

基于对称性评估的保偏光纤偏振轴检测技术

于文海, 冯迪*, 梁日, 宋凝芳

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083

摘要 提出一种基于端面图像对称性特征的偏振轴检测算法。该算法利用图像极坐标变换来实现图像的对称性检测, 使用金字塔搜索法快速寻找最优对称轴, 确定偏振轴向。所提算法利用图像的全局性特征而不依赖于应力区边缘点位置实现精确定位, 对图像清晰度要求显著降低。实验结果表明, 所提算法具有较高的准确性和精确性 ($\pm 0.1^\circ$), 其稳健性大幅增强, 且算法速度提升了近 1.5 倍。

关键词 图像处理; 对称性; 端面图像; 保偏光纤; 偏振轴

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0211001

Polarization Axis Detection Technique of Polarization Maintaining Fiber Based on Symmetry Evaluation

Yu Wenhai, Feng Di*, Liang Ri, Song Ningfang

School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

Abstract A polarization axis detection algorithm is proposed based on the symmetric features of end-view images, in which the polar coordinate transformation of the images is first used to realize the symmetry detection of images, the pyramid searching method is then utilized to quickly find the optimal symmetric axis, and finally the direction of the polarization axis is determined. Since the proposed algorithm can achieve an accurate positioning by utilizing the global features of images instead of the edge points in the stress region, the requirement for the sharpness of image is greatly reduced. The experimental results show that the proposed algorithm possesses high accuracy and precision ($\pm 0.1^\circ$), indicating the robustness is greatly enhanced, and simultaneously the speed of this algorithm is improved by nearly 1.5 times.

Key words image processing; symmetry; end-view image; polarization maintaining fiber; polarization axis

OCIS codes 110.2960; 110.2970; 110.3925

1 引 言

保偏光纤对线偏光具有较强的保持性, 被广泛用于光纤传感检测领域^[1-7]。尤其是熊猫型保偏光纤, 其偏振保持特性更好, 在光纤陀螺、光纤加速度计等领域应用更加广泛。偏振轴检测是保偏光纤使用中的重要技术之一^[8-9]。现有检测技术主要包括三类: 横向观测法、纵向观测法和端面图像法。其中横向观测法如 POL (polarization observation by the lens-effect tracing)、PAS (profile alignment system)、背向衍射法等, 具有较低的检测精度 ($1^\circ \sim 1.5^\circ$), 且需要预先建立标准库。而纵向观测法中, 消光比法无法区分快慢轴, 白光法装置复杂, 光弹法则会破坏光纤。相比而言, 端面图像法更形象直观,

检测精度更高, 且无须建立标准库, 近年来引起广大研究人员的关注^[10-14]。

现有端面图像检测方法在实际应用过程中存在稳健性差、检测速度慢等问题。为此, 本文设计了一种基于对称性评估的偏振轴检测算法 (以下简称“SE 算法”), 并对所提算法的实现原理进行详细介绍; 然后, 从算法的准确性、精确性、稳健性和速度等方面进行对比实验, 测试 SE 算法的性能。

2 检测原理

偏振轴检测是保偏光纤定轴的重要一环^[13]。保偏光纤定轴是指将光纤偏振轴 (慢轴方向) 旋转到与某一物理基准成固定角度的过程。

以熊猫型保偏光纤为例, 其保偏光纤的定轴过

收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-08-20; 录用日期: 2018-09-11

基金项目: 国家重大科学仪器专项(2013YQ040877)

* E-mail: fengdi@buaa.edu.cn

程如图 1(a)所示,定轴过程分为三步:

1) 以放置光纤的衬块(LiNiO₃晶片)带凹槽的

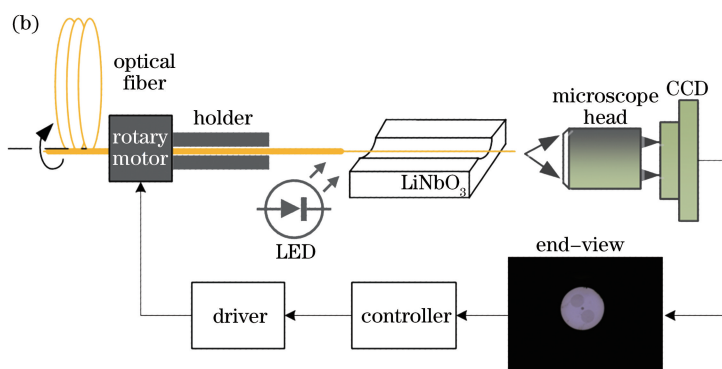
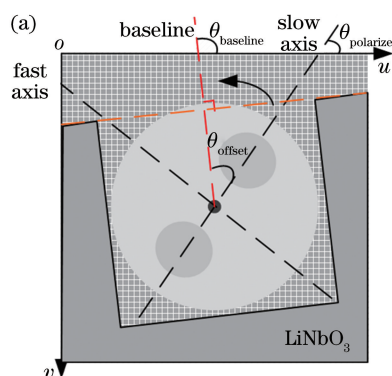


图 1 保偏光纤定轴示意图。(a)定轴过程;(b)定轴系统

Fig. 1 Schematic of polarization alignment of PMF. (a) Axis-fixed process; (b) axis-fixed system

2) 检测偏振轴与像素坐标系水平方向的夹角

$\theta_{polarize}$;

3) 计算两个角度的差值 θ_{offset} , 将光纤旋转 θ_{offset}

度,使偏振轴与基准方向重合。

由于旋转电机精度的限制,定轴过程无法一次完成,需要重复上述 2)、3) 步骤,逐步减小 θ_{offset} , 以完成定轴操作。因此,定轴的精度和效率在很大程度上取决于偏振轴检测算法的精度和速度。

