

文章编号 1004-924X(2007)01-0009-07

# 约束抽样 Hough 变换的光纤端面精确定位

崔继文, 谭久彬, 敖磊, 康文静

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为提高经光纤传输后光束方向的稳定性, 提出了一种新的光纤端面精确定位方法。该方法针对光纤端面光能量中强模间噪声干扰的特点建立了约束抽样 Hough 变换, 可实现对噪声的去除和对轮廓的准确提取, 并根据轮廓的特征把特征点分为基元类和噪声类, 对两类点分别进行约束抽样 Hough 变换, 可显著减少存储所需要的内存空间, 有效抑制噪声对轮廓的干扰, 准确得到属于轮廓的特征点。根据各特征点对轮廓的贡献, 采用弦长加权拟合法对轮廓点进行处理, 从而得到轮廓的中心位置。实验结果表明, 该方法对光纤端面的定位不确定度优于 0.2 pixel, 成像物镜放大倍数为 10 时, 定位不确定度优于 0.4  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 光纤端面定位; 模间噪声干扰; 约束抽样 Hough 变换; 加权拟合

**中图分类号:** TP391; TN25 **文献标识码:** A

## Precise location for optical fiber surface with sampling restraint Hough transformation

CUI Ji-wen, TAN Jiu-bin, AO Lei, KANG Wen-jing

(*Institute of Ultra-precision Optical & Electronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** In order to improve the direction stability of light beam from optical fiber, a novel location method for optical fiber surface was proposed. The energy distribution at optical fiber surface was analyzed and Hough transformation with sampling restraint was proposed in this method to eliminate noise and obtain the contour points according to the contour character. The points divided into two classes (primitive class and noise class) were respectively transformed into parameter space to reduce memory and restrain noise to obtain the contour points. The points were set different weight for their different effect on the center of the contour in fitting process. The experimental results show that the uncertainty is less than 0.2 pixel (less than 0.4  $\mu\text{m}$ ) when the proposed method is used to locate optical fiber surface and a ten-fold image lens is used.

**Key words:** location for optical fiber surface; noise distribution between modes; Sampling Restraint Hough Transformation (SRHT); fitting with different weight

收稿日期: 2006-05-30; 修订日期: 2006-10-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50275041); 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划资助 (No. HITQNJ.S. 2006.010)

## 1 引言

目前以光纤为传输媒介的光纤通信和光电子技术得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。光束经光纤耦合器进入光纤出射后,光纤出射端相当于二次光源,出射光束方向的稳定性主要取决于光纤出射端空间位置的稳定性,保证光纤出射端的位置稳定性可提高出射光束的方向稳定性,因此要求对光纤端面进行精确定位。另一方面,光纤作为一个信息传输与存储系统,解决光纤的耦合损耗问题对于提高光纤通信的传输质量有重大意义。光纤与光纤(或光波导与光纤)直接端面的耦合是实际工作中最常见的耦合方式,而在耦合过程中对光纤纤芯的调整精度是影响耦合效率的主要因素之一。由于光纤纤芯直径很细(单模光纤 10  $\mu\text{m}$ ,多模光纤 50  $\mu\text{m}$ ),并且光纤耦合损耗对位置误差非常敏感,因此,在光纤与光纤或光纤与其它光器件耦合时,对光纤端面定位精度要求很高。为了实现光纤纤芯的调整,常采用直视芯法<sup>[2]</sup>、光衍射法<sup>[3]</sup>、探测光功率法<sup>[4]</sup>等,但这些方法存在成本、速度、精度等方面的局限,使其应用受到限制。随着视觉技术的发展,用图像处理方法实现对光纤的定位与测量得到了迅速的发展<sup>[5-7]</sup>,但这些方法存在计算量大、精度低、易受噪声影响等缺点。为此本文提出了一种基于约束抽样 Hough 变换的光纤端面精确定位方法。该方法首先根据光纤端面光能量分布的特点,采用约束抽样 Hough 变换实现对噪声的去除和对轮廓的准确提取,最后采用弦长加权法实现对轮廓中心的准确定位,由轮廓中心与光纤端面中心在空间位置的一一对应关系得到光纤端面在空间的准确位置,达到对光纤端面准确定位的目的。该方法在不增加任何成本的前提下通过约束抽样 Hough 变换,显著减少所需要的内存空间,计算量降低,定位速度显著增加;噪声的影响大大减少,定位精度显著提高。因此可以为开发快速、高精度的光纤融接机和光纤与光纤器件的耦合提供理论依据。

