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M |s_i - r_i|}{M}, \quad (5)$$

其中 M 为测试集样本数量, s, r 分别表示光斑中心位置预测值和光斑位置真实值的 x 轴坐标, 结果如表 2 所示。

BP 神经网络预测平均误差为 0.76 个像素, 训练次数为 55 次, 经遗传算法优化的 BP 神经网络预测平均误差为 0.42 个像素, 训练次数为 29 次。

为验证算法效果, 使用输出卡输出 1 V, 5 Hz 的正弦波, 通过两种神经网络分别进行光斑中心定位, 结果如表 3 所示。

表 3 两种网络预测方法的性能测试结果

Tab. 3 Performance test results by the two neural networks

Neural Network	BP	GA-BP
Number of iterations	47	32
Mean error/pixel	1.21	0.73

BP 神经网络预测平均误差为 1.21 个像素, 训练次数为 47 次, 经遗传算法优化的 BP 神经网络预测平均误差为 0.73 个像素, 训练次数为 32 次。

3.5 指向控制实验

使用另一台 PI 控制器通过压电摇摆台 S330 对光学系统进行控制, S330 通过控制快速反射镜来调节光路, 以补偿随机扰动器对光学系统产生的干扰。实验中, 将本文提出的方法用于光斑中心计算。在应用时, 考虑到虽然振动具有随机性, 但一定时间之内的环境振动又具有相对的稳定性, 因此在进行光斑中心定位时, 先采集一定数量的光斑图像, 使用这些光斑样本对神经网络进行训练, 待训练完成后, 再对光斑中心位置进行预测。得到光斑中心位置后, 将控制信息传输至 PI 控制器对光路进行调节, 实现光束指向控制的功能。

图 10 为进行控制后, 光斑的抖动情况。实验结果表明, 在进行抖动补偿时, 光斑中心的抖动范围为 ± 1 像素, 图 5 为在相同干扰下, 不进行光束

指向控制时, 光斑中心抖动范围为 $\pm 2 \sim 3$ 像素, 可见光斑稳定性得到显著提高。

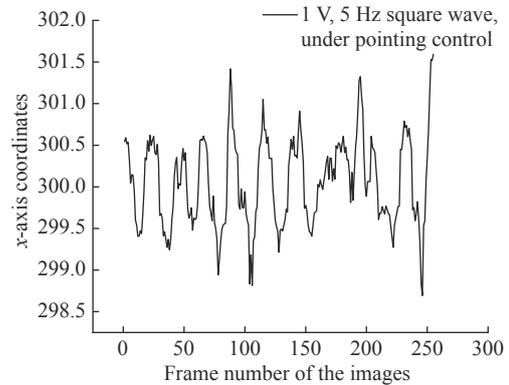


图 10 进行控制后光斑沿 x 轴的变化情况

Fig. 10 The vibration curves along x -axis for the spot center under controlling

4 结 论

为满足振动环境下对激光光斑中心的高精度定位要求, 本文结合遗传算法与 BP 神经网络对激光光斑进行中心定位, 并搭建实验系统验证算法效果。通过遗传算法对 BP 神经网络的权值和阈值进行优化, 在一定程度上克服了 BP 神经网络收敛于局部最优值的缺点, 提升了算法的稳定性。

实验结果表明, 在遗传算法优化前后 BP 神经网络的迭代次数分别为 55 次和 29 次, 且优化前后预测平均误差分别为 0.81 像素、0.45 像素。使用遗传算法和 BP 神经网络相结合的方式对激光光斑中心定位, 能够有效降低迭代次数, 提高算法效率, 并提高光斑中心定位精度。将本算法应用于光束指向控制时, 在相同干扰下, 光斑抖动范围由 $\pm 2 \sim 3$ 像素降低至 ± 1 像素, 光斑稳定性显著提高。

本文使用遗传算法对神经网络进行优化, 提高了振动环境下光斑中心的预测效果。在以后的研究中, 将尝试采用更多的优化方法对 BP 神经网络进行优化, 以期得到更好的实验效果。

参考文献:

- [1] 徐抒岩, 张旭升, 范阔, 等. 大型光学系统波前检测中气流扰动的抑制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 80-89. XU SH Y, ZHANG X SH, FAN K, et al.. Suppression of airflow turbulence in wavefront measurement for large-aperture optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 80-89. (in Chinese)
- [2] 周睿, 李新阳, 沈锋, 等. 基于两级高速倾斜镜闭环控制的光束稳定技术研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1214002.

