

基于机器视觉的光纤几何参数检测算法设计

陈晓荣 刘亚茹 石高辉

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘 要: 为了满足工业检测中快速检测光纤横截面几何参数的需求,运用数字图像处理技术实现光纤几何参数测量。最大类间方差法用于分割高对比度光纤二次涂覆层区域;改进 Canny 算法用于提取低对比度光纤一次涂覆层和包层边缘,该算法在传统 Canny 算法的基础上运用局部区域距离阈值法代替双阈值法中的高阈值,实现单一边缘响应原则;结合使用二次曲线标准化法和齐次方程法用于边缘曲线拟合,并用高斯-牛顿迭代法求解光纤几何参数。检测结果与高精度光纤测试仪 FGM-502 进行对比,结果证明本文研究的光纤检测算法的有效性及准确性,满足企业光纤几何参数检测需求。

关键词: 光纤几何参数;改进 Canny 算子;边缘检测;曲线拟合;高斯-牛顿迭代

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Design of optical fiber geometric parameter detection algorithm based on machine vision

Chen Xiaorong Liu Yaru Shi Gaohui

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To meet the requirements of rapid detection of fiber cross-section geometry parameters in the measurement of industry, digital image processing technology is used to realize fiber geometric parameter measurement. The high-contrast fiber secondary coating layer region is segmented based on Otsu method; the edge detection is performed on the low-contrast fiber primary coating layer and cladding layer based on the improved Canny algorithm. The algorithm uses the local region distance threshold based on the traditional Canny algorithm. The method replaces the high threshold in the double threshold method to realize the single edge response principle; the curve is fitted to the edge based on the combination of the quadratic curve normalization method and the homogeneous equation method, and the Gauss-Newton iteration method is used to solve the fiber geometric parameters. The test results are compared with the high-precision fiber tester FGM-502, the results prove the validity and accuracy of the fiber detection algorithm studied in this paper, and the accuracy meets the requirements of enterprise fiber geometry parameter detection.

Keywords: optical fiber geometric parameters; improved Canny operator; edge detection; curve fitting; Gauss-Newton iteration

0 引 言

在光纤生产中,光纤的几何参数^[1]误差对光纤间的耦合效率起着决定性的影响,国内外学者对光纤的几何参数的测量做了很多研究。主要有:折射近场法^[2-3],即利用光纤折射率分布计算光纤参数,这种测量方法虽然测量精度高,但该方法一般为半自动式检测且实验装置复杂;近场扫描法^[4-5]是对近场放大像面进行扫描,测得近场强度分布扫描图,从而拟合光纤参数,该方法机构复杂且测量过程不直

观;数字全息法^[6-7]是用光电传感器及信号处理技术获得光纤特征继而得到光纤参数,但此算法计算复杂且需要精度极高的实验装置。本文基于机器视觉采用数字图像处理技术实现光纤横截面几何参数的检测,用最大类间方差法分割二次涂覆层;用改进 Canny 算法实现光纤一次涂覆层和包层边缘提取;结合使用二次曲线标准化法和齐次方程法以提高边缘曲线拟合的精确度。对各层边缘进行圆形拟合获得光纤各层的直径,对各层边缘进行椭圆拟合获得光纤各层不圆度,最终完成光纤几何参数检测。

1 图像增强

光纤一般由纤芯、包层和涂覆层组成。纤芯外围为包层,作用是把光波信号限制在纤芯内。包层外面为涂覆层,作用是保护光纤。图1所示为由摄像机采集的光纤图片。

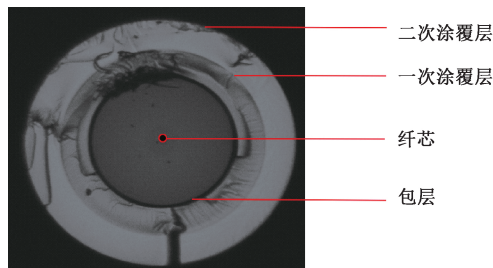
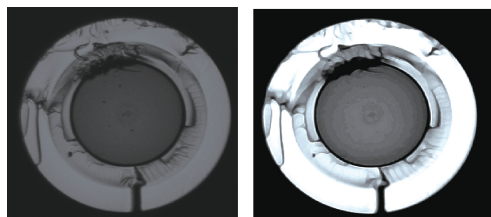


