

文章编号 1004-924X(2014)01-0125-07

## 保偏光纤对轴中的同轴度调节

张 伟\*, 王乐锋, 荣伟彬, 孙立宁

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 由于保偏光纤对轴时须保证旋转的光纤始终在显微镜的焦平面内, 故本文设计了保偏光纤同轴度调节系统用于调节光纤相对电动旋转平台旋转中心的位置。采用显微视觉和电动位移平台运动检测出光纤的中心轴与电动旋转平台旋转中心的距离, 基于图像信息对二维手动平台实施调节, 计算出调节后理论上的同轴度误差。结合显微视觉建立了实验系统。以电动平台旋转轴中心为原点建立直角坐标系, 通过图像处理采用最小二乘法得到光纤中心线的直线方程, 确定光纤中心与电动平台旋转中心的距离。将基于图像阈值的灰度差分函数作为清晰度函数, 用实验方法确定其阈值, 从而有效降低白噪声的影响。实验结果显示, 经过调节的光纤和电动旋转平台的同轴度误差为  $3 \mu\text{m}$ , 能够应用在保偏光纤偏振轴的检测中。

**关键词:** 保偏光纤; 同轴度调节; 显微视觉; 图像处理; 清晰度函数

**中图分类号:** TN25      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3788/OPE.20142201.0125

## Coaxial adjustment in PMF alignments

ZHANG Wei\*, WANG Le-feng, RONG Wei-bin, SUN Li-ning

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

\* Corresponding author, E-mail: zww062003@163.com

**Abstract:** When polarization axes of Polarization Maintaining Fibers (PMF) are detected by micro-vision methods in PMF alignment, the rotation axes of fibers must be in the focal plane of the microscope. Therefore, a coaxial adjustment system was designed to adjust the relative position of the fiber to a motorized rotation stage. The distance between the fiber core and the center of rotation stage was detected by the micro-vision and the precise motion of motorized linear stage, and then, based on the image information, the two-dimensional manual linear stages were used to perform the adjustment. After the adjustment, the coaxial error was computed theoretically. Based on the micro-vision, an adjustment system was designed for the experiments. The Cartesian coordinate system was established by taking the center of the motorized rotary stage as the origin. Then, the equation of the straight line of the fiber center and its intercept were obtained by image processing and the least square method, further the distance between fiber center and rotary stage was determined. Moreover, the gray-scale difference function based on image threshold was taken as a sharpness function, and the influence of white noise was effectively eliminated. Experimental results show that the coaxial error between the

**收稿日期:** 2013-07-04; **修订日期:** 2013-07-19.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 90923041); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (No. IRT0915); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. HIT. BRET2. 2010007)

fiber and the rotary stage is  $3\ \mu\text{m}$  after adjustment, which proves that the system can be applied to the detection of the optical fiber polarization axis.

**Key words:** Polarization Maintaining Fiber(PMF); coaxial error adjustment; microscopic vision; image processing; sharpness function

## 1 引言

保偏光纤耦合器是应用保偏光纤制作的光耦合器,是实现线偏振光耦合、分光以及复用的关键器件,广泛应用在光纤传感和相干通信中<sup>[1-3]</sup>。保偏光纤耦合器的性能参数<sup>[4]</sup>主要有分光比、附件损耗和消光比等,其中消光比是保偏光纤耦合器特有的性能参数,消光比越大,耦合器的性能越好。消光比与保偏光纤的偏振轴检测和对准(简称对轴)有关,因此保偏光纤对轴是保偏光纤耦合器制造过程中的首要问题。

对轴方法可根据通光和观测方向分为纵向观测法和横向观测法。纵向观测法是指将光耦合入光纤,沿着保偏光纤芯轴方向观测确定偏振轴方位的方法。该方法鲁棒性差,操作过程复杂,只能用在对轴的辅助操作中。横向观测法是将光线沿垂直于保偏光纤芯轴的横截面侧向照射,利用保偏光纤的应力结构特征来确定其偏振轴方位,主要基于光纤旋转,利用显微镜检测光纤的偏振轴。

