

## 焦距测量中线纹清晰度评价函数的研究

刘济豪, 卢荣胜\*, 张紫龙, 张艾琳

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

**摘要** 当自动对焦用于玻罗板线纹等方向性强的目标时,线纹方向的不确定性导致一些清晰度函数的鲁棒性降低甚至无法找到对焦位置。针对上述问题,通过Hough直线检测得到离焦线纹的角度,构建一种基于Hough变换的线纹清晰度评价函数,该函数的灰度算子垂直于线纹,对线纹方向变化具有较强的鲁棒性。为了比较线纹方向对清晰度函数性能的影响,对5组不同角度的线纹图像进行评价,得到清晰度曲线,并引入平缓区标准差等参数对曲线进行定量评定。实验结果表明,与传统的评价函数相比,基于Hough变换的评价函数的平缓区均值减小59.85%,标准差减小46.05%,对焦偏差减小92.63%,平均运行时间减少36.37%,镜头焦距的相对误差减小62.12%。

**关键词** 测量; 自动对焦; 清晰度评价; 焦距测量; 放大率法; Hough变换

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221813

## 1 引言

在采用放大率法测量镜头焦距的过程中,需要通过显微镜获取清晰的玻罗板线纹图像,进而准确测量玻罗板线纹的间距以及镜头焦点的坐标<sup>[1]</sup>。人工手动调焦精度较低、耗时较长,通过自动对焦可获得最清晰的玻罗板线纹图像,能够有效保证线纹间距测量结果的准确性,提高测量速度。

自动对焦的关键问题是清晰度评价函数的选取。一个好的评价函数能够有效提高对焦精度和对焦速度。清晰度评价函数可以分为灰度函数、频域函数、信息熵函数、统计学函数等<sup>[2-3]</sup>。频域函数利用图像的高频信息来判断图像是否清晰,灵敏度较高,但是其计算量大、鲁棒性较差,在实际中使用较少;由于清晰图像的信息丰富,信息熵函数根据熵的大小来判断图像是否清晰,但是其灵敏度较低;统计学函数通过图像灰度直方图中灰度带变化的大小来判断图像是否清晰,但其准确性较差<sup>[4]</sup>;灰度函数是利用清晰图像的灰度变化最剧烈这一特点来找到最佳对焦位置,灰度函数以其稳定性好、速度快、原理简单,被广泛使用。常见的灰度函数有Brenner函数、Roberts函数、Laplace函数、Tenengrad函数、能量梯度(EOG)函数、灰度方差(SMD)函数等。但是,传统的灰度函数通常是对于某一特定主方向的目标才能取得较好的结果。在近些年的研究中,为了保证评价函数在不同方向的图像序列中都能取得较好的效果,常在传统灰度函数的基础上

增加更多方向的算子或者只是将几个评价函数简单地结合使用,从而在一定程度上提高了评价函数的普适性。Lüthi等<sup>[5]</sup>将Roberts函数用于火星着陆器上的显微镜自动对焦,通过对比发现Roberts函数对于光滑样品和机载图像融合效果较好;Yang等<sup>[6]</sup>基于人类视觉系统(HVS)的特点,在Sobel算子上增加了对角线方向并引入HVS加权系数,提高了不同方向特征的鲁棒性;He等<sup>[7]</sup>采用8邻域算子评价函数来获取清晰的低倍显微镜细胞图像,该函数能有效避免杂质对函数曲线的影响,具有良好的单峰性;王秀峰等<sup>[8]</sup>将空域拉普拉斯算子与频域离散余弦变换结合,该方法兼具两者的优点,但是其计算量也是二者之和;Bahy<sup>[9]</sup>分别计算模糊图像在垂直方向和竖直方向上相邻像素灰度差的平方和,取二者中的最大值作为评价函数;曾海飞等<sup>[10]</sup>在传统的Tenengrad函数的基础上增加两个对角线方向的算子,提出一种基于Tenengrad算子的自适应梯度阈值函数;熊锐等<sup>[11]</sup>针对微纳结构边缘方向的多样性,在传统的Brenner函数上增加竖直方向的算子并与Roberts函数结合,该函数对于不同边缘的显微图像均表现出良好的对焦性能。

对于玻罗板刻线以及线纹尺来说,线纹图像具有很强的方向性,并且线纹方向具有不确定性,这对传统灰度函数性能的劣化尤为明显。所以,在传统灰度函数的基础上增加更多方向的算子或者只是将几个评价函数简单地结合使用,能够在一定程度上增强评价函数对线纹角度变化的鲁棒性,但是这样牺牲了评价函

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2022-11-15; 录用日期: 2022-12-05; 网络首发日期: 2022-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(51875164)

通信作者: \*rslu@hfut.edu.cn

数的运行效率,大幅增加了评价函数的计算量和运行时间。在保证评价函数的运行效率的前提下,为了增强函数对不同主方向的图像序列的适应能力以及抗噪能力,本文提出了一种基于 Hough 变换的灰度函数,通过对离焦图像进行 Hough 直线检测得到线纹的角度,将角度信息引入评价函数的构建中。对于任意角度的线纹,确保评价函数的灰度算子的方向垂直于线纹方向,可提高评价函数对线纹方向变化的鲁棒性。

## 2 清晰度评价函数

### 2.1 传统的灰度评价函数的梯度方向

目标处于离焦位置时图像边缘细节模糊,位于正焦位置时图像边缘细节尖锐。这一特点在空域中表现为对于不同程度的离焦,图像相邻像素间的灰度差的大小也不相同,因此灰度评价函数利用图像的梯度信息作为图像清晰度的评价依据,如 Brenner 函数、Roberts 函数、Laplace 函数、Tenengrad 函数、EOG 函数等<sup>[12-14]</sup>。假设图像  $I$  的大小为  $M \times N$ ,  $(x, y)$  像素的灰度值为  $I(x, y)$ 。