从侧面对保偏光纤进行打光后,由于应力区和非应力区耦合进光量不同,端面呈现出明暗差异的“熊猫眼”形状,这是唯一能够区分偏振轴方向的特征。只有充分利用这一特征,才能提高检测精度。

对文献[10-14]进行大量研究,发现这些方法的实现细节虽有所不同,但基本思想都是通过检测熊猫型保偏光纤端面图像的两个应力椭圆区位置计算偏振轴角度,将该方法称为应力区定位(SRP)算法。

SRP 算法的实现可以概括为四步:1)图像预处理,去除背景噪声等;2)光纤端面定位,提取 ROI (region of interest)区域;3)应力区识别,包括图像的阈值分割、应力区轮廓边缘提取和中心定位;4)根据两个应力区的中心位置,计算得出偏振角度。

在良好实验条件下,SRP 算法取得了较高的检测精度,但针对更一般的实验条件,SRP 算法的稳健性较差(详见 4.3 节)。原因主要包括以下两个方面:

1) 应力区与非应力区的对比度不明显,这种差异反映到图像上仅为 10~25 个灰度差值(假设图像空间的灰度值为 0~255)。光纤旋转时耦合进光量会随着光纤的转动而发生周期性变化^[8],当进光量较低或较高时,图像灰度直方图几乎呈现单峰性,导

一面的垂直方向为定轴基准,检测该方向与像素坐标系水平方向的夹角 $\theta_{baseline}$;

致图像阈值分割具有较高的难度。光纤端面在剥除涂覆层或者切割的过程中容易受到灰尘等干扰,出现细小裂纹或切割痕,再加上端面杂质区域、纤芯区域的灰度值与应力区和非应力区边界处的灰度值相近,图像识别时错误分割的可能性显著增加。

2) 光纤刚性较差,再加上光纤夹持器加工精度低等,光纤在旋转时往往会发生弯曲,导致端面前后蠕动。如图 2 所示,光纤夹持点为 O 点,虚线表示初始状态下的光纤,端面位于 P_1 平面内;实线表示旋转时弯曲后的光纤,此时端面向后移动到 P_2 平面位置。通常显微物镜清晰成像的景深一般为 $\pm 30 \mu\text{m}$,这就就会导致采集的部分图像存在离焦模糊、运动模糊等问题,使得轮廓特征提取难度更大。尽管可以对相机进行手动或自动调整以实现重新对焦,但效率又会显著降低。



图 2 光纤旋转时端面的前后蠕动现象

Fig. 2 Front-back creeping phenomenon of end face during fiber rotation

3 对称性检测法

保偏光纤的端面图像通常是一个严格的镜像对称结构,其对称轴的检测过程就是偏振轴检测的过程。由于对称特征不依赖于边缘点的位置精度,对图像边缘清晰度的要求大大降低,从而提高了算法的稳健性。

图像对称性检测一直都是计算机图像分析领域的重要研究内容^[15-19]。目前,图像对称性检测方法

主要包括模式匹配法、优化搜索法、统计法、曲线微分法等^[20]。为了实现更加快速、精确的对称检测,本研究提出 SE 算法,该算法主要包括光纤端面定位、图像极坐标变换、图像对称性评估和最优对称轴搜索 4 个步骤。

3.1 光纤端面定位

CCD 采集图像的尺寸较大,直接处理时会导致数据量过大,因此需要寻找端面目标,使其与背景区分开。由于光纤形状规则,通过一次阈值分割和圆检测就可实现这一过程。算法流程如下:

- 1) 预处理原始采集图像,使用大津法分割目标前景,得到二值化图像;
- 2) 在二值图像中提取光纤端面外轮廓,并对轮廓进行圆拟合,确定光纤端面的中心坐标 (u_o, v_o) 和半径 R ;
- 3) 根据中心坐标和半径分割得到目标图像。

3.2 图像极坐标变换

为了快速检测到图像的对称轴,对目标图像进

行极坐标系变换。首先,在原图像坐标系 $o-uv$ 中建立一个以光纤中心 o 点为原点的直角坐标系 $o-xy$,如图 3 所示。在该坐标系下,任意一个点 (x_i, y_j) 的灰度值为 $g(x_i, y_j)$,其中 i 和 j 为循环变量,则有

$$\theta(x_i, y_j) = \arctan(y_j/x_i) \cdot 180^\circ/\pi, \quad (1)$$

$$\rho(x_i, y_j) = \sqrt{y_j^2 + x_i^2}. \quad (2)$$

定义距离缩放因子 α_ρ 和角度缩放因子 α_θ ,建立一个像素坐标系 $o-\rho\theta$,横坐标 ρ 表示经过 α_ρ 缩放后的距离,纵坐标 θ 表示经过 α_θ 因子缩放后的角度,则任意一点 (ρ_m, θ_n) 都可以在原 $o-uv$ 坐标系中找到 (x_i, y_j) 点与之对应(m, n 均为循环变量)。即有

$$\rho_m = \alpha_\rho \cdot \rho(x_i, y_j), \quad (3)$$

$$\theta_n = \alpha_\theta \cdot \theta(x_i, y_j). \quad (4)$$

换言之,在两个坐标系中建立了一个映射关系:

$$g(x_i, y_j) \leftrightarrow g(\rho_m, \theta_n). \quad (5)$$

由于实际的像素坐标是离散的,因此需要对(5)式的变换结果进行取整或线性插值。坐标系变换过程如图 3 所示,图 4 所示为实际采集图像的坐标变换。

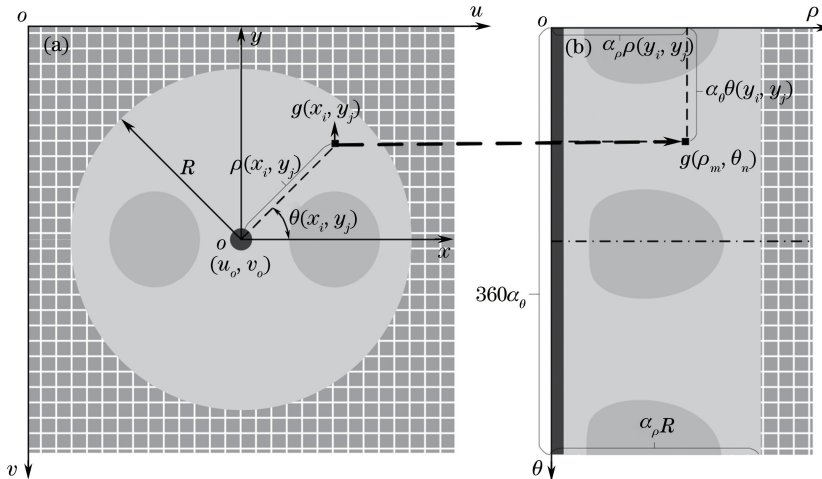


图 3 坐标系变换。(a)原始图像;(b)变换后图像

Fig. 3 Transformation of coordinate system. (a) Original image; (b) transformed image

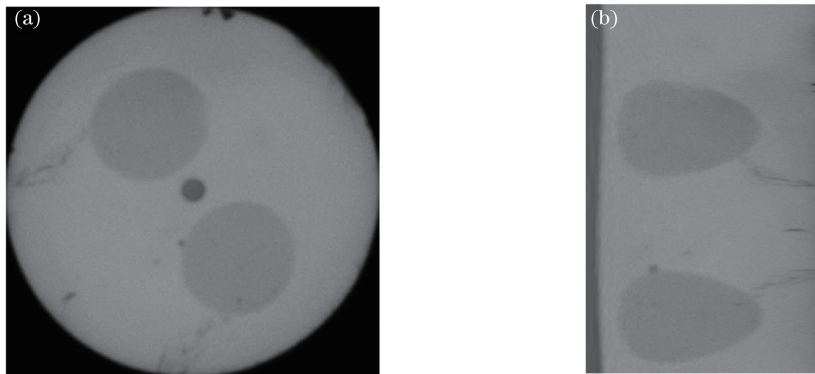


图 4 实际图像的坐标变换。(a)原始图像;(b)变换后图像

Fig. 4 Coordinate transformation of actual image. (a) Original image; (b) transformed image

实际测量角度分辨率除了与 α_θ 相关外,还受到图像采集系统分辨率的影响。例如,算法定位精度为单个像素距离,角度分辨率要达到 0.1° ,检测目标大小须超过 573 pixel。选用 Mindvision 公司的 MV-UB500C 工业相机,尺寸为 1/2.5 inch (1.016 cm),分辨率为 2592 pixel \times 1944 pixel,像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$,使用大恒光电的 GCO-2132 显微镜镜头,其最高放大倍率为 20 倍。直径为 $80 \mu\text{m}$ 光纤端面的成像大小约为 720 pixel,角度分辨率约为 0.08° 。上述分析可知,受图像采集系统物理分辨率限制,过大的 α_θ 和 α_ρ 增加了数据处理量,但对精度的提高意义不大。因此,统一取 $\alpha_\theta = 10$, $\alpha_\rho = 1$ 。

3.3 图像对称性评估

3.2 节已经通过坐标变换,将镜像对称检测问

题简化为平移对称性检测问题。变换坐标后的图像(假设为 M 行 N 列),每一行代表一个角度方向。接下来,通过以下三步计算图像关于某一轴向的对称性。

第一步,图像割补。如图 5 所示,以 $\theta=l$ ($l=0, 1, \dots, (M/2-1)$, 表示某一轴向)为界,将图像分成两个等大的子图像 $f_l^{(1)}$ 和 $f_l^{(2)}$ (上角标 1 和 2 用以区分两个子图像)。 $f_l^{(2)}$ 由一次图像割补运算得到。

$$f_l^{(1)}(i, j) = g(l + i, j), \quad (6)$$

$$f_l^{(2)}(i, j) = \begin{cases} g(l + i + M/2, j), & \text{if } i < (M/2 - l) \\ g(l + i - M/2, j), & \text{if } i \geq (M/2 - l) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $i=0, 1, \dots, M/2-1; j=0, 1, \dots, N-1$ 。

第二步,翻转变换。将 $f_l^{(2)}$ 做一次水平翻转变换,得到 $\tilde{f}_l^{(2)}$:

$$\tilde{f}_l^{(2)}(i, j) = f_l^{(2)}(M/2 - i, j) = \begin{cases} g(l - i + M, j), & \text{if } i < (M/2 - l) \\ g(l - i, j), & \text{if } i \geq (M/2 - l) \end{cases}. \quad (8)$$

第三步,对比评估。定义图像关于 $\theta=l$ 的对称性 S_l :

$$S_l = \frac{-2}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{M/2-1} \sum_{j=0}^{N-1} |f_l^{(1)}(i, j) - \tilde{f}_l^{(2)}(i, j)|. \quad (9)$$

S_l 的值越大,说明图像关于 $\theta=l$ 轴向的对称性越高。

3.4 最优对称轴搜索

3.3 节实现了对图像关于 $\theta=l$ 方向的对称性评估,那么寻找最佳对称轴向问题就转换为搜索(9)式对称性 S_l 最大时 l 的取值问题:

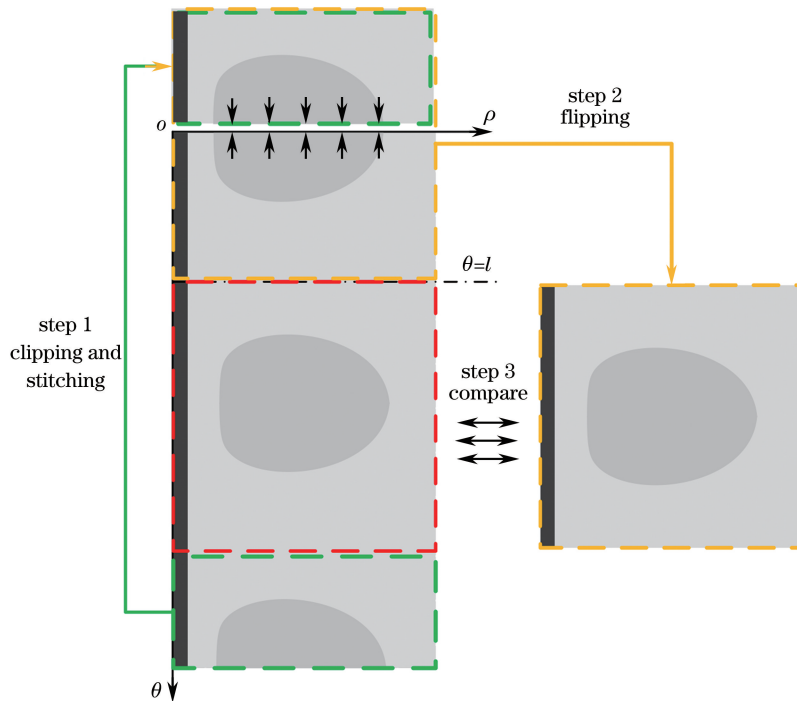


图 5 对称性评估步骤($\theta=l$)

Fig. 5 Steps for symmetry evaluation ($\theta=l$)

$$\max\{S_l\} \Rightarrow l_{\text{symmetry}} \quad (10)$$

采用遍历搜索方法, 可以找到一个最佳对称位置, 但是当 α_θ 增大时, 计算开销随之增大。例如, 当 $\alpha_\theta = 10, \alpha_\rho = 1$ 时, 直接遍历法搜索需要对 (9) 式计算 1800 次, 若采用金字塔搜索法 (图 6) 进

行最优对称轴检测, 仅需计算 243 次。金字塔搜索法自金字塔顶端向下搜索, 逐步减少搜索范围, 在保证检测精度的同时, 大大减少了求解 S_l 的次數。因此, 本研究采用金字塔搜索法进行最优对称轴检测。