## 2 光纤端面定位原理

图 1 所示为光纤端面定位原理图。由激光器发出的光经扩束准直镜后变为平行光束,经耦合

透镜将光耦合进入光纤。进入光纤的光经光纤传输到光纤的另一端,则光纤的出射端面对光学成像系统而言是一个自身发光的物体,此物体经光学成像系统成像于 CCD 摄像机的像平面上,经计算机图像采集与处理系统即可得到光纤出射端面的中心位置。

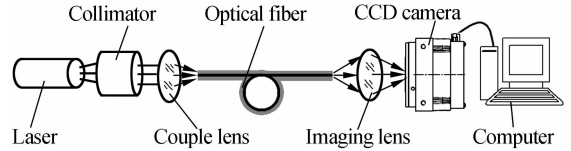


图 1 光纤端面定位原理图

Fig. 1 Frame of fiber surface location

由透镜成像原理和非涅耳衍射理论可知,在成像平面,即 CCD 的像平面上能量的振幅为

$$U'(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} U(x, y) \cdot h(x + x'/M, y + y'/M) dx dy, \quad (1)$$

其中,  $U'(x', y')$  为像平面处的振幅,  $U(x, y)$  为物体,即光纤端面的振幅,  $h$  为透镜的点扩散函数,  $M$  为透镜的放大倍数。

光纤端面对光学成像系统而言是一个自身发光的物体,因此其端面振幅可写为

$$U(x, y) = \delta(x)\delta(y), \quad (2)$$

其中,  $\delta$  为狄拉克函数。

由于透镜为圆形光瞳,引入归一化径向光学坐标  $v = \frac{2\pi}{\lambda} r \sin \alpha$ , 其对应的实际径向坐标为  $r$ , 则 CCD 像平面上的光强分布为

$$I(v) = \left( \frac{2J_1(v)}{v} \right)^2, \quad (3)$$

其中,  $J_1$  为一阶第一类贝赛耳函数。

由此可见,在 CCD 像平面上光强的分布和光纤端面的能量分布是一致的,而其光强的分布对 CCD 的输出而言是灰度的变化,因此通过 CCD 输出图像上每一点灰度值及其之间的相互关系可以得到光纤端面在空间的位置。

## 3 光纤端面定位的关键技术

### 3.1 光纤端面的光能量分布

入射到光纤端面上的光线,按菲涅尔定律将折射进入光纤的纤芯区形成光纤中的射线,并传

输到光纤的另一端。射线的传播轨迹取决于光线的入射方位、入射点的位置及光纤的折射率剖面。光线在介质中传输时,射线的轨迹方程为:

$$\frac{d}{ds} \left[ n(r) \frac{dr}{ds} \right] = \nabla n(r), \quad (4)$$

其中,  $n(r)$  为介质在光线传输垂直面内的折射率,  $r$  为射线轨迹的曲率半径,  $\nabla$  为哈密顿算子。

对阶跃性圆柱光纤而言,其射线的纵向和横向轨迹方程为:

$$z = z_0 + \int_{r_0}^r \frac{1}{\beta} g^{1/2}(r) dr, \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi_0 + \int_{r_0}^r \frac{\bar{l}a}{r^2} g^{-1/2}(r) dr. \quad (6)$$

其中  $(r_0, \varphi_0, z_0)$  为轨迹的起点坐标,  $\bar{\beta}$  为光纤的轴向不变量,  $\bar{l}$  为光纤角向不变量,  $a$  为光纤的纤芯半径,  $g(r) = n^2(r) + \bar{\beta}^2 - \left(\frac{\bar{l}a}{r}\right)^2$ 。

由光线的轨迹方程可知,当观察光纤的横截面时,各种射线模应构成圆形光斑图。但由于入射光同时激励各种射线模,实际观察到的光斑图是各种模光斑图的叠加或相干的结果。如果采用非相干光源,则合成的光斑图是均匀分布的圆光斑;若采用相干光源,由于模间相位的影响使相干光斑随机游移,芯区内局部的平均光强随机起伏,成为含有模噪声的干涉光斑图。

