

doi: 10.3788/gzxb20154402.0206004

高准确度熊猫保偏光纤自动定轴技术

刘振华, 冯迪, 黄怀波, 杨德伟, 宋凝芳

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 保偏光纤偏振轴的检测和对准是保偏光纤应用中的关键技术。为提高基于端面成像的偏振轴检测方法的检测精度, 以熊猫型保偏光纤为研究对象, 采用基于曲面拟合的亚像素边缘检测算法和椭圆拟合算法提高检测的准确度, 采用多次测量取平均法提高检测的精确度; 利用检测结果的正态分布特性, 提出一种基于概率的偏振轴定轴方法。搭建了保偏光纤自动定轴系统并进行实验, 准确性验证实验结果表明: 亚像素边缘检测方法平均可以减小 45% 的偏差, 而拟合椭圆相较拟合圆平均可以减小 15% 的偏差; 精确性验证实验表明采用多次测量取平均的方法可以有效减少检测结果的离散程度; 定轴实验的结果表明, 基于概率的偏振轴定轴方法可以达到优于 0.1° 的定轴准确度。

关键词: 保偏光纤; 自动定轴; 端面成像; 曲面拟合; 亚像素

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0206004-5

Automatic Aligning Method of Panda Polarization Maintaining Fiber with High Accuracy

LIU Zhen-hua, FENG Di, HUANG Huai-bo, YANG De-wei, SONG Ning-fang

(Department of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The detection and alignment of polarization axis is a key technology in PMF's application. In order to improve the accuracy of the end face detection of polarization axis, a sub-pixel edge extraction method based on surface fitting was proposed to improve the accuracy and the normal distribution of the detection result was used to improve the precision. Based on the normal distribution of the detection result, a aligning method based on normal distribution was put forward. An automatic aligning system was established. The experiment shows the sub-pixel edge extraction method can decrease the error by 45% and the ellipse fitting can reduce the error by 15%. The alignment experiment figures out that the bias of aligning method based on probability is less than 0.1° .

Key words: Polarization maintaining fiber; Automatic alignment of polarization axis; Side-view imaging; Surface fitting; Sub-pixel

OCIS Codes: 060.2420; 230.2090; 060.2350

0 引言

保偏光纤对输入的线偏振光有比较强的偏振保持能力, 在干涉传感和相干光通信领域发挥着重要的作用。而保偏光纤偏振应力轴(简称偏振轴, 为两应力区中心的连线与基准线之间的角度)的测量和对准是保偏光纤应用中的关键技术^[1]。针对这个问题, 研究人员

做了深入的研究, 提出了许多保偏光纤偏振轴的定轴方法。其中基于侧视成像的方法居多, 有 PAS 法、POL 法^[2-4]、五指法^[5]、五点特征法、相衬法^[6]和背向衍射法^[7]等, 该类方法定轴准确度可以达到 $1^\circ \sim 1.5^\circ$, 主要应用于保偏光纤熔接; 此外还有白光干涉法和光弹效应法^[8], 分别可以达到 0.086° 和 0.125° 的定轴准确度, 但由于装置复杂、会损坏光纤等原因并没有得到广泛

基金项目: 国家重大科学仪器专项(No. 2013YQ040877)资助

第一作者: 刘振华(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为保偏光线定轴技术。Email: hua962464@126.com

导师(通讯作者): 冯迪(1972-), 男, 副教授, 主要研究方向为光纤传感及微结构光学。Email: fengdi@buaa.edu.cn

收稿日期: 2014-06-03; 录用日期: 2014-08-20

<http://www.photon.ac.cn>

的应用.文献[9]和文献[10]利用保偏光纤端面图像特征,通过图像处理法检测保偏光纤活动连接器的偏振轴方位.但前者对图像进行二值化处理使应力区边缘点只有像素级精度,而后者适用于拍摄环境比较理想的情况^[9],并且两者都只研究了对偏振轴的检测,并未涉及偏振轴的定轴.