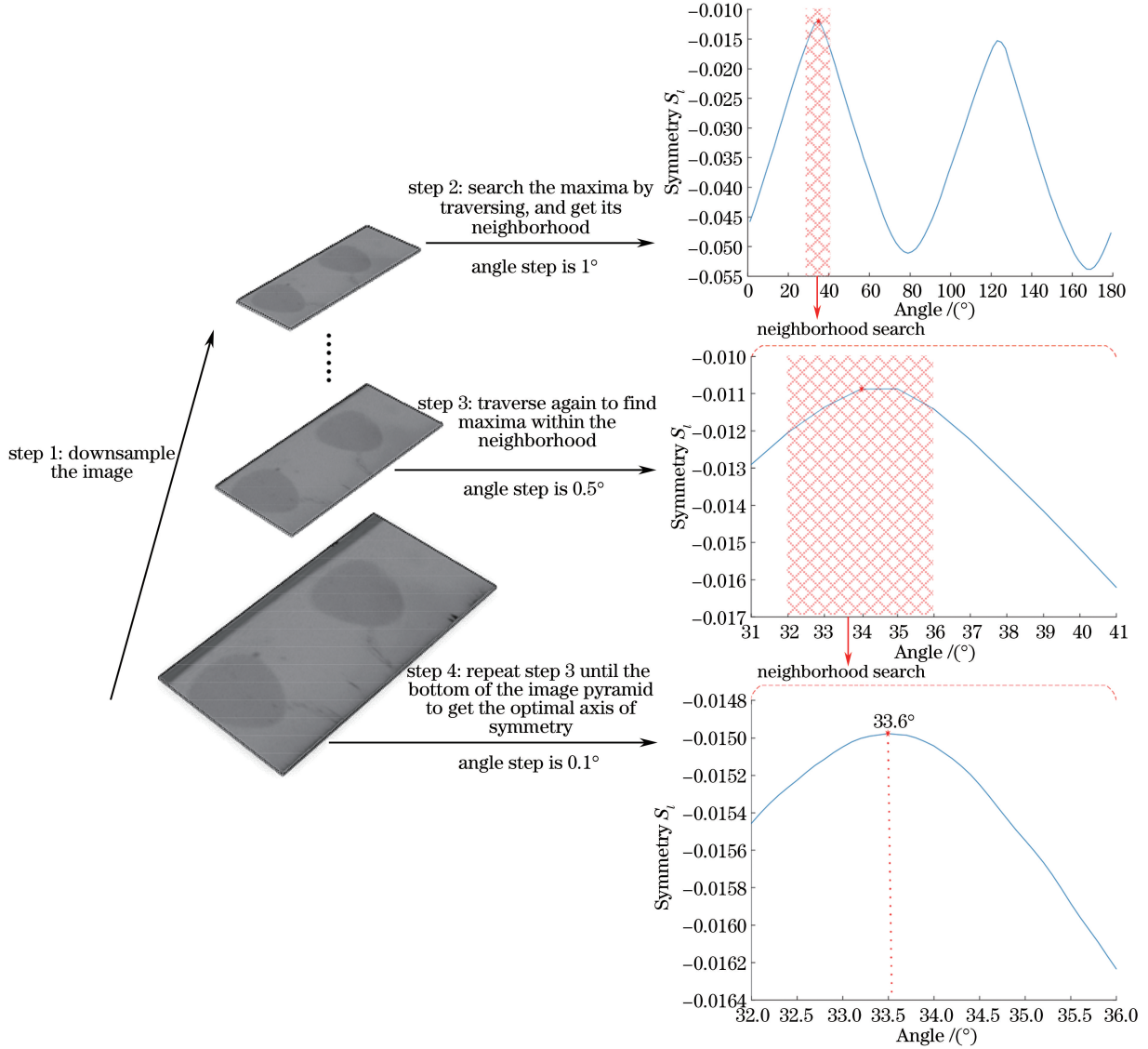


图 6 金字塔搜索步骤示意图

Fig. 6 Schematic of steps for pyramid searching

需要注意的是, 以上检测到的最优对称轴可能是保偏光纤的慢轴, 也可能是保偏光纤的快轴。与快轴不同的是, 慢轴通过应力区, 灰度变化大,

且平均灰度值小。因此, 最优对称方向及其正交方向的两个图像窗口内的平均灰度值 G_1 和 G_2 可表示为

$$G_1 = \begin{cases} \frac{1}{2\delta \cdot N} \sum_{i=-\delta}^{\delta-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(l_{\text{symmetry}} + i, j), & \text{if } l_{\text{symmetry}} \geq \delta \\ \frac{1}{2\delta \cdot N} \left[\sum_{i=-l_{\text{symmetry}}}^{\delta-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(l_{\text{symmetry}} + i, j) + \sum_{i=-\delta}^{-l_{\text{symmetry}}-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(M + i, j) \right], & \text{else} \end{cases}, \quad (11)$$

$$G_2 = \frac{1}{2\delta \cdot N} \sum_{i=-\delta}^{\delta-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(l_{\text{symmetry}} + 90 \cdot \alpha_\theta + \delta, j). \quad (12)$$

通过比较 G_1 和 G_2 的大小,进一步区分出慢轴方向 θ_{polarize}

$$\theta_{\text{polarize}} = \begin{cases} l_{\text{symmetry}}/\alpha_{\theta}, & \text{if } G_1 < G_2 \\ l_{\text{symmetry}}/\alpha_{\theta} + 90, & \text{else} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: δ 为半宽值。它的取值与应力区域有关,一般按照经验公式取值:

$$\delta = \text{int}(360 \cdot \alpha_{\theta} \cdot 10\%), \quad (14)$$

式中: $\text{int}(\ast)$ 为取整操作。

4 实验对比分析

4.1 准确性测试

为验证本文算法的准确性,对同一种型号的熊猫型偏偏光纤(细径为 $80 \mu\text{m}$)多次采集端面图像(图 7),统计其平均尺寸大小和灰度特征,结果如表 1 所示。然后,在 MATLAB 软件中编写程序,制作不同偏振轴角度的标准图像用于实验测试,图像的大小均为 $D \times D$ (其中 $D=720 \text{ pixel}$)。

相机在采集图像时往往会受到噪声(主要包括高斯噪声、椒盐噪声和乘性噪声)、光纤端面表面杂质、离焦模糊等因素的干扰,为模拟这些因素对算法

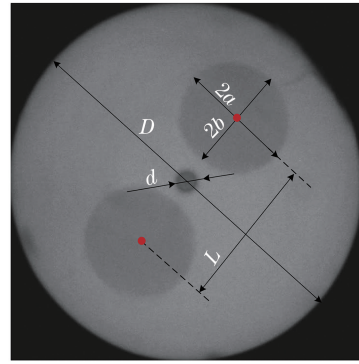


图 7 实际的光纤端面

Fig. 7 Actual image of fiber end face

的影响,设计 A~F 共 6 组,参数如表 2 所示。实验中,除 A 组为理想状态外,B~F 组均包含噪声(方差分别为:高斯噪声 0.001、椒盐噪声 0.0001、乘性噪声 0.001)和离焦模糊。根据成像系统的点扩散模型,离焦模糊可等价为一个低通滤波器,模糊圆半径 R 越大,低通滤波器的截止频率越小,离焦模糊现象越严重^[21]。C~F 组的杂质点由高斯分布函数模拟生成,其中心位置随机分布于光纤端面上。应力区与非应力区的灰度差则反映了图像的对比度。

表 1 光纤端面尺寸

Table 1 Size of fiber end face

Parameter	Diameter or length /pixel	Parameter	Diameter or length /pixel
Diameter of fiber cladding (D)	720	Center distance (L)	322
Length of long axis ($2a$)	228	Core diameter (d)	39
Length of short axis ($2b$)	211		

表 2 6 组图像的光纤端面参数

Table 2 Parameters of fiber end face for six sets of images

Group	A	B	C	D	E	F
Image noise /(yes or no)	no	yes	yes	yes	yes	yes
Radius of fuzzy circle /pixel	0	8	8	12	12	12
Number of impurities	0	0	5	5	5	5
Difference in gray level between stress area and non-stress area /(gray scale)	20	20	20	20	18	16

A~F 组中每一组都包含从 $0^\circ \sim 90^\circ$,间隔为 1° 的 91 张仿真图像。图 8 所示为每组中的一张图像。

对 A~F 组中每一帧图像分别应用 SE 算法和文献[14]的 SRP 算法计算偏振轴角度 θ_{measure} ,并与真实值 θ_{real} 进行比较,得到各自误差绝对值,然后按组取平均值后,得到平均误差绝对值:

$$\zeta = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\theta_{\text{measure}} - \theta_{\text{real}}|, \quad (15)$$

式中: k 为图像序号; N 为每组图像的总个数; θ_{real} 为偏振轴角度真值; θ_{measure} 为算法检测出的偏振轴角度值。各组计算得到的 ζ 如图 9 所示。

从 A 组实验结果可以看出,所提 SE 算法在理想状态下的检测结果具有无偏性。从 B、C 两组的对比可以看出,对于随机分布的杂质干扰,SE 算法具有较强的抗干扰能力。SE 算法原理上利用了对称性评估,但对于非完全对称的端面图像,仍然