### 3.2 约束 Hough 变换

实际采集到的光纤端面光斑图中含有很强的模噪声干扰,这些干扰对光纤端面中心的定位带来很大困难。由于所采集到的光斑图为圆形,因此本文采用约束抽样 Hough 变换方法实现对轮廓的准确提取,达到对中心精确定位的目的。

Hough 变换是利用图像全局特征将边缘像素连接起来组成区域封闭边界的一种方法。它把图像空间转换到参数空间,在参数空间对点进行描述,达到检测图像中轨迹轮廓的目的。该变换把所有可能落在轮廓上的点进行统计计算,根据对数据的统计结果确定属于轮廓的程度<sup>[8-10]</sup>。为提高计算速度,减少运算量,减小噪声点对轮廓的干扰,得到更准确的轮廓信息,本文提出约束抽样 Hough 变换的方法,其实现如下:

假设在原图像中有  $m$  个几何基元和  $N_f$  个噪声点,其中基元的参数个数为  $n$ ,第  $i$  个基元上有  $N_i$  个特征点,  $i=1, 2, \dots, m$ ,则原图像中特征点的

个数为:  $N = N_f + \sum_{i=1}^m N_i$ 。

随机选取  $n$  个特征点作为最小点集,则其全部落在第  $i$  个基元上的概率为:

$$p_i = \frac{C_{N_i}^n}{C_N^n}, \quad (7)$$

则这  $n$  个特征点属于这  $m$  个基元的概率为:

$$p = \sum_{i=1}^m p_i, \quad (8)$$

在这  $n$  个特征点中有噪声点的概率为:

$$p_f = 1 - p, \quad (9)$$

由此可以看出,为在计算量与所需内存最少的情况下检测轮廓,应使抽样过程尽量抽取基元,减小对噪声的抽样。本文根据圆轮廓的特性,在抽样时首先根据特征点在图像中的相对位置(点在图像空间中的坐标位置)把分割后所得到的点分为两类:在图像中的相对位置变化相对较大的点为一类,相对位置变化不大的点为另一类,则可近似认为相对位置变化较大的点为图像的噪声点,而变化不大的点为基元点。

设基元的集合为  $\{E_i, i=1, 2, \dots, m\}$ ,噪声的集合为  $\{NC_j, j=1, 2, \dots, N_f\}$ ,在抽样时把基元分成三部分,使各部分间基元间的相对位置尽可能大。在抽样时首先对基元集合进行抽样,在每一部分基元集合中各抽取一点,则由此三点可确定圆的圆心位置与半径  $(a_1, b_1, r_1)$ ,同时由这三点图像的梯度信息可以求出被测圆的圆心与半径  $(a_2, b_2, r_2)$ 。如果两次求得的圆心和半径的差值在容许的误差范围之内,则对存储此圆心和半径的单元进行累加,同时记录圆心坐标与半径的大小。如此循环,直到基元集合中所有的点变换完毕为止。然后对噪声集合中的点进行抽样,同样对集合中的点进行抽样,并用与基元处理相同的方法进行抽样。如果在对噪声集合进行抽样时,计算所得到的圆心和半径与基元中的抽样点计算所得到的圆心和半径的差值在容许的误差范围之内,则认为此点为基元点,否则认为是噪声点。

### 3.3 弦长加权中心拟合方法

通过上述检测方法可以检测到属于圆周上的  $n$  个点  $\{(x_i, y_i) | i=1, 2, \dots, n\}$ 。运用弦长加权法对这些轮廓点进行拟合<sup>[11]</sup>,得到被测圆轮廓的精确圆心坐标  $(x_0, y_0)$ 。根据圆轮廓上点的性质可知,对轮廓上的两点  $(x_i, y_i)$  与  $(x_j, y_j)$ ,则有:

$$2(x_j - x_i)x_0 + 2(y_j - y_i)y_0 = x_j^2 + y_j^2 - x_i^2 - y_i^2, \quad (10)$$

按照最小加权二乘法整理得到圆心位置为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{M}^T \mathbf{P} \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{P} \mathbf{C}, \quad (11)$$

其中:  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$  为圆心的位置,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_N & b_N \end{bmatrix}$$

为轮廓点的相对位置,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix}, \begin{cases} a_k = 2(x_j - x_i) \\ b_k = 2(y_j - y_i) \\ c_k = x_j^2 + y_j^2 - x_i^2 - y_i^2 \end{cases}, N = \frac{n(n-1)}{2},$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & & & \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & p_N \end{bmatrix} \text{ 为权矩阵,}$$

$p_k = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$  为弦长,  $0 \leq k \leq N$ .