为提高基于端面成像的偏振轴检测方法的检测精度,本文以熊猫保偏光纤为研究对象,采用基于曲面拟合的亚像素边缘检测算法和椭圆拟合算法提高了检测的准确度,采用多次测量取平均的方法提高了检测的精确度;并提出一种基于概率的偏振轴定轴方法.在理论研究基础上搭建保偏光纤自动定轴系统,实验验证了偏振轴检测算法改进的合理性,定轴实验结果表明,在本系统上基于概率的偏振轴定轴方法可以达到优于 0.1° 的定轴精度.

1 保偏光纤自动定轴技术研究

1.1 偏振轴检测技术

基于端面图像的偏振轴检测技术是通过图像处理法得到保偏光纤偏振轴和基准线之间的角度.在定轴过程中基准线保持不变,只需检测一次,因此检测算法只需实时检测偏振轴的角度.偏振轴检测流程如图1.

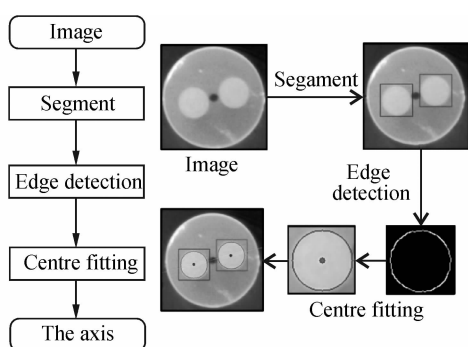


图1 偏振轴检测流程图

Fig. 1 Detection process of polarization axis

检测算法精度包含准确度和精确度,准确度表示检测值与真实值的接近程度;精确度则表示了检测结果的离散程度.由偏振轴的检测流程可以看出,决定偏振轴角度准确度的两个因素是:应力区的边缘点集的获取方法和应力区中心的拟合方法.

现有的偏振轴检测算法中,边缘检测精度为像素级,为了使边缘检测结果更加准确,提出一种基于曲面拟合的亚像素级的边缘检测算法.该算法先用Canny算子检测到像素级准确度的边缘,然后对边缘位置进行细化.细化时,先求取边缘像素点 $n \times n$ 邻域内的梯度图及该边缘点的梯度方向 (n_x, n_y) ,其中 $\|(n_x, n_y)\| = 1$,邻域灰度图如图2.

由图2可以看出,梯度图形状类似屋脊,梯度方向上的最高点即边缘位置.将梯度图拟合成一个曲面^[11],

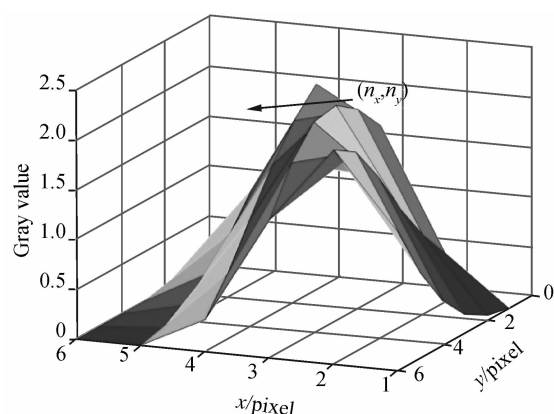


图2 邻域梯度图

Fig. 2 Gradient image

忽略掉高次项后有

$$f(x, y) = k_1 x^2 + k_2 y^2 + k_3 xy + k_4 x + k_5 y + k_6 \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 为曲面拟合结果,以中心像素作为坐标原点,则 $x = tn_x, y = tn_y$,令 t 为边缘在梯度方向的偏移量,式(1)就可以沿边缘方向表示为

$$f(t) = k_1 t^2 n_x^2 + k_2 t^2 n_y^2 + k_3 t^2 n_x n_y + k_4 t n_x + k_5 t n_y + k_6 \quad (2)$$

令 $\frac{\partial}{\partial t} f(t) = 0$,可得

$$t = -\frac{k_4 n_x + k_5 n_y}{2 \times (k_1 n_x^2 + k_2 n_y^2 + k_3 n_x n_y)} \quad (3)$$

若 $(tn_x, tn_y) \in [-0.5, 0.5] \times [-0.5, 0.5]$,则 (tn_x, tn_y) 为该点的亚像素边缘位置的偏移量.