图1 光纤结构图

摄像机拍摄的光纤图片对比度低,为获得较高对比度光纤图片,对原图进行灰度变换。利用中值滤波对获得的高对比度光纤图像降噪处理。中值滤波器是用一定大小的滤波窗口,对窗口内的所有像素排序,找到中值,用中值替代中心像素值,从而可以消除孤立的噪声点。利用经典的一阶微分算子 Sobel 边缘检测算法对中值滤波后图像进行锐化处理。Sobel 算子计算水平和垂直方向的导数值,寻找图像边缘。图2所示为光纤原图和经过上述系列算法进行图像增强后的图像对比图。



(a) 光纤原图

(b) 增强后的光纤图像

图2 光纤原图与图像增强后的图像对比图

2 光纤二次涂覆层边缘检测

图像暗背景与亮的光纤物体具有明显的灰度差,用最大类间方差法^[8]对图像自适应阈值分割。用形态学开、闭运算消除区域毛刺,填补区域孔洞,即可直接分割出光纤物体区域,从而获得光纤二次涂覆层边缘^[9]。

最大类间方差法通过统计学的方法选取一个阈值,使得这个阈值可以将前景和背景尽可能的分开。选择阈值 k 对大小为 $M \times N$ 灰度级为 L 的图像进行阈值处理,图像被分割成暗背景 S_1 和亮物体 S_2 两部分。 S_1 的灰度值范围为 $[0, k]$, 像素被分到 S_1 中的概率为 p_1 , 平均灰度值为 g_1 。 S_2 的灰度值范围为 $[k+1, L-1]$, 像素被分到 S_1 中的概率为 p_2 , 平均灰度值为 g_2 。图像的总平均灰度为 g , 灰度级 i 出现的概率为 p_i , 图像类间方差记为 σ_B^2 。则有:

$$p_1 = \sum_{i=0}^k p_i, p_2 = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i \quad (1)$$

$$g_1 = \frac{1}{p_1} \sum_{i=0}^k i p_i, g_2 = \frac{1}{p_2} \sum_{i=k+1}^{L-1} i p_i \quad (2)$$

$$\sigma_B^2 = p_1 p_2 (g_1 - g_2)^2 \quad (3)$$

计算每个阈值 $k \in [0, L-1]$ 的类间方差,以最大的类间方差对应的阈值 k 作为最佳阈值。对阈值后的光纤区域进行图像亚像素边缘转化^[10],得到光纤二次涂覆层亚像素边缘,图3所示实线为提取的光纤二次涂覆层亚像素精度边缘。

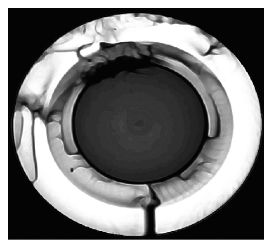


图3 二次涂覆层亚像素边缘

3 光纤一次涂覆层检测

光纤一次涂覆层与背景具有较低对比度,传统的 Canny 算法已经不能满足获取光纤一次涂覆层单一边缘的要求,所以对 Canny 算法进行改进以获得光纤一次涂覆层单一边缘响应。

3.1 光纤一次涂覆层 ROI 区域

二次涂覆层边缘进行圆形拟合得到二次涂覆层区域,用半径为 5 和半径 35 的圆形结构元对二次涂覆层区域腐蚀,分别得到外层红色实线围成的区域 S_1 和内层红色实线围成的区域 S_2 。两区域做差求得光纤一次涂覆层 ROI 区域,图4所示两条红色实线围成的区域为光纤一次涂覆层 ROI 区域。

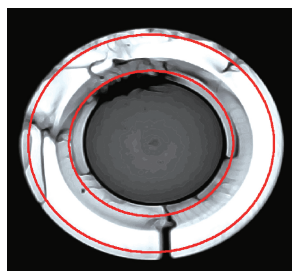


图4 光纤一次涂覆层 ROI 区域

3.2 传统 Canny 算法边缘检测原理

Canny 算子^[11]基本原理是首先对图像进行高斯平滑处理,通过一阶微分得到梯度图像,对梯度图像用“非最大抑制”算法,检测可能边缘。最后,对可能边缘进行双阈值处理,获得尽可能真实的边缘,并对边缘进行连接处理。主要步骤如下。