被测轮廓的半径为:

$$r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2]}, \quad (12)$$

## 4 实验验证

用实验验证提出的光纤端面定位方法的可行性。采用 P III 133MMX、WinXP 操作系统,开发环境为 VC++ 6.0,耦合透镜数值孔径为 0.85,光学成像系统数值孔径为 0.11,CCD 摄像

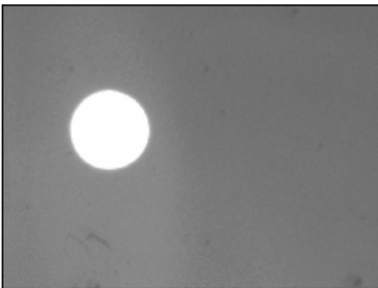


图 2 非相干光源单模光纤端面图像  
Fig. 2 Surface image of single-mode optical fiber with non-correlative light source incidence

机为台湾敏通公司的 MTV-1881-EX,采集卡为北京嘉恒中自公司的 OK\_10B,光纤的两端面均固定在五维调节机构上。实验过程中分别采用相干光源和非相干光源进行实验验证,其中相干光源为 632.8 nm He-Ne 激光器,非相干光源是高亮度的 LED。实验过程中被定位的光纤分别为纤芯直径 50  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.17 的多模光纤和纤芯直径为 9  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.13 的单模光纤。

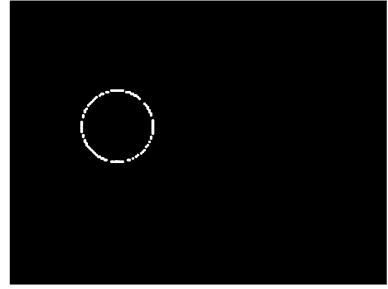


图 3 非相干光源单模光纤端面处理后的图像  
Fig. 3 Processed surface image of single-mode optical fiber with non-correlative light source incidence

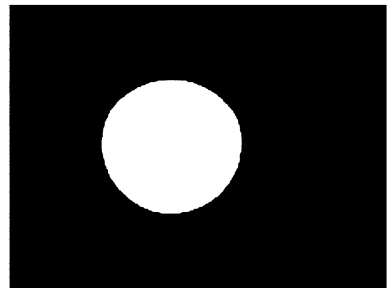


图 4 非相干光源多模光纤端面图像  
Fig. 4 Surface image of multi-mode optical fiber with non-correlative light source incidence

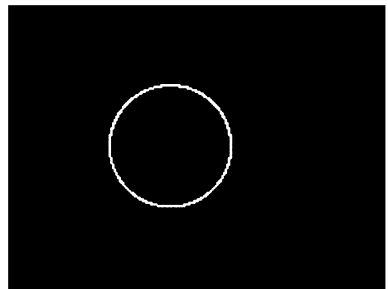


图 5 非相干光源多模光纤端面处理后的图像  
Fig. 5 Processed surface image of multi-mode optical fiber with non-correlative light source incidence

实验中当光源采用高亮度 LED 光源时,对单模光纤和多模光纤采集到的光纤端面图像如图 2 和图 4 所示,用本文提出的方法处理后的结果如图 3 和图 5 所示,对光纤中心点的定位结果如表 1 和表 2 所示。实验中当光源采用 He-Ne 激光器时,对单模光纤和多模光纤采集到的光纤端

面图像如图 6 和图 8 所示,用本文提出的方法处理后的结果如图 7 和图 9 所示,对光纤中心点的定位结果如表 3 和表 4 所示。由表可以看出,应用提出的定位方法可使光纤端面中心的定位不确定度在 0.2 pixel 内,对应于物方空间的定位不确定度为 0.4  $\mu\text{m}$ 。