- ZHOU R, LI X Y, SHEN F, *et al.*. Laser beam stabilizing system based on close loop control of two fast steering mirrors in series[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1214002. (in Chinese)
- [3] 周睿. 自适应光学实时信号处理及优化控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.
ZHOU R. Real time signal processing and optimal control technology on adaptive optics systems[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [4] GANESAN A R, ARULMOZHIVARMAN P, MOHAN D, *et al.*. Laser beam steering control system for free-space line of sight optical communication[J]. *IETE Journal of Research*, 2006, 52(6): 417-424.
- [5] ARNON S, KOPEIKA N S, KEDAR D, *et al.*. Performance limitation of laser satellite communication due to vibrations and atmospheric turbulence: down - link scenario[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2003, 21(6): 561-573.
- [6] 杨滨赫, 蔡引娣, 文志祥, 等. 长距离激光测量中光束漂移的自动补偿[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2393-2402.
YANG B H, CAI Y D, WEN ZH X, *et al.*. Automatic compensation method for beam drift in long-distance laser measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2393-2402. (in Chinese)
- [7] 孙晶, 黄普明, 么周石. 大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0301003.
SUN J, HUANG P M, YAO ZH SH. Performance of satellite-to-ground laser communications under the influence of atmospheric turbulence and platform micro-vibration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0301003. (in Chinese)
- [8] 李海廷, 胡鑫, 曾双, 等. 大气湍流对半主动激光制导中光斑检测精度的影响[J]. *兵工学报*, 2021, 42(2): 297-307.
LI H T, HU X, ZENG SH, *et al.*. Influence of atmospheric turbulence on detection accuracy of laser spot[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(2): 297-307. (in Chinese)
- [9] ZHU W, RUI X T. Adaptive control of a piezo-actuated steering mirror to restrain laser-beam jitter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(10): 7873-7881.
- [10] 蒋佳雯, 康杰虎, 吴斌. 激光光斑中心高精度定位补偿算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1412002.
JIANG J W, KANG J H, WU B. High precision positioning and compensation algorithm for laser spot center[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1412002. (in Chinese)
- [11] 任守峰, 唐新明, 祝小勇, 等. 一种高分七号卫星激光足印光斑质心的高精度提取算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1012001.
REN SH F, TANG X M, ZHU X Y, *et al.*. A high-precision extraction algorithm for centroid of laser footprint spot of GF-7 satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1012001. (in Chinese)
- [12] 伍煜, 龙小祥, 杨坚, 等. 高分七号卫星足印相机激光光斑中心定位方法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1728001.
WU Y, LONG X X, YANG J, *et al.*. Laser spot center positioning method in gaofen-7 footprint camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1728001. (in Chinese)
- [13] 王丽丽, 胡中文, 季杭馨. 基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法[J]. *应用光学*, 2012, 33(5): 985-990.
WANG L L, HU ZH W, JI H X. Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(5): 985-990. (in Chinese)
- [14] 董书舟, 强佳, 舒嵘. 基于Hough变换的天基激光测距轨迹提取算法[J]. *半导体光电*, 2021, 42(3): 430-436.
DONG SH ZH, QIANG J, SHU R. Space-based laser ranging trajectory extraction algorithm based on Hough transform[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(3): 430-436. (in Chinese)
- [15] 潘登, 李艳丽, 高东, 等. 基于椭圆拟合的多光斑/重叠光斑中心提取方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1410001.
PAN D, LI Y L, GAO D, *et al.*. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipse fitting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1410001. (in Chinese)
- [16] 安哲. 大气湍流下的光斑定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
AN ZH. Study on the method of spot location under atmospheric turbulence[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 刘岳飞. 基于光流法的星间光通信信标光识别跟踪算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LIU Y F. Study on the recognition and tracking algorithm of the beacon for intersatellite laser communications based on optical flow method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [18] 曹瑜彬. 基于深度学习的大气光场传输和光斑质心位置分析及预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

- CAO Y B. Deep learning based prediction and analysis for light fields propagating through atmosphere and optical image centroid position[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [19] 梁慧慧, 何秋生, 贾伟振, 等. 一种多特征融合的目标跟踪算法[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(6): 583-594.
LIANG H H, HE Q SH, JIA W ZH, *et al.*. Multi-feature fusion target tracking algorithm[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(6): 583-594. (in Chinese)
- [20] 兰旭婷, 郭中华, 李昌昊. 基于注意力与特征融合的光学遥感图像飞机目标检测[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(11): 1506-1515.
LAN X T, GUO ZH H, LI CH H. Attention and feature fusion for aircraft target detection in optical remote sensing images[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(11): 1506-1515. (in Chinese)
- [21] 张博, 龙慧, 刘刚. 基于特征约束与光流场模型的多通道视频目标跟踪算法[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(11): 1554-1564.
ZHANG B, LONG H, LIU G. Multi-channel video target tracking algorithm based on feature constraint and optical flow field model[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(11): 1554-1564. (in Chinese)
- [22] 迟书凯, 叶旋, 高翔, 等. 基于编码标记点的高精度运动估计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(7): 1720-1730.
CHI SH K, YE X, GAO X, *et al.*. Coded marker-based high-accuracy motion estimation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(7): 1720-1730. (in Chinese)
- [23] 王向周, 陈冬清, 郑戎华, 等. 基于改进遗传优化算法的线阵相机标定方法[J]. *北京理工大学学报*, 2020, 40(8): 861-866.
WANG X ZH, CHEN D Q, ZHENG SH H, *et al.*. A linear array camera calibration method based on improved genetic optimization algorithm[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, 40(8): 861-866. (in Chinese)

作者简介:



张景源(1997—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 2019年于东南大学获得学士学位, 现于中国科学技术大学攻读硕士学位, 主要从事天文仪器的计算机控制系统及图像处理方面的研究。
E-mail: jyzhangx@mail.ustc.edu.cn



朱庆生(1969—), 男, 江苏连云港人, 研究员, 硕士生导师, 1992年于南京大学获得学士学位, 主要从事天文仪器的软件系统设计方面的研究。
E-mail: 85482014@163.com