1) 图像平滑

Canny 方法首先采用二维高斯函数 $G(x, y)$ 对图像

$f(x, y)$ 进行平滑滤波以去除噪声, 得到图像 $f_s(x, y)$, 即:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

$$f_s(x, y) = G(x, y) * f(x, y) \quad (5)$$

式中: σ 为控制平滑程度的高斯滤波器参数, σ 较小时滤波器定位精度高, 但信噪比低, σ 较大, 则反之。

2) 梯度幅值和方向的计算

Canny 算子利用一阶微分算子计算平滑后的图像 $f_s(x, y)$ 各点处的梯度幅值和梯度方向, 从而获得相应的梯度幅值图像 $M(x, y)$ 和梯度方向图像 $\theta(x, y)$ 。

$$M(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left[\frac{g_y}{g_x}\right] \quad (7)$$

$$\text{其中 } g_x = \frac{\partial f_s}{\partial x}, g_y = \frac{\partial f_s}{\partial y}。$$

3) 非极大值抑制

为了精确定位边缘, 必须细化梯度幅值图像中的屋脊带, 而只保留幅值的局部极值, 即非极大值抑制。Canny 算子在梯度幅值图像 M 中以点 (x, y) 为中心 3×3 的邻域内沿梯度方向 $\theta(x, y)$ 进行插值, 如果点 (x, y) 处的梯度幅值 $M(x, y)$ 大于 $\theta(x, y)$ 方向上与其相邻的 2 个插值, 则将点 (x, y) 标记为候选边缘点, 反之则标记为非边缘点, 从而得到候选边缘图像 N 。

4) 检测和连接边缘

Canny 算子采用双阈值法从候选边缘点中检测和连接得到最终的边缘, 首先选取高阈值 T_h 和低阈值 T_l , 然后扫描图像, 检测候选边缘图像 N 中标记为候选边缘点的任一像素点 (x, y) 。若 (x, y) 点梯度幅值 $M(x, y)$ 大于高阈值 T_h 则该点一定是边缘点; 若点 (x, y) 梯度幅值 $M(x, y)$ 小于低阈值 T_l 则该点一定不是边缘点、而对于梯度幅值处于 2 个阈值之间的像素点, 则将其看作疑似边缘点, 需进一步依据边缘的连通性对其进行判断, 若该像素点的邻接像素中有边缘点, 则认为该点也为边缘点, 否则, 该点为非边缘点。

3.3 改进 Canny 算子边缘检测

在传统的 Canny 边缘检测方法中, 基于双阈值的边缘连接, 干扰边缘较多, 且受环境和光照的影响, 不满足单一边缘响应的需求。为了去除干扰, 本文运用低阈值对边缘进行筛选, 再运用局部区域距离阈值进行二次筛选。从而获得单一边缘响应。

距离阈值法检测边缘, 利用灰度直方图设置低阈值, 获得低阈值后的图像。为了获得图像的单一边缘响应, 需要对图像进行距离阈值处理。运用图像的中心坐标把图像分成 4 个区域 $S_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。即把图像边缘分配到 4 个不同的区域, 每个边缘坐标为 (x_i, y_i) 。每个区域的边缘个数 m_i , 利用边缘处灰度联通性较好的原理, 选出 S_i 区域中最长边缘作为理想对象, 对 S_i 区域的其他边缘进行筛

选。由于光纤涂覆层为近圆轮廓, 运用点到边缘的距离值筛选非轮廓区域。在 S_i 区域中, 图像的中心坐标到边缘的距离分别设为 $D_1, D_2, \dots, D_{m-1}, D_m$ 。其中圆心到最长边缘的距离为 D_{hi} , 以 D_{hi} 作为二次涂覆层理想距离筛选其他边缘。筛选满足 $[D_{hi} - \delta_0, D_{hi} + \delta_0]$ 的距离所对应的边缘, 其中 δ_0 为设定的微小量。

$$S_i = \begin{cases} \text{删除边缘坐标} & |D_m - D_{hi}| > \delta_0 \\ (x_i, y_i) & |D_m - D_{hi}| \leq \delta_0 \end{cases} \quad (8)$$

分别对 4 个区域筛选出符合条件的边缘, 并对筛选后的边缘进行边缘连接。用传统 Canny 边缘检测算法和改进后的边缘检测算法对光纤边缘提取, 传统 Canny 具有较多非目标边缘, 改进 Canny 算法获得的边缘具有单一边缘响应。图 5(a) 所示为传统 Canny 算子检测的边缘 (用红色实线表示), 图 5(b) 所示红色实线部分为改进 Canny 算法检测的边缘。在光纤检测中, 采用改进的 Canny 算法检测边缘, 以提高检测精准率。