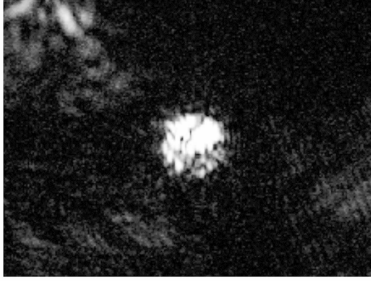


图 6 相干光源单模光纤端面图像

Fig. 6 Surface image of single-mode optical fiber with correlative light source incidence

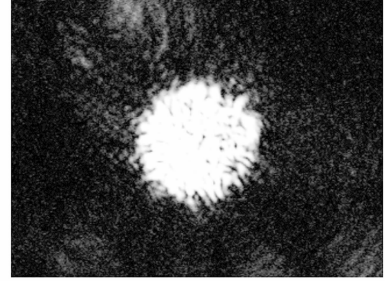


图 8 相干光源多模光纤端面图像

Fig. 8 Surface image of multi-mode optical fiber with correlative light source incidence

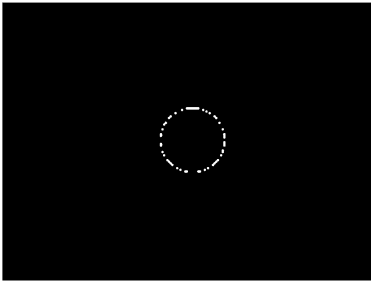


图 7 相干光源单模光纤端面处理后的图像

Fig. 7 Processed surface image of single-mode optical fiber with correlative light source incidence

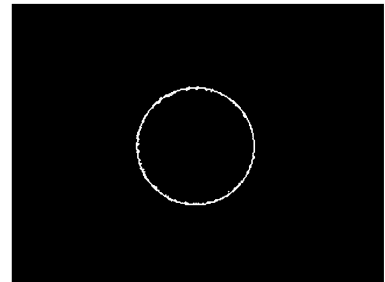


图 9 相干光源多模光纤端面处理后的图像

Fig. 9 Processed surface image of multi-mode optical fiber with non-correlative light source incidence

表 1 非相干光源单模光纤端面定位结果(单位:像素)

Tab. 1 Surface location result of single-mode optical fiber with non-correlative light source incidence(Unit: pixel)

Number	Location result	Number	Location result	Number	Location result
1	(64.59,76.57)	5	(64.61,76.51)	9	(64.69,76.72)
2	(64.73,76.81)	6	(64.78,76.55)	10	(64.75,76.69)
3	(64.57,76.52)	7	(64.88,76.72)	Average	(64.70,76.64)
4	(64.80,76.71)	8	(64.56,76.63)	Uncertainty	(0.109,0.101)

表 2 非相干光源多模光纤端面定位结果(单位:像素)

Tab. 2 Surface location result of multi-mode optical fiber with non-correlative light source incidence(Unit: pixel)

Number	Location result	Number	Location result	Number	Location result
1	(97.54,85.74)	5	(97.51,85.80)	9	(97.59,85.84)
2	(97.63,85.81)	6	(97.53,85.65)	10	(97.70,85.59)
3	(97.67,85.72)	7	(97.58,85.72)	Average	(97.59,85.72)
4	(97.60,85.71)	8	(97.56,85.63)	Uncertainty	(0.061,0.081)

表 3 相干光源单模光纤端面定位结果(单位:像素)

Tab. 3 Surface location result of single-mode optical fiber with correlative light source incidence(Unit: pixel)

Number	Location result	Number	Location result	Number	Location result
1	(116.47,85.61)	5	(116.71,85.92)	9	(116.49,85.89)
2	(116.33,85.81)	6	(116.23,85.55)	10	(116.70,85.39)
3	(116.57,85.82)	7	(116.58,85.72)	Average	(116.55,85.74)
4	(116.70,85.71)	8	(116.76,85.93)	Uncertainty	(0.175,0.176)

表 4 相干光源多模光纤端面定位结果(单位:像素)

Tab. 4 Surface location result of multi-mode optical fiber with correlative light source incidence(Unit: pixel)