王金娥<sup>[5-6]</sup>等基于横向观察方法研制了保偏光纤偏振轴检测装置,其中间槽和底部采用光滑圆柱以使光纤的中心到显微镜物镜的距离不变,通过观测保偏光纤光强的变化来检测保偏光纤的偏振轴。由于光纤在中间槽和圆柱之间滚动存在摩擦,因此会影响对轴精度。陈少英<sup>[7]</sup>等基于五指型光强分布的侧视成像方法检测偏振轴,测试时采用了光纤旋转夹持机构,由于难以保证在旋转过程中光纤的中心轴和旋转中心的距离保持不变,需要在旋转的过程中不断调节观测距离,影响了检测的效率。Zheng<sup>[8-10]</sup>在实验中将光纤的一端夹持在旋转电动平台上,另一端放在 V 型槽中,通过真空吸附的方法将光纤准确固定,但由于 V 型槽与旋转电动平台的距离短,该方法主要适用于保偏光纤的熔接对轴中,难以应用在保偏光纤耦合器制造中的对轴过程中。

在检测保偏光纤偏振轴过程中,为了保持光纤到显微镜的距离不变,本文设计了一种保偏光纤同

轴度调节系统。该系统采用电动位移调整单元和显微视觉,基于图像处理,测量出光纤中心与旋转中心的同轴度误差;采用显微视觉和二维手动平台调整相结合的调节方法,减小光纤中心和电动旋转中心的同轴度误差;文中进行了相关的实验研究。

## 2 同轴度调节系统的组成及其调节方法

### 2.1 同轴度调节系统的硬件构成

保偏光纤与电动平台同轴度调节系统组成如图 1 所示。它主要由 XYZ 三维电动微位移平台、旋转电动平台、微型 XY 二维精密手动位移平台、显微镜、CMOS 相机、环形 LED 光源、光纤夹具、运动控制卡和计算机等组成。系统主体三维图如图 2 所示。

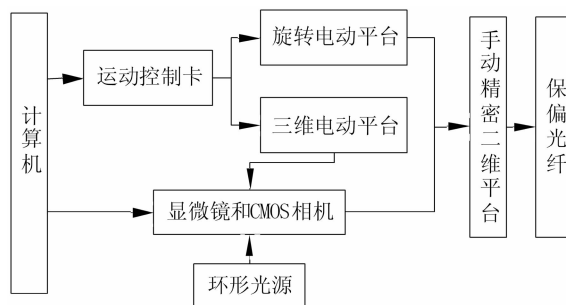


图 1 保偏光纤同轴度调节系统原理图

Fig. 1 Block diagram of PMF coaxial adjustment system

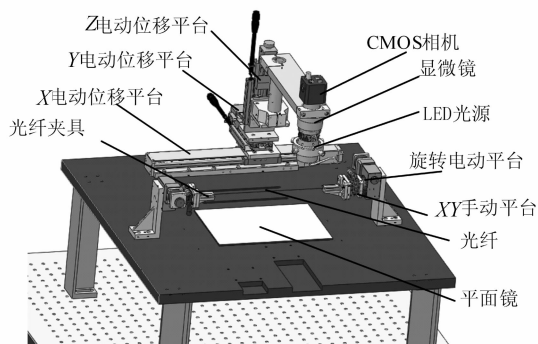


图 2 保偏光纤同轴度调节装置结构图

Fig. 2 Structure of PMF coaxial adjustment device

### 2.2 同轴度调节系统的调节方法

以电动平台旋转轴的中心为原点  $O$ , 在垂直于光纤的平面上建立  $XOY$  坐标系, 如图 3 所示。假定光纤的中心为  $A$  点, 坐标为  $(x_1, y_1)$ , 当  $A$  点和  $O$  点重合时, 光纤的中心和电动平台的旋转中心重合, 此时  $O$  点的坐标不易测量。当电动平台旋转  $180^\circ$ , 光纤的中心坐标为  $B(-x_1, -y_1)$ , 通过  $A$  点和  $B$  点可以确定电动平台的旋转中心。