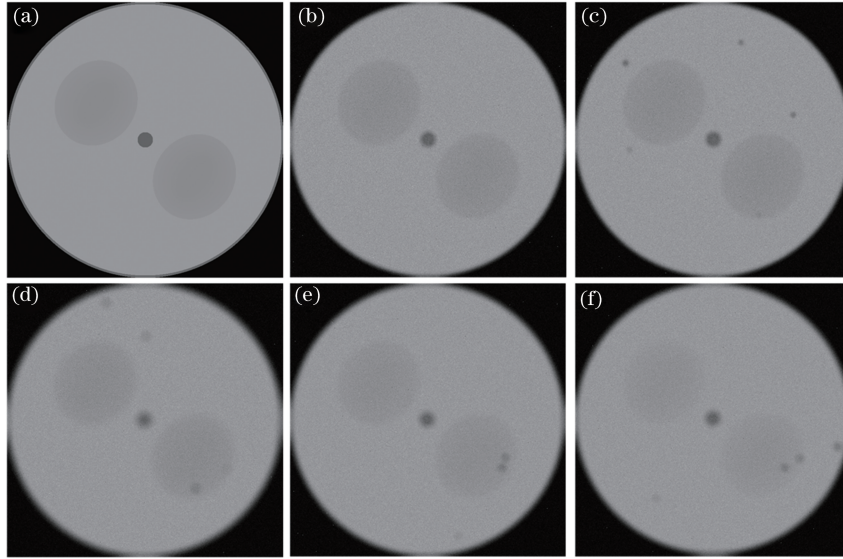


图 8 6 组仿真图像样本。(a) A 组;(b) B 组;(c) C 组;(d) D 组;(e) E 组;(f) F 组

Fig. 8 Six groups of simulated image samples. (a) Group A; (b) group B; (c) group C; (d) group D; (e) group E; (f) group F

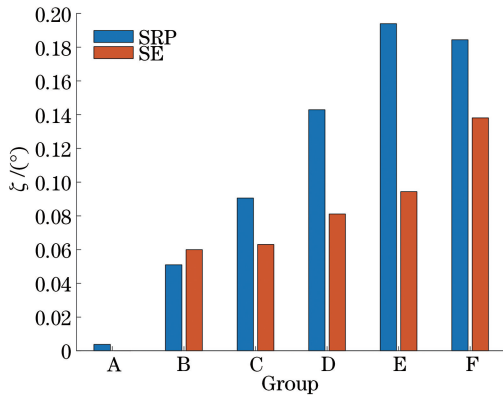


图 9 6 组图像检测结果

Fig. 9 Detection results of six groups of images

有较强的检测能力。

B~F 组实验结果表明:在不同离焦度、图像对比度和杂质干扰情况下,SE 算法的检测误差更小;实验中,F 组是端面图像质量比较极端的情况,一般情况下,端面图像质量应处于 B~E 组的水平。因此,SE 算法能够实现 $\pm 0.1^\circ$ 的检测准确度。

4.2 精确性测试

为了验证算法的检测精确性,即检测结果的离散程度,在不同的光照环境下采集 10 组光纤端面图像,每组连续采集 500 幅,分别使用 SRP 算法和 SE 算法计算每组图像偏振轴角度的测量不确定度,以标准差 σ_θ 表示:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\theta_k - \bar{\theta})^2}{N - 1}}, \quad (16)$$

式中: $\bar{\theta}$ 为某一组所有图像偏振轴角度的均值; θ_k 为该组中第 k 次偏振轴角度测量值; N 为每组检测图像的数量。

从表 3 所示检测结果的标准差可以看出,与 SRP 算法相比,SE 算法偏振轴角度检测的标准差较小,仅为 0.0336° ,表明该算法具有更高的检测稳定性和精确性。根据拉依达准则,SE 算法的重复检测精确度可以达到 $\pm 0.1^\circ$ 。

表 3 SRP 算法和 SE 算法的标准差比较

Table 3 Standard deviation comparison between SRP and SE algorithms

Group	Standard deviations $\sigma_\theta / (^\circ)$	
	SRP	SE
1	0.0585	0.0510
2	0.1442	0.0346
3	0.0868	0.0465
4	0.0373	0.0027
5	0.0956	0.0484
6	0.0895	0.0383
7	0.0585	0.0285
8	0.0974	0.0437
9	0.0388	0.0148
10	0.0717	0.0271
Mean	0.0778	0.0336

4.3 稳健性和速度测试

为了进行稳健性测试,在实际环境下,采集多组图像。对每一组的第 k 张图像分别应用两种算法得到角度 θ_k ,然后利用图像旋转算法将图像旋转

ϵ_t , 再次检测得到 $\theta_k^{(\epsilon_t)}$ 。计算两次检测得到的角度差, 并与真实差值 ϵ_t 进行比较, 然后继续改变旋转角度为 ϵ_{t+1} , 重复上述步骤计算 T 次并取其平均值得到 e_k :

$$e_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |\theta_k^{(\epsilon_t)} - \theta_k - \epsilon_t|, \quad \epsilon = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_N\}, \quad (17)$$

$$\epsilon_t = 90^\circ \cdot \beta_{\text{random}}, \quad \beta_{\text{random}} \in (0, 1), \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (18)$$

为了进一步比较 SRP 算法和 SE 算法的稳健性, 对每一张图的检测结果量化评分为 6 个等级:

$$E_k = \begin{cases} L_{\text{level}0}, & \text{if } e_k \leq 0.05^\circ \\ L_{\text{level}1}, & \text{if } 0.05^\circ < e_k \leq 0.1^\circ \\ L_{\text{level}2}, & \text{if } 0.1^\circ < e_k \leq 0.2^\circ \\ L_{\text{level}3}, & \text{if } 0.2^\circ < e_k \leq 0.3^\circ \\ L_{\text{level}4}, & \text{if } 0.3^\circ < e_k \leq 0.4^\circ \\ L_{\text{level}5}, & \text{if } e_k > 0.4^\circ \end{cases}, \quad (19)$$