得到边缘点集后,采用拟合椭圆的方法代替拟合圆的方法求取应力区中心的坐标,一方面圆是一种特殊的椭圆,另一方面,在试验中发现图像中应力区的形状并不是一个标准圆,实验验证了拟合椭圆的准确度更高.

在光纤不动的情况下,用本文的方法检测偏振轴,得到多组数据,对这些检测结果进行分析,发现其分布情况与正态分布相似,如图3.用 χ^2 检验对检测结果进行了检验,证明了检测结果的分布符合正态分布.

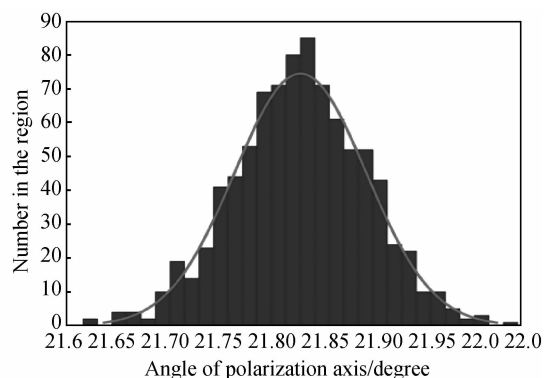


图3 检测结果的分布

Fig. 3 Distribute of detection result

在检测结果符合正态分布的前提下,通过多次测量取平均值的方法降低测量结果的标准偏差,取平均前后标准差关系为

$$\sigma_{ave} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

式中 σ 为单次测量的标准差, σ_{ave} 是 n 次测量取平均后结果的标准差. 这样, 在检测时间允许的情况下, 可以多次测量取平均值使得检测结果的精确度更高.

1.2 定轴方法

在定轴过程中, 需要设置判别条件使得定轴过程停止, 一般设置一个小的阈值, 当检测结果在该阈值内后就停止定轴, 实验发现, 这种方法会使产生定轴误差, 即

$$bias = T + k\sigma \quad (5)$$

式中 T 为设置的阈值, σ 为检测方法对应的标准偏差, k 为比例因子. 由式 (5) 可以看出, 除受所设阈值的影响之外, 该方法定轴精度会受检测结果的随机性的影响, 使得定轴精度不高. 为此, 提出一种基于概率的定轴方法, 该方法利用检测结果的正常分布的特性, 在偏振轴设定值附近设置邻域, 当真实值相对设定值有偏移时, 检测结果在该邻域的概率会降低.

当邻域设置为 $\pm\sigma$ 时, 真值相对于设定值偏移 0 时, 落在该区间的概率是 0.68, 当偏移了 0.5σ 时, 概率会降至 0.624 7, 当偏移 σ 时, 其概率降至 0.47. 利用这一特性, 可以在预定值附近设定一个 $\pm k\sigma$ 的区域, 光纤到离设定值较近的位置后 (阈值 th), 在同一位置连续测量 n 次, 计算检测结果落在 $k\sigma$ 中的概率 p , 判断 p 是否大于指定阈值 P_{th} 作为定轴过程的停止依据, 该方法的流程如图 4.