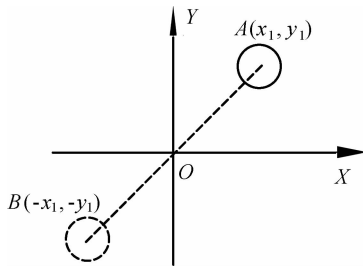


图 3 光纤和电动平台旋转中心的位置图  
Fig. 3 Position of fiber and the centre of rotary stage

#### 2.2.1 实现 X 方向调整

调节电动旋转平台, 使精密手动  $XY$  平台的  $X$  轴与水平面平行, 此时光纤中心的坐标为  $(x_1, y_1)$ , 如图 4 所示。

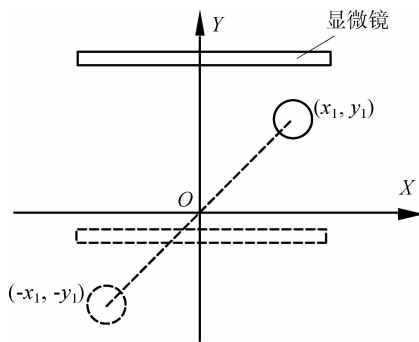


图 4 同轴度 X 向调节示例图  
Fig. 4 Block of coaxial adjustment in X direction

通过自动调焦调节  $Z$  向电动位移平台, 使 CMOS 相机中的光纤图像达到最清晰。对显微镜进行标定, 此时显微镜的放大倍数为  $F$ , CMOS 相机的分辨率为  $M \times N$  (像素的尺寸大小为  $d \times d$ , 单位为  $\mu\text{m}$ )。以 CMOS 相机视野中心为  $O'$ , 建立  $X'O'Y'$  坐标系。此时光纤图像中心的直线方程截距为  $b_1$ , 如图 5 所示。

将电动平台旋转  $180^\circ$ , 调节  $Y$  向电动位移平台, 移动距离为  $L$  (单位  $\mu\text{m}$ ), 使光纤在显微镜的

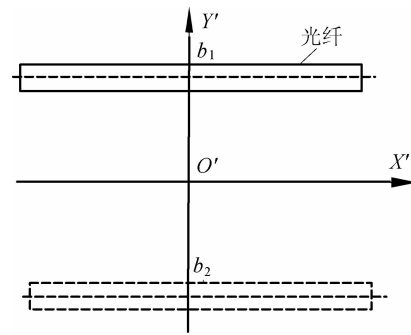


图 5 光纤在显微镜视野中的位置  
Fig. 5 Fiber position in the microscopic field

视野范围内。自动调节  $Z$  向电动平台, 使光纤的图像清晰, 此时光纤中心直线方程的截距为  $b_2$ 。假定显微镜的中心线与垂直平面的夹角为  $\alpha$ , 两次调焦后的相机视野中心移动的距离为  $2x_1 \sin \alpha$ , 光纤中心距电动旋转中心的  $Y$  向位移为  $(L + 2x_1 \sin \alpha + d(b_2 - b_1)/F)/2$ 。整体装配误差很小,  $\alpha$  可以忽略, 因此光纤中心距电动旋转中心的  $Y$  向位移为  $(L + d(b_2 - b_1)/F)/2$ 。

由于二维手动平台的分辨率相对较低, 采用与显微视觉相结合的闭环调节方式。首先将电动位移平台  $Y$  向调节  $-(L + d(b_2 - b_1)/F)/2$ , 然后调节二维手动位移平台的  $Y$  向, 当光纤图像的直线方程截距为 0 时停止调节。

#### 2.2.2 实现 Y 方向调整

将电动旋转平台旋转  $90^\circ$ , 使精密手动  $XY$  平台的  $Y$  轴与水平面平行。光纤中心的坐标为  $(x_2, y_1)$ , 此时  $x_2 = 2x_1 \sin \alpha$ , 如图 6 所示。

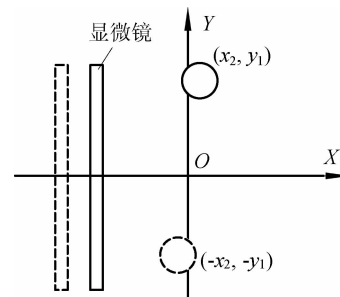


图 6 同轴度 Y 向调节示例图  
Fig. 6 Block of coaxial adjustment in Y direction

通过自动调焦调节三维电动位移平台, 使光纤的显微图像达到清晰, 光纤图像中心的直线方程截距为  $b_3$ , 如图 7 所示。

(3) 经过两次调节后, 光纤中心的坐标为

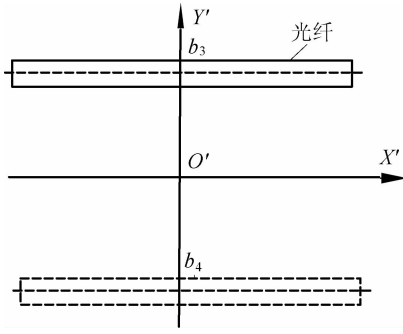


图 7 光纤在显微镜视野中的位置图

Fig. 7 Fiber position in microscopic field

$(2x_1 \sin \alpha, 2x_1 \sin^2 \alpha)$ 。光纤与电动旋转中心的同轴度误差  $E$  为:

$$E = \sqrt{(2x_1 \sin \alpha)^2 + (2x_1 \sin^2 \alpha)^2} = 2x_1 \sin \alpha \sqrt{1 + \sin \alpha}, \quad (1)$$