式中: 下标 level n 代表不同的精度水平, 后面的数字 n 越小, 说明检测结果越精确。正如第 2 节中所

介绍, 偏振轴检测结果最终要应用于保偏光纤的定轴控制, 检测精度至少要在 $L_{\text{level}2}$ 以上。如果检测中出现 $L_{\text{level}5}$ 的结果, 往往会导致定轴操作失败。

下面将从光照条件和离焦程度两方面对算法的稳健性进行测试。在不同光照条件下, 对同一光纤同一位置连续采集三组图像(每组 500 张), 对各组检测结果进行统计, 得到 $L_{\text{level}0} \sim L_{\text{level}5}$ 的比例分布统计(图 10)。然后在光照条件良好情况下, 控制相机固定于不同的离焦位置, 连续采集三组图像(每组 500 张), 结果统计如图 11 所示。

实验结果表明: 在对焦清晰、光照条件良好情况下, SRP 和 SE 两种算法检测结果分布相当; 当光纤耦合进光量较低或者对焦不清晰时, SRP 算法的 $L_{\text{level}5}$ 检测数据明显增多, 而 SE 算法尽管出现了检测精度下降的情况, 但仍然稳定分布于 $L_{\text{level}0} \sim L_{\text{level}1}$ 范围内, 具有较强的稳健性。算法检测速度方面: SRP 算法平均每张图像的处理时间是 0.889 s; SE 算法为 0.367 s, 检测速度相比 SRP 算法提升近 1.5 倍。

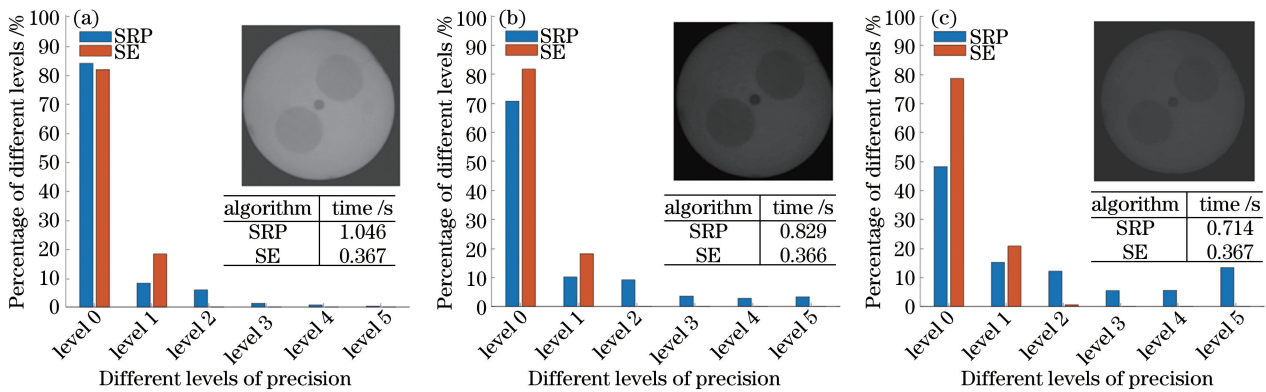


图 10 不同光照条件下两种算法的检测结果。(a)光照条件良好;(b)光照条件中等;(c)光照条件较差
Fig. 10 Detection results for two algorithms under different lighting conditions. (a) Good lighting condition; (b) medium lighting condition; (c) poor lighting condition

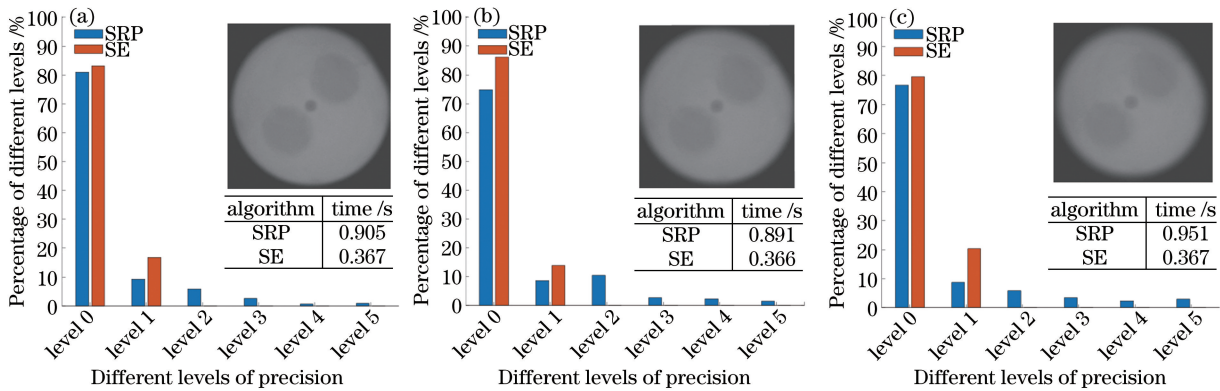


图 11 不同离焦距离下两种算法的检测结果。(a) 20 μm ; (b) 40 μm ; (c) 60 μm
Fig. 11 Detection results for two algorithms under different defocus distances. (a) 20 μm ; (b) 40 μm ; (c) 60 μm

5 结 论

为解决 SRP 偏振轴检测算法稳健性较差、检测速度较慢等问题,提出一种基于对称性评估的偏振轴检测算法(SE 算法),利用一次坐标变换实现对图像对称度的快速计算,再通过图像金字塔搜索法实现最优对称轴的快速检测。由于图像对称性具有全局特征,其对边缘清晰度的要求显著降低,且对光照环境的敏感度更低,因此算法的检测速度更快,稳健性更强。与 SRP 算法相比,SE 算法几乎不需要提前设定阈值参数,真正实现偏振轴的自动化检测。从准确性、精确性、稳健性和速度 4 个方面的对比实验可以看出:理想情况下,两种算法准确度相当,在有干扰的环境下,SRP 算法的检测准确度受到显著影响,而 SE 算法的检测准确度仍然可以达到 $\pm 0.1^\circ$;多组实验结果表明,SE 算法检测精确度更高,检测结果更稳定;SRP 算法对光照条件和离焦模糊十分敏感,而 SE 算法检测稳健性更强;多组测试实验中,SE 算法检测速度更快,比 SRP 算法提升了近 1.5 倍。