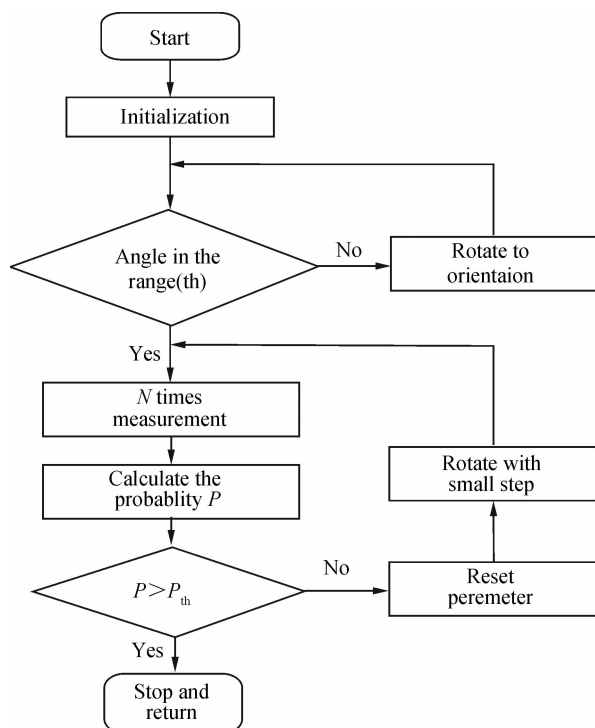


图 4 定轴方法流程图

Fig. 4 Process of alignment

2 实验验证

2.1 保偏光纤自动定轴系统

如图 5 所示, 保偏光纤自动定轴系统由显微镜、CCD、PC 机、控制器、驱动器、光纤旋转器组成. 系统工作前, 先用剥纤钳剥除保偏光纤的一小段涂覆层, 并用宝石刀切除一部分裸纤; 系统工作时, 将保偏光纤夹持在旋转器的夹具中, 保偏光纤前端放置在衬块凹槽中, 光纤端面经显微镜放大后由 CCD 接收并传送至 PC 机, PC 机采用偏振轴检测技术处理图像数据得到偏振轴角度并发送给控制器, 控制器依据偏振轴角度计算光纤的旋转量, 并控制驱动器驱动光纤旋转器转动, 整个系统构成一个闭环, 可以实现自动定轴.

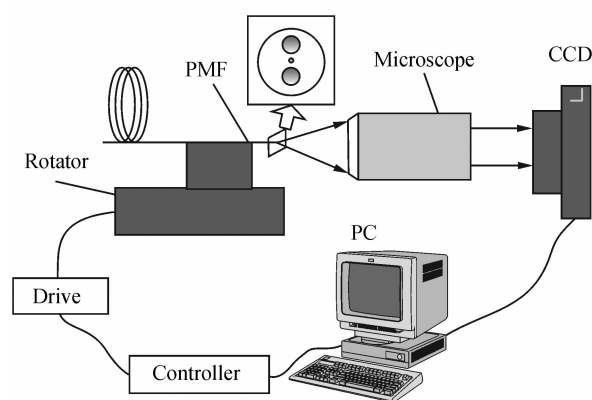


图 5 保偏光纤自动定轴系统

Fig. 5 Automatic aligning system

2.2 准确性验证实验

为了提高检测的准确性, 采用了亚像素级的边缘检测算法检测边缘, 并用拟合椭圆法代替拟合圆法.

定义圆的拟合误差为所有边缘点到圆的拟合中心的距离误差的绝对值之和, 即

$$bias = \sum |\sqrt{(x_i - A)^2 + (y_i - B)^2} - R| \quad (6)$$

式中 x_i, y_i 为检测到的边缘点坐标, (A, B) 为圆心坐标, R 为圆半径.

对于椭圆, 利用椭圆上的点到两焦点距离之和和相等的条件, 将拟合误差定义为所有边缘点到两焦点距离之和的误差之和的一半, 即

$$bias = 0.5 \times \sum |\sqrt{(x_i - A)^2 + (y_i - B)^2} + \sqrt{(x_i - A_1)^2 + (y_i - B_1)^2} + \sqrt{(x_i - A_2)^2 + (y_i - B_2)^2} - L| \quad (7)$$

式中 (x_i, y_i) 为检测到的边缘点坐标, $(A_1, B_1), (A_2, B_2)$ 为拟合得到的椭圆的两个焦点坐标, L 为由椭圆上的点到两焦点的距离之和, 由拟合得到的参量求得.

分别使用 Canny 边缘检测算子和亚像素级边缘检测算法检测边缘, 得到的边缘点集分别用来拟合圆和椭圆, 并计算拟合偏差, 得到表 1.

表 1 不同方法拟合偏差对比表

Table 1 Comparison of fitting bias of different method Sample

Sample	Canny			Subpixel		
	Bias of fitting circle	Bias of fitting ellipse	Decreased ratio	Bias of fitting circle	Bias of fitting ellipse	Decreased ratio
1	138.701	118.461	14.59%	81.111 6	67.623 1	16.63%
2	125.554	113.44	9.65%	67.218 4	53.957 5	19.73%
3	104.987	92.751 8	11.65%	53.020 9	49.499 3	6.64%
4	103.141	90.545 1	12.21%	49.350 1	46.161 3	6.46%
5	136.182	124.159	8.83%	75.157 7	61.808 4	17.76%
6	119.412	97.666 7	18.21%	59.964 7	48.415 9	19.26%
7	130.693	117.481	10.11%	75.945 6	57.788 9	23.91%
8	129.98	99.304 5	23.60%	74.549 5	55.192 2	25.97%
9	128.032	100.26	21.69%	72.373 1	53.937 5	25.47%
10	122.309	97.358 3	20.40%	62.937	47.982 4	23.76%