(4) 重复 (1) 和 (2), 光纤中心的坐标变为  $(2x_1 \sin^n \alpha, 2x_1 \sin^{n+1} \alpha)$ , 其中  $n = 1, 2, 3, \dots$ 。光纤与电动旋转中心的同轴度误差  $E_n$  为:

$$E_n = \sqrt{(2x_1 \sin^n \alpha)^2 + (2x_1 \sin^{n+1} \alpha)^2} = 2x_1 \sin^n \alpha \sqrt{1 + \sin \alpha}. \quad (2)$$

### 2.3 同轴度调节的关键算法

#### 2.3.1 图像处理

CMOS 相机数字化过程的量化噪声以及光源存在的白噪声会对图像质量产生严重影响。文中首先对图像进行二维中值滤波,降低白噪声对图像的影响;然后对图像进行分割。由于每次实验光照可能不同,如果采用固定的阈值分割,可能会将光纤区域与背景区域错误划分,本文采用自适应阈值分割。由于光纤的图像具有规律性,取代表特征的局部窗口中所有像素的平均值作为阈值进行图像分割。设局部窗口的大小为  $M \times N$ , 原始图像为  $g(i, j)$ , 则阈值  $T$  为:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j)}{M \cdot N}. \quad (3)$$

由于图像背景复杂和显微镜内部可能存在污点,经过分割后,虽然光纤从背景图像中分割出来,但是仍然有可能有其它杂点区域被保留,这会直接影响对光纤轮廓的提取。因此,本文采用边界追踪法计算图像中的特征参数面积和周长,选择形态学中的结构矩阵,采用形态学的开运算和闭运算,去除图像中的黑点并使光纤上下部分衔

接,最后采用边界追踪法提取光纤的轮廓<sup>[11]</sup>。

#### 2.3.2 拟合光纤中心直线方程

设光纤图像上轮廓某一点像素的横坐标为  $i$ , 纵坐标为  $f_{\text{up}}(i)$ , 相对应下轮廓的纵坐标为  $f_{\text{down}}(i)$ , 则光纤中心纵坐标为  $f_{\text{middle}}(i) = (f_{\text{up}}(i) + f_{\text{down}}(i))/2$ 。采用最小二乘法, 如式 (4) 和 (5) 所示, 拟合出光纤中心的直线方程  $y = kx + b$ 。

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial b} = \sum_{i=1}^m 2(kx_i + b - y_i) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial k} = \sum_{i=1}^m 2x_i(kx_i + b - y_i) = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

即

$$\begin{cases} mb + (\sum_{i=1}^m x_i)k = \sum_{i=1}^m y_i \\ (\sum_{i=1}^m x_i)b + (\sum_{i=1}^m x_i^2)k = \sum_{i=1}^m x_i y_i \end{cases}, \quad (5)$$

$$\text{令 } \sum_{i=1}^m x_i = A, \sum_{i=1}^m y_i = B, \sum_{i=1}^m x_i^2 = C, \sum_{i=1}^m x_i y_i = D$$

$$\text{则 } b = \frac{B - Ak}{m}, k = \frac{mD - AB}{Cm - A^2}.$$

#### 2.3.3 自动调焦

通常由于显微镜的放大倍数较大,导致了 CMOS 相机的景深很短,而在调节光纤的位置过程中,光纤的位置每次均需要改变,无法保证视野中每次光纤的图像保持清晰。在调焦过程中如果仅靠操作人员的主观判断,不仅对操作人员的要求高,并且存在误差大,效率低等缺点,因此需要采用自动调焦保证调节的准确性和实时性<sup>[12]</sup>。