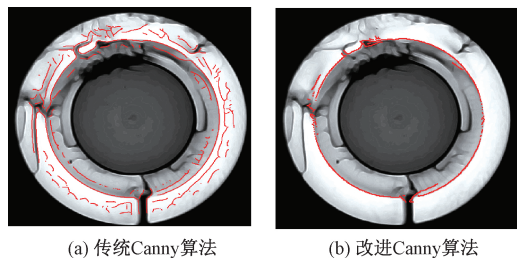


图 5 Canny 算法与改进 Canny 算法边缘检测对比图

4 曲线拟合

求解光纤几何参数需要对其边缘进行曲线拟合^[12-13], 求取光纤各层直径需要对边缘进行圆形拟合, 求取光纤不圆度需要进行椭圆拟合。圆形拟合和椭圆拟合算法类似, 本文主要研究椭圆拟合, 以获得椭圆几何参数中心坐标 $X_0 = (x_0, y_0)$ 、长轴 a 、短轴 b 、长轴转角 θ 。椭圆本文用二次曲线标准化法获得椭圆参数的近似值作为齐次方程法中椭圆参数初始迭代值, 用高斯牛顿迭代完成椭圆参数求解。二次曲线标准化法和齐次方程法相结合的方法可以提高椭圆拟合的精确度, 根据此算法计算出椭圆长短半轴 a 、 b , 继而根据以下公式求得椭圆不圆度 γ 。

$$\gamma = 2 \times \frac{a-b}{a+b} \times 100\% \quad (9)$$

4.1 二次曲线标准化法

以 $X_i = (x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, 表示在边缘轮廓上观测的 n 个点的坐标。用二次曲线标准化法对轮廓上离散点进行椭圆拟合。二次曲线一般方程经过转化可化为常数项为 1 的曲线方程:

$$b_1 x^2 + b_2 xy + b_3 y^2 + b_4 x + b_5 y + 1 = 0 \quad (10)$$

其中 b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 为待测参数。根据间接平差原理, 待测参数等于参数近似值与参数改正数之和。则二次

曲线方程可表示为矩阵形式。

$$\mathbf{C}'\mathbf{b}' + \mathbf{C}\boldsymbol{\delta} = 0 \quad (11)$$

参数近似值 $\mathbf{b}'^T = (b'_1, b'_2, b'_3, b'_4, b'_5, 1)$; 系数矩阵 $\mathbf{C}' = (x^2, xy, y^2, x, y, 1)$; 参数改正数 $\boldsymbol{\delta}^T = (\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5)$; 系数矩阵 $\mathbf{C} = (x^2, xy, y^2, x, y)$ 。

每一对坐标点列出误差方程:

$$V_i = \mathbf{C}'_i \mathbf{b}' + \mathbf{C} \boldsymbol{\delta} \quad (12)$$

通过最小化误差:

$$Q(\boldsymbol{\delta}) = \sum_{i=1}^n V_i^2 = \sum_{i=1}^n \mathbf{b}'^T \mathbf{C}'_i^T \mathbf{C}'_i \mathbf{b}' \quad (13)$$

为求最优解,令 $\frac{dQ(\boldsymbol{\delta})}{d\boldsymbol{\delta}} = 0$ 。求算结果为:

$$\mathbf{S}\boldsymbol{\delta} = \mathbf{S}'\mathbf{b}' \quad (14)$$

$$\text{其中, } \mathbf{S} = \sum_{i=1}^n \mathbf{C}'_i^T \mathbf{C}'_i, \mathbf{S}' = \sum_{i=1}^n \mathbf{C}'_i^T \mathbf{C}'_i \mathbf{b}'$$

使 $\mathbf{b}'^T = (0, 0, 0, 0, 0, 1)$ 作为初始迭代向量,迭代至参数改正数收敛,最终求得二次曲线方程^[14]。再利用椭圆几何参数求解公式间接求出椭圆参数。二次曲线标准化法间接求得的椭圆参数精度不高,需要对椭圆参数直接求解。运用齐次方程法可直接拟合椭圆参数,但输出结果受初始迭代值的影响,所以以二次曲线标准化法的求取结果作为齐次方程法的初始迭代值以提高椭圆拟合精度。

4.2 齐次方程法

二次曲线标准化法利用圆锥曲线方程的代数形式表示,椭圆的另一种更直观的方法是用平面坐标系的几何参数表示。椭圆在椭圆标准坐标系中的方程表示为:

$$f((x, y), \beta) = \mathbf{X}_s \Lambda^2 \mathbf{X}_s^T = 1 \quad (15)$$

$$\text{对角矩阵 } \Lambda = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} \end{bmatrix}, \text{椭圆坐标 } \mathbf{X}_s = (x_s, y_s)。$$