Number	Location result	Number	Location result	Number	Location result
1	(113.07,87.96)	5	(112.89,87.81)	9	(112.99,87.91)
2	(112.88,87.81)	6	(113.19,87.55)	10	(112.95,87.99)
3	(113.17,87.82)	7	(113.24,87.72)	Average	(113.08,87.82)
4	(113.22,87.65)	8	(113.21,87.93)	Uncertainty	(0.143,0.142)

## 5 结 论

本文根据光纤端面光能量强模噪声干扰特点提出了约束抽样 Hough 变换技术,通过对基元的约束抽样实现了“多对一”的映射技术,显著减少存储所需要的内存空间,有效地抑制了噪声对轮廓的干扰,实现了对轮廓点的准确提取;根据轮

廓点对拟合曲线的贡献,运用弦长加权法对所得轮廓点进行拟合处理,使拟合得到的轮廓中心点位置更为准确。本文提出的定位方法不仅适用于对光纤端面的定位,也适用于其他噪声干扰图像的轮廓点提取。最终的实验结果表明应用本文提出方法对光纤端面定位时,当成像物镜的放大倍数为 10 时,其定位不确定度优于  $0.4 \mu\text{m}$ 。

## 参考文献:

- [1] 张煦. 光纤通信技术发展动向评析[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(5):58-64.  
ZHANG X. New development trends of optical fiber communication technology[J]. *J. Shanghai Jiaotong Univ.*, 1997, 31(5):58-64. (in Chinese)
- [2] KAWATA O, HO SHINO K, MIYAJIMA Y, *et al.*. Splicing and inspection technique for single mode fibers using direct core monitoring[J]. *Lightwave Technol.*, 1984, 2(2):185-191.
- [3] 傅思镜, 钟伟彬, 梁丽贞. 光纤线径无接触测量及其计算机图象处理方法[J]. 中山大学学报, 2000, 39(2):24-27.  
FU S J, ZHONG W B, LIANG L Z. Optical fiber diameter non-contact measurement with computer image processing[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sanyatseni*, 2000, 39(2):24-27. (in Chinese)
- [4] YANG G G. Optimal design of high efficiency optical interconnection system with a simulated annealing algorithm [C]. *Third International Conference on Holographic Systems, Components, Edinburgh, U K, Sep.*, 1991.

- [5] 于波,刘荣,宗光华. 基于双目视觉的光纤定位研究[J]. 机器人, 2003, 25(4):296-299.  
YU B, LIU R, ZONG G H. Optical fiber position based on binocular vision[J]. *Robot*, 2003, 25(4):296-299. (in Chinese)
- [6] WANG Y Z, ONG S H, ASHRAF A, *et al.*. Three-dimensional contour edge detection algorithm[J]. *SPIE*, 2000, 3979:1547-1554.
- [7] KIM H Y, SEONG-DAE K SI-WOONG L. Robust change detection by global-illumination-change compensation and noise-adaptive thresholding[J]. *Opt. Eng.*, 2004, 43(3):580-590.
- [8] YANKOWICH S W, FAROOQ M. Hough transform based multisensor, multitarget, track initiation technique [J]. *Opt. Eng.*, 1998, 37(7):2064-2077.
- [9] 郭强,陈桂林,童卫旗. 基于变换域 Hough 变换的遥感图像相干干扰分析[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2):121-126.  
GUO Q, CHEN G L, TONG W Q. Analysis of correlation jam in the remote sensing image based on the transformed space Hough algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2):121-126. (in Chinese)
- [10] 刘桂雄,申柏华,冯云庆,等. 基于改进的 Hough 变换图像分割方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3):257-260.  
LIU G X, SHEN B H, FENG Y Q, *et al.*. Study of image segmentation based on improved Hough transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):257-260. (in Chinese)
- [11] WU Z Q. The robust algorithms finding the center of an arc[J]. *Comput. Vision Imag. Und.*, 1995, 62(3):269-278.

**作者简介:**崔继文(1974—),男,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所博士,主要研究方向为超精密光电测试技术及图像处理技术。E-mail: cuijiwen@hit.edu.cn

谭久彬(1955—),男,博士、教授、博士生导师,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长,主要研究方向为超精密测量技术与仪器工程。E-mail: jbtan@hit.edu.cn

敖磊(1980—)男,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所博士研究生,主要研究方向为超精密光电测试技术以及图像处理技术。E-mail: ao\_lei@126.com