清晰度函数是用来评价图像清晰程度的函数。清晰评价函数分为 3 类:基于灰度梯度函数、基于灰度熵函数、基于频谱函数<sup>[13-14]</sup>。灰度熵函数对外界环境的变化非常灵敏,频谱函数计算量非常大,灰度梯度函数计算简便容易实现。灰度差分函数<sup>[15]</sup>是利用像素相邻点的绝对值和作为图像清晰度函数,但由于 CMOS 的噪声和光源的噪声会影响灰度梯度,本文提出一种基于阈值的灰度差分函数作为图像清晰度函数。

$$G(i, j) = |y(i, j + 1) - y(i, j)| + |y(i + 1, j) - y(i, j)|, \quad (6)$$

$$F_{\text{thre}} = \begin{cases} 0 & G(i, j) < T \\ \sum_i \sum_j G(i, j) & G(i, j) \geq T \end{cases}, \quad (7)$$

其中:  $y(i, j)$  是一个  $M \times N$  图像的函数,  $G(i, j)$  为

灰度差分函数,  $F_{\text{thre}}$  为清晰度函数,  $T$  为阈值。

为了能够快速使光纤图像清晰,选择粗调和精调相结合的方法,在清晰度函数值较小的地方采用大步长搜索,在清晰度函数函数值较大,即聚焦平面附近采用小步长搜索。

### 3 实验分析与结果

#### 3.1 实验系统

实验系统由一维电动位移平台和旋转电动位移平台、手动二维平台、显微镜、光纤夹具、CMOS 相机和 LED 环形光源组成,如图 8 所示。各运动平台的参数如表 1 所示。

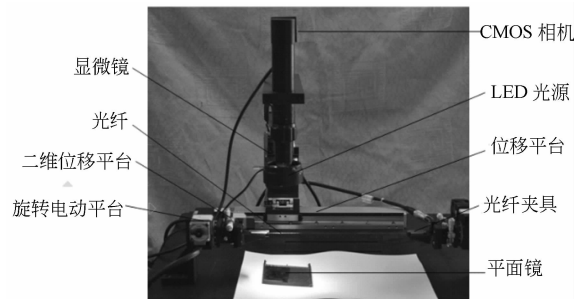


图 8 保偏光纤同轴度调节实验平台

Fig. 8 Platform of PMF coaxial adjustment device

表 1 各运动平台参数表

Tab. 1 Specification of motion stages

平台	参数			
	行程	分辨率	重复定位精度	
三维电动位移平台	X	30 mm	0.1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
	Y	30 mm	0.1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
	Z	200 mm	0.2 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
旋转电动平台	$\theta$	360°	0.003°	0.02°
二维手动平台	X	6 mm	10 $\mu\text{m}$	
	Y	6 mm	10 $\mu\text{m}$	

#### 3.2 实验结果

图 9(a)~(d)分别为光纤的显微视觉图像经过中值滤波、自适应阈值分割、形态学处理和轮廓提取后的结果。从结果可以看出,光纤的上下轮廓被分割出来。由式(5)拟合光纤图像中心的直