测量坐标系经过旋转,平移变成椭圆标准坐标系。它们之间的关系如下:

$$\mathbf{X}_s = \mathbf{R}(\theta)(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (16)$$

$$\text{旋转矩阵 } \mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

将式(16)代入式(15)中并对每一对测量点列出误差方程:

$$V_i = \mathbf{X}_{si} \Lambda^2 \mathbf{X}_{si}^T - 1 \quad (17)$$

误差方程是非线性的不能用传统的最小二乘法求最优解。用高斯-牛顿迭代法^[15]解决最小二乘非线性拟合问题。高斯-牛顿迭代法的基本思想是采用泰勒级数展开式去近似地代替非线性回归模型,经过多次迭代,不断修正回归系数,使回归系数不断接近非线性回归模型的最佳回归系数,目标是使原模型的残差平方和达到最小。高斯-牛顿迭代法的初始值选择二次曲线标准化法拟合所求参数。迭代公式如下:

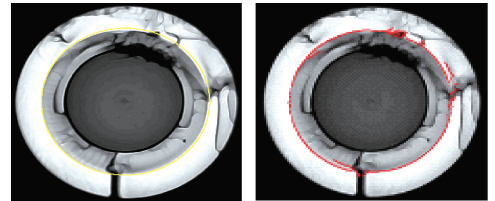
$$\beta^{(k+1)} = \beta^k + (\mathbf{J}_F^T \mathbf{J}_F)^{-1} \mathbf{J}_F^T V(\beta^k) \quad (18)$$

其中 $\mathbf{J}_F$ 是函数 $f((x, y), \beta)$ 对 β 的 Jacobian 矩阵

$$\mathbf{J}_F = \frac{\partial f_i((x_i, y_i), \beta^k)}{\partial \beta}$$

$$\text{即: } \mathbf{J}_F = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_0} & \frac{\partial f_1}{\partial y_0} & \frac{\partial f_1}{\partial a} & \frac{\partial f_1}{\partial b} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_0} & \frac{\partial f_2}{\partial y_0} & \frac{\partial f_2}{\partial a} & \frac{\partial f_2}{\partial b} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_0} & \frac{\partial f_n}{\partial y_0} & \frac{\partial f_n}{\partial a} & \frac{\partial f_n}{\partial b} & \frac{\partial f_n}{\partial \theta} \end{bmatrix}$$

光纤一次涂覆层为近圆轮廓,椭圆拟合线接近光纤一次涂覆层轮廓为最佳拟合效果。用本文研究的椭圆拟合算法对光纤边缘进行椭圆拟合,拟合效果与光纤原始轮廓吻合。图6(b)所示实线部分为光纤一次涂覆层椭圆拟合结果。



(a) 改进Canny算法

(b) 椭圆拟合结果

图6 光纤一次涂覆层椭圆拟合效果

5 结果分析

经过图像处理和分析后,可以测出光纤一次涂覆层、光纤二次涂覆层、光纤包层直径和一次涂覆层不圆度,二次涂覆层不圆度、包层不圆度。如图7所示红色实线为圆形拟合图,黄色虚线为椭圆拟合图。

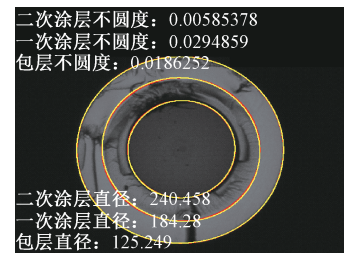


图7 光纤各层拟合圆及椭圆结果

为了更好说明本文研究算法的有效性,利用FGM-502光纤测试仪测量5类光纤每类光纤包含10个样本,求得每类光纤包层平均直径 d_1 、一次涂覆层平均直径 d_2 、二次涂覆层平均直径 d_3 ;包层平均不圆度 α 、一次涂覆层平均不圆度 β 、二次涂覆层平均不圆度 γ ,测量结果作为理论参考值。表1和表2所示分别为FGM-502光纤测试仪检测结果和本文算法检测结果。