综上所述,SE 算法能够准确、稳定、高效地实现偏振轴检测。本研究的讨论是以熊猫型保偏光纤为例,由于对称性是光纤结构中的常见特征,该算法可以进一步推广到其他种类保偏光纤的偏振轴检测,具有广泛的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] Fu H Y, Tam H Y, Shao L Y, *et al.* Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(15): 2835-2839.
- [2] Zu P, Chan C C, Lew W S, *et al.* Magneto-optical fiber sensor based on magnetic fluid[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(3): 398-400.
- [3] Zhou X J, Gong J J, Liu Y Z, *et al.* Analysis of white-light interference distributed optic fiber sensor by polarized modes coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 605-608.
周晓军, 龚俊杰, 刘永智, 等. 白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器分析[J]. *光学学报*, 2004, 24(5): 605-608.
- [4] Zu P, Xiang W H, Bai Y B, *et al.* A novel fiber Sagnac magnetic field sensor based on magnetic fluid[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806005.
祖鹏, 向望华, 白扬博, 等. 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806005.
- [5] Chen X W, Zhang H X, Jia D G, *et al.* Implementation of distributed polarization maintaining fiber polarization coupling pressure sensing system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1467-1472.
陈信伟, 张红霞, 贾大功, 等. 分布式保偏光纤偏振耦合应力传感系统的实现[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1467-1472.
- [6] Zhang X L, Zhou X J, Hu Y M, *et al.* All polarization-maintaining fiber earth magnetic field sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(11): 1515-1518.
张学亮, 周晓军, 胡永明, 等. 全保偏光纤地磁传感器[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1515-1518.
- [7] Yang J, Yuan Y G, Yu Z S, *et al.* Optical coherence domain polarimetry technology and its application in measurement for evaluating components of high precision fiber-optic gyroscopes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328007.
杨军, 苑勇贵, 喻张俊, 等. 光学相干域偏振测量技术及其在高精度光纤陀螺器件测量中的应用[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328007.
- [8] Yang X L, Wang X F, Zhang W, *et al.* Effect of the principal axes angle offsets on fiber optical gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7): 1658-1661.
杨学礼, 王学锋, 张蔚, 等. 对轴误差对光纤陀螺输出的影响[J]. *光子学报*, 2009, 38(7): 1658-1661.
- [9] Rong W B, Zhang W, Wang L F, *et al.* Simulation and experiment on automatic polarization alignment of fine polarization maintaining fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1205002.
荣伟彬, 张伟, 王乐锋, 等. 细径保偏光纤自动对轴的仿真与实验[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1205002.
- [10] You J M, Tao L. Image identification algorithm on polarization axis of panda polarization-maintaining fiber[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(2): 247-250.
游建民, 陶林. Panda 型保偏光纤偏振轴图像识别算法[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(2): 247-250.
- [11] Wang R, Li Y J, Zhang C X. An accurate detection method for polarization axis of panda polarization maintaining fiber based on image processing[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(4): 565-568.
王睿, 李燕杰, 张春熹. 基于图像处理的保偏光纤偏振轴高精度检测法[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(4): 565-568.
- [12] Liu Z H, Feng D, Yang D W, *et al.* Accurate detection technology for polarization axis of panda

- polarization-maintaining fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3388-3393.
- 刘振华, 冯迪, 杨德伟, 等. Panda 型保偏光纤偏振轴检测技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3388-3393.
- [13] Liu Z H, Feng D, Huang H B, *et al.* Research on automatic aligning method of panda polarization maintaining fiber with high accuracy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0206004.
- 刘振华, 冯迪, 黄怀波, 等. 高准确度熊猫保偏光纤自动定轴技术 [J]. *光子学报*, 2015, 44 (2): 0206004.
- [14] Huang H B, Feng D, Weng X Q, *et al.* Research on the detection of polarization axis of panda polarization maintaining fiber and the accuracy analysis[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26 (7): 1294-1300.
- 黄怀波, 冯迪, 翁晓泉, 等. 端面成像熊猫保偏光纤的偏振轴检测方法及精度分析[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(7): 1294-1300.
- [15] Chen Y, Sareh P, Feng J, *et al.* A computational method for automated detection of engineering structures with cyclic symmetries[J]. *Computers & Structures*, 2017, 191: 153-164.
- [16] Cicconet M, Birodkar V, Lund M, *et al.* A convolutional approach to reflection symmetry [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2017, 95: 44-50.
- [17] Elouaazizi A, Nasri A, Benslimane R. A rotation symmetry group detection technique for the characterization of Islamic Rosette Patterns[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2015, 68: 111-117.
- [18] Lee S, Liu Y X. Skewed rotation symmetry group detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(9): 1659-1672.
- [19] Yip R K K. Genetic Fourier descriptor for the detection of rotational symmetry[J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(2): 148-154.
- [20] Wu G, Yang J A, Li D L, *et al.* On the methods of symmetry detection of the plane images[J]. *Computer Science*, 2001, 28(5): 101-103.
- 吴刚, 杨敬安, 李道伦, 等. 平面图像的对称性检测方法研究[J]. *计算机科学*, 2001, 28(5): 101-103.
- [21] Huang D T. Study on auto-focusing method using image technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 11-18.
- 黄德天. 基于图像技术的自动调焦方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 11-18.