线方程,结果如图 10 所示,光纤中心的直线方程为  $y = -0.0103x + 8.7229$ 。

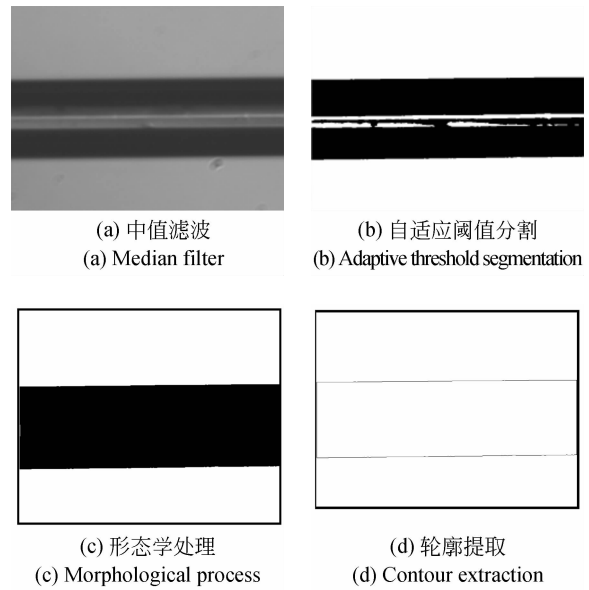


图 9 图像处理后的图像

Fig. 9 Images after image processing

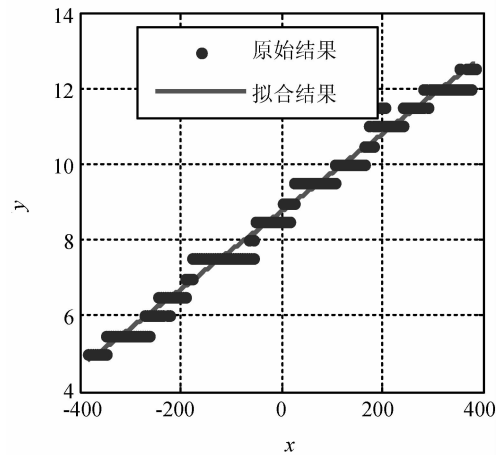


图 10 光纤图像中心直线拟合图

Fig. 10 Fitting of center of fiber optic image

当显微镜的视野中没有光纤,清晰度函数  $F_{\text{thre}}$  与阈值  $T$  的变化关系如图 11 所示。当  $T = 16$  时,清晰度函数为 0,排除了外面因素的影响,因此式(7)中  $T$  选择 16。当  $T = 16$  时,平台 Z 向位移在 3 020  $\mu\text{m}$  和 3 450  $\mu\text{m}$  之间步长 5  $\mu\text{m}$  运动,得到了图像清晰度函数与焦距的关系,如图 12 所示。可以看出,基于阈值的灰度差分函数具有单峰性、无偏性、选择性和鲁棒性的特点,作为清晰度函数能够满足调焦的要求。

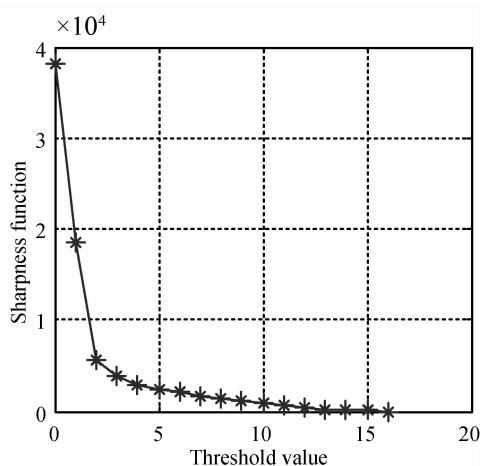


图 11 阈值与清晰度的函数关系

Fig. 11 Relation between threshold value and sharpness function

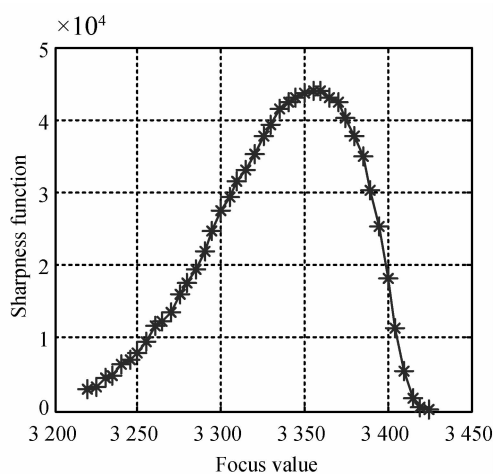


图 12 焦距与清晰度函数关系

Fig. 12 Relation between focus value and sharpness function

按照 2.2 节的同轴度调节方法调节 2 次后,

光纤在电动平台上旋转  $360^\circ$  的截距变化如图 13 所示。可以看出,光纤中心和电动旋转中心的同轴度误差为  $3 \mu\text{m}$ 。

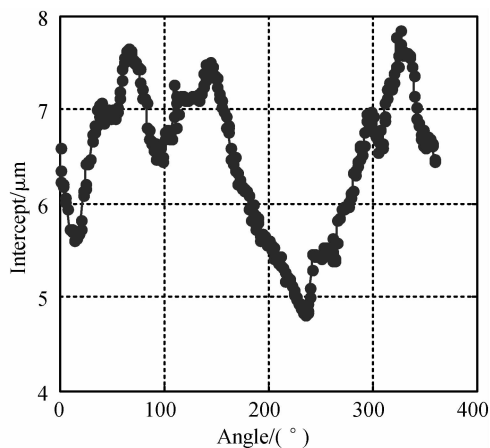


图 13 光纤中心直线方程的截距变化

Fig. 13 Change of the intercept of linear equation

## 4 结 论

本文设计了一种调节光纤与电动平台旋转中心同轴度误差的系统,并提出了其调节策略。基于显微视觉和精密电动旋转台检测出光纤中心与电动旋转中心的距离,在显微视觉下操作二维手动平台调节,计算出理论上的同轴度误差。采用图像处理,提取了光纤图像的轮廓,采用最小二乘法计算出光纤中心的直线方程,得到光纤中心与电动旋转中心的距离,提出了基于阈值的图像清晰度函数,此函数具有单峰性、无偏性、选择性和鲁棒性的特点。实验结果显示经过调节的光纤和电动旋转平台的同轴度误差为  $3 \mu\text{m}$ ,能够应用在保偏光纤偏振轴的检测中。