表 1 FGM-502 光纤测试仪测量结果

光纤编号	$d_1/\mu\text{m}$	$\alpha/\%$	$d_2/\mu\text{m}$	$\beta/\%$	$d_3/\mu\text{m}$	$\gamma/\%$
1	124.870	0.095	188.520	0.313	240.592	0.173
2	125.120	0.160	186.824	0.142	242.073	0.314
3	125.093	0.144	188.349	0.075	242.539	0.090
4	125.046	0.169	187.584	0.206	239.913	0.062
5	124.834	0.148	192.551	0.130	239.681	0.727

表 2 本文算法对光纤的测量结果

光纤编号	$d_1/\mu\text{m}$	$\alpha/\%$	$d_2/\mu\text{m}$	$\beta/\%$	$d_3/\mu\text{m}$	$\gamma/\%$
1	125.407	1.505	187.218	0.517	240.833	0.195
2	124.223	1.567	185.237	0.573	242.550	0.276
3	125.480	0.787	186.747	0.435	242.359	0.368
4	126.294	0.708	187.341	0.966	240.097	0.378
5	124.475	1.118	192.136	0.681	239.261	0.755

根据表 1 和表 2 的测量数据,可看出本文算法对光纤一次涂覆层直径、二次涂覆层直径和包层直径检测接近于测试仪检测结果。经计算二次涂覆层检测精度达到 0.2%,一次涂覆层检测精度达到 0.5%左右,包层检测精度达到 0.5%左右。说明本文算法的可行性与准确性。

6 结 论

本文采用机器视觉技术,研究边缘检测算法和曲线拟合算法,针对传统 Canny 边缘检测算法检测出较多伪边缘的缺点,提出改进 Canny 算法和椭圆拟合算法对光纤横截面几何参数进行检测。实验对比验证了本文算法的有效性和准确性,达到企业对光纤检测的精度要求并已运用到实践中。由于光纤横截面是近圆轮廓,所以本文算法不能普遍适用,只局限于近圆轮廓或正方形轮廓。

参考文献

[1] 胡慧珠,缪立军,铁敏强,等.三种保偏光纤几何参数测量算法[J].红外与激光工程,2012,41(10):2728-2732.

[2] 郝爱华,毛智礼,贺锋涛.单模及多模光纤折射率分布测量方法研究[J].应用光学,2005,26(5):41-44.

[3] 高迎春.基于折射近场法测量光纤折射率分布的仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

[4] SAYERS A E, DORSEY W M, O"HAVER K W, et al. Planar near-field measurement of digital phased arrays using near-field scan plane reconstruction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(6):2711-2718.

[5] 韦哲,刘昌锦.相控阵天线方向图的近场功率测量法研究[J].测控技术,2014,33(8):30-32,36.

[6] EL-DIN M A S, WAHBA H H. Investigation of refractive index profile and mode field distribution of optical fibers using digital holographic phase shifting interferometric method[J]. Optics Communications, 2011,284(16-17):3846-3854.

[7] 闫成,黄素娟,曾俊璋,等.基于数字全息的双包层光纤参数测量[J].光电子·激光,2016,27(5):519-527.

[8] 何志勇,孙立宁,黄伟国,等.基于 Otsu 准则和直线截距直方图的阈值分割[J].光学精密工程,2012,20(10):2315-2323.

[9] 吴风和.基于计算机视觉测量技术的图像轮廓提取方法研究[J].计量学报,2007,28(1):18-22.

[10] TRUJILLO-PINO A, KRISSIAN K, ALEMAN-FLORES M, et al. Accurate subpixel edge location based on partial area effect [J]. Image and Vision Computing, 2013,31(1):72-90.

[11] WU Y, ZHAO X P, JIN Y, et al. Extracting golden area from image based on canny operator[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015,731(6):201-204.

[12] 郭成成,郑守住.一种有效的影像中椭圆形目标提取方法[J].电子测量技术,2017,40(4):167-171.

[13] 刘庆民,张蕾,吴立群,等.基于机器视觉的非均匀分布点圆度误差评定[J].计量学报,2016,37(6):567-570.

[14] 黄斌,孙永荣,杨博文,等.迭代最小二乘椭圆拟合的锥套图像检测与跟踪[J].中国图象图形学报,2014,19(8):1202-1209.

[15] 庞鸿锋,潘孟春,王伟,等.基于高斯牛顿迭代算法的三轴磁强计校正[J].仪器仪表学报,2013,34(7):67-72.

作者简介

陈晓荣,副教授,主要研究方向为图像处理、在线检测、信号与信息处理。
E-mail:cxrsjtu@163.com