从表 1 中可以计算出对于同样的拟合算法,使用亚像素边缘检测方法得到的拟合误差要小很多,偏差平均减小 45%;同样的边缘检测方法,使用椭圆拟合,相比圆拟合偏差平均减小 15%,这说明采用亚像素边缘检测算法和拟合椭圆算法更合理。

2.3 精确性验证实验

采集多组数据,每组多于 500 个测量值,用 χ^2 检验的方法验证其是否符合正态分布,检验结果表明检测结果符合正态分布。

确定符合正态分布后,使用 n 次测量取平均值的方法采集 3 组数据,并用极大似然估计法估计了测量结果的标准差,检测结果如图 6。

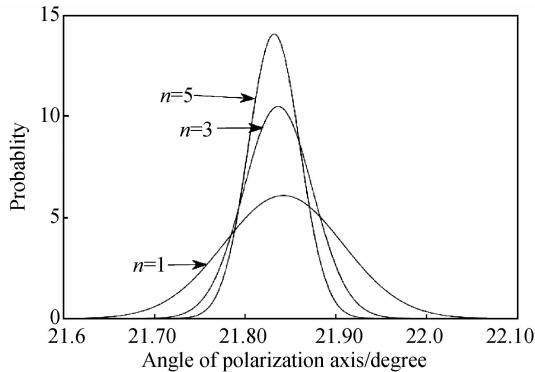


图 6 极大似然估计结果

Fig. 6 Estimated result of maximum likelihood

由图 6 可以看出,在样本符合正态分布的前提下,采用多次测量取平均的方法可以降低测量值的离散程度,所以在时间允许的情况下可以采用这种方法来提高检测精确度。

2.4 定轴实验

在定轴系统的基础上,采用本文的偏振轴检测技术,分别用基于概率的定轴方法和设定小阈值的方法定轴 10 次,每次定轴完成后,驱动光纤使其偏离设定值以便下一次定轴。其中小阈值的方法设定阈值为士

0.05°,基于概率的方法的 k 设置为 1(检测结果方法的标准差 σ 为 0.08°),每测量 30 次计算一次概率,概率阈值 P_{th} 设置为 0.62。定轴完成后,测量 50 次取平均值作为偏振轴位置的真值,并与给定值做差得到定轴误差。定轴误差如图 7。

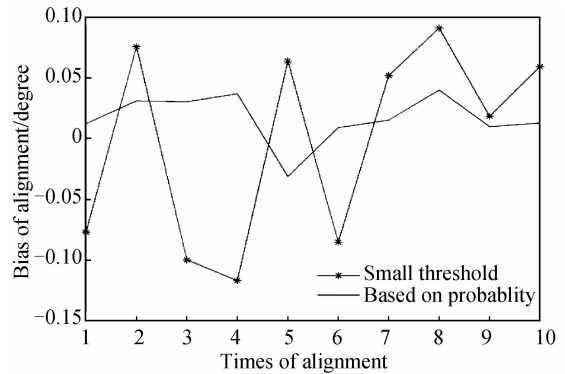


图 7 不同方法的定轴误差

Fig. 7 Aligning bias of different method

由图 7 可以看出,采用基于概率的定轴方法其定轴准确度相较于设定阈值的方法定轴精度更高,在 $\pm 0.04^\circ$ 的范围内;并且采用基于概率的方法定轴结果更加稳定,没有太大的偏移值,说明这种定轴方法可以避免检测结果的随机性对定轴精度的影响。

3 结论

本文搭建了保偏光纤自动定轴系统,可以实现保偏光纤的自动定轴。在定轴系统的基础上从准确性和精确性两方面改进了偏振轴检测算法,实验表明,本文对检测算法的改进使得准确性和精确性均有提升;利用检测结果的正态分布特性,提出了基于概率的定轴方法,定轴实验结果表明该方法可以达到由于 0.1° 的定轴准确度。