### 参考文献:

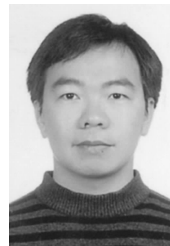
- [1] PENNINGCKX D, BECK N, GLEYZ J, *et al.*. Signal propagation over polarization-maintaining fibers: problem and solutions [J]. *J. of Lightwave Technology*, 2006, 24(11): 4197-4207.
- [2] GÖTZINGER E, BAUMANN B, PIRCHER M, *et al.*. Polarization maintaining fiber based ultra-high resolution spectral domain polarization sensitive optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22704-22717.
- [3] NODE J, OKAMOTO K, SASAKI Y. Polarization-maintaining fibers and their applications [J]. *J. of Lightwave Technology*, 1986, 4(8): 1071-1089.
- [4] YOKOHAMA I, KAWACHI M. Polarization-maintaining fiber couplers with low excess loss [J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(18): 929-930.
- [5] 王金斌. 熔锥型保偏光纤耦合器制造理论与关键技术

- 术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2007.
- WANG J E. *Study on the manufacturing theory and the key techniques of fused polarization maintaining fiber couplers*[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] 吴宇列,郑煌,王金娥,等. 熊猫型保偏光纤定轴仿真研究[J]. 光子学报, 2007, 36(7):1224-1229.
- WU Y L, ZHENG Y, WANG J E, *et al.*. Research of azimuthal alignment for PANDA fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 36(7):1224-1229. (in Chinese)
- [7] 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(1): 35-38.
- CHEN S Y, DI H W, CHEN Z, *et al.*. Azimuthal alignment method for PM fiber based on light intensity distributions with five finger profile[J]. *Applied Laser*, 2006, 26(1):35-38. (in Chinese)
- [8] ZHENG W X, DUKE D, TOSHIKI K, *et al.*. Interrelation profile analysis method for alignment of polarization-maintaining fiber [C]. *Proceedings of Optical Fiber Communication, Collocated National Fiber Optic Engineers, San Diego, CA*, 2010:1-4.
- [9] ZHENG W X, SUGAWARA H, MALINSKY B. Fourier analysis method for asymmetric polarization-maintaining fiber alignment [C]. *OFC/NFO-EC2012*, 2012:1-4.
- [10] ZHENG W X. Automated fusion-splicing of polarization maintaining fiber [J]. *J. of Light wave Technology*, 1997, 15(1):125-134.
- [11] RONG W B, ZHANG W, WANG L F, *et al.*. Investigation of the data processing method for high-precision alignment of PM fibers [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 565: 1482-1488.
- [12] 孙立宁,陈立国,刘品宽,等. 微操作机器人显微视觉系统若干问题[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2):171-175.
- SUN L N, CHEN L G, LIU P K, *et al.*. Some issues on the micro-vision system for a micromanipulation robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 171-175. (in Chinese)
- [13] HE J, ZHOU R Z, HONG Z L. Modified fast climbing search auto-focus algorithm with adaptive step size searching technique for digital camera [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(2):257-262.
- [14] SUN J, YUAN Y H, WANG C Y. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27:35-39.
- [15] 唐永鹤,卢焕章. 基于灰度差分不变量的快速局部特征描述算法[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):447-454.
- TANG Y H, LU H Z. Fast local feature description grey value differential algorithm based on invariants [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 447-454. (in Chinese)

#### 作者简介:



张 伟(1982—),男,山东淄博人,博士研究生,2010年于山东理工大学获得硕士学位,主要从事为光纤微操作技术与装备的研究。E-mail: zw062003@163.com



王乐锋(1980—),男,河南商丘人,助理研究员,硕士生导师,2008年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微操作方法和关键技术研究。E-mail: lefengwang@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)