参考文献

- [1] LIU Fu-min, HUANG Tao, LI Rui-long, *et al.* Influence on extinction ratio of Y waveguide by external stress[J]. *Acta*

- Photonica Sinica*, 2011, **40**(11):1636-1640.
- 刘福民,黄韬,李瑞龙,等. 外应力对 Y 波导器件尾纤消光比的影响[J]. 光子学报, 2011, **40**(11):1636-1640.
- [2] ZHEN Zong-min, YANG Yuan-hong. On-line adjusting axes technology of polarization maintaining fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(09):1060-1063.
- 甄宗民,杨远洪. 保偏光纤在线定轴技术研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(09):1060-1063.
- [3] WU Lie-yu, ZHENG Yu, WANG Jin-e, et al. Research of azimuthal alignment for PANDA fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(07):1224-1229.
- 吴宇列,郑煜,王金娥,等. 熊猫型保偏光纤定轴仿真研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(07):1224-1229.
- [4] RONG Wei-bin, ZHANG Wei, WANG Le-feng, et al. Simulation and experiment on automatic polarization alignment of fine polarization maintaining fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(12):136-141.
- 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):136-141.
- [5] CHEN Shao-ying, DI Hong-wei, CHEN Zhe, et al. Azimuthal alignment method for PM fiber based on light intensity distributions with five finger profile[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(01):35-38.
- 陈少英,狄红卫,陈哲,等. 基于五指型光强分布的保偏光纤定轴方法[J]. 应用激光, 2006, **26**(01):35-38.
- [6] HU Yong-ming, CHEN Zhe, LIAO Yan-biao, et al. Computer simulation of phase Panda fiber of contrast alignment of birefringent axes in matching refractive-index [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, **25**(08):715-721.
- 胡永明,陈哲,廖延彪,等. 匹配型熊猫光纤的相衬法定轴技术的仿真分析[J]. 中国激光, 1998, **25**(08):715-721.
- [7] ZHONG Zhen, CHEN Zhe, ZHONG Jin-gang, et al. Determination of the azimuth of polarization axes of PANDA fiber based on the image correlation of backward diffractive pattern[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(06):1409-1413.
- 钟振,陈哲,钟金钢,等. 熊猫光纤背向衍射图样的图像互相关定轴方法[J]. 光子学报, 2009, **38**(06):1409-1413.
- [8] WANG Dong-yun, LIU Cheng, SHU Xiao-wu, et al. Accurate alignment of PM fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(03):345-348.
- 王冬云,刘承,舒晓武,等. 保偏光纤精确定位方法的研究[J]. 光子学报, 2002, **31**(03):345-348.
- [9] WANG Rui, LI Yan-jie, ZHANG Chun-xi. An accurate detection method for polarization axis of panda polarization maintaining fiber based on image processing [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **21**(04):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**(04):565-568.
- [10] YOU Jian-ming, TAO Lin. Image identification algorithm on polarization axis of p and apolarization-maintaining fiber [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, **13**(02):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**(02):247-250.
- [11] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Trans*, 1998, **20**(2):113-125.
- [12] YAN Bei, WANG Bin, LI Yuan. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, **34**(3):295-298.
- 闫蓓,王斌,李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, **34**(3):295-298.
- [13] SHANG Fei, WANG Feng-gui, TIAN Di, et al. A method for circle detection based on right triangles inscribed in a circle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(04):739-743.
- 商飞,王丰贵,田地,等. 一种基于圆内接直角三角形的圆检测方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(04):739-743.
- [14] HUANG Lin-sheng, ZHANG Jun, CHEN Zhe, et al. Simulation and experiments analysis of azimuth aligning technology for polarization maintaining fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(02):279-284.
- 黄林盛,张军,陈哲,等. 保偏光纤定轴技术的仿真及实验分析[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(02):279-284.
- [15] PENNINGCKX D, BECK N, GLEYZE J F, et al. Signal propagation over polarization-maintaining fibers: problem and solution [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(11):4197-4207.