1) Brenner 函数的表达式为

$$F = \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^{N-1} [I(x+2, y) - I(x, y)]^2 \quad (1)$$

2) Roberts 函数的表达式为

$$F = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \left\{ [I(x+1, y+1) - I(x, y)]^2 + [I(x+1, y) - I(x, y+1)]^2 \right\} \quad (2)$$

3) Laplace 函数的表达式为

$$\begin{cases} G = I \otimes \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ F = \sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} G^2(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

4) Tenengrad 函数的表达式为

$$G_x = I \otimes \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$G_y = I \otimes \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$F = \sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} [G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)] \quad (6)$$

5) EOG 函数的表达式为

$$F = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \left\{ [I(x+1, y) - I(x, y)]^2 + [I(x, y+1) - I(x, y)]^2 \right\} \quad (7)$$

图像的边缘就是灰度值变化较大的区域,具有方向和幅度两个特征,沿着图像边缘走向的像素灰度值

变化平缓,梯度算子的幅值小;垂直于边缘走向的像素灰度值变化剧烈,梯度算子的幅值大。这一特点在线纹中尤为明显,线纹的灰度分布如图 1 所示。通常用梯度向量的幅值和方向来表示这种灰度的变化,但是传统的灰度评价函数的梯度算子的方向往往是固定且较为单一的,如表 1 所示。

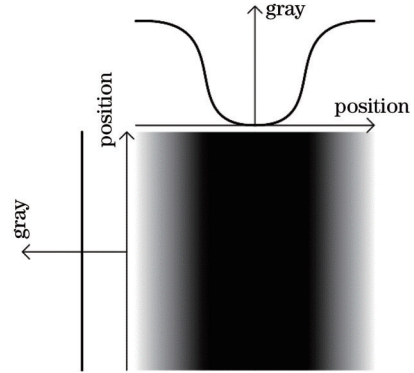


图 1 线纹的灰度分布

Fig. 1 Grayscale distribution of line pattern

表 1 灰度评价函数的梯度算子方向

Table 1 Direction of gradient operator of grayscale evaluation function

Evaluation function	Gradient direction
Brenner	0° (horizontal direction)
Roberts	45°, 135°
Laplace	0°, 90°
Tenengrad	Sobel operator direction
EOG	0°, 90°

从表 1 可以看出, Brenner 函数只利用水平方向的灰度差, Roberts 函数只利用对角方向的灰度差, Laplace 函数和 EOG 函数都是利用水平和竖直两个方向上的灰度差。这些清晰度函数的梯度算子方向比较单一,在某些特定的方向上梯度的幅值较大,具有较高的灵敏度,评价函数的性能受图像特征的方向影响较大。Tenengrad 函数利用了多个方向上的灰度差,能够减小图像特征的方向对性能的影响。

### 2.2 基于 Hough 变换的灰度函数

在利用放大率法测量焦距时,玻罗板的线纹角度往往是不固定的,而线纹的灰度变化大小与刻线的角度有关,线纹在垂直于刻线方向上的灰度变化最大,在沿线纹方向上的灰度变化最小<sup>[15]</sup>。在实际测量中,线纹图像的梯度向量的方向和幅值都是不确定的。但是,传统的基于灰度的清晰度评价函数都是利用一个或几个特定方向上的灰度差的平方和作为评价函数,这些评价函数的效果应该还取决于线纹方向。在梯度算子方向与线纹方向呈 90° 时,梯度算子的幅值最大,评价函数对噪声的抵抗能力最强,对于具有一定噪声的图像序列有较高的评价准确度;在梯度算子方向与

线纹方向一致且线纹处于离焦位置时,梯度算子的幅值小,评价函数对噪声非常敏感,对于具有一定噪声的图像序列往往会陷入局部极值的陷阱中。用于玻罗板线纹时,由于线纹角度未知,在线纹图像的离焦量较大时,传统评价函数的准确度和抗噪能力等性能具有较大的波动,稳定性较差。

为了提高评价函数对于不同角度线纹评价结果的稳定性,首先能够想到的方法是评价函数中尽可能多地加入不同方向的梯度算子,以保证对于任意一个角度的线纹,都有一个方向上的梯度算子与其垂直。这种方法的确能在一定程度上提高评价函数的稳定性,但是每增加一个方向上的梯度算子,评价函数的计算量也会增加一倍,这样会大幅增加计算量和运行时间。

为了保证评价函数对于倾斜不同角度的线纹都能具有良好的评价性能,并且不会增加评价函数的计算量,本文提出了基于 Hough 变换的灰度评价函数。基于 Hough 变换的灰度评价函数采用 Hough 直线检测得到离焦线纹图像的角度,计算垂直于线纹方向上的两个像素的灰度差及其平方和,并将其作为图像的清晰度评价函数,基于 Hough 变换的灰度评价函数的运算流程图如图 2 所示。

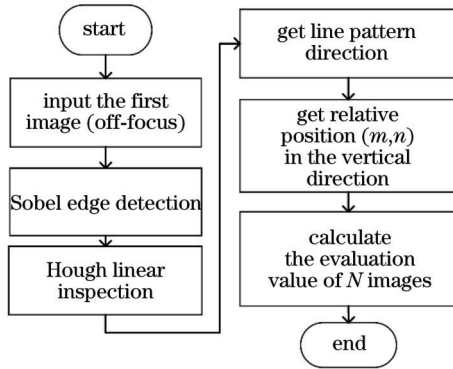


图 2 基于 Hough 变换的评价函数运算流程图

Fig. 2 Flow chart of evaluation function calculation based on Hough transform

首先通过 Sobel 边缘检测算子得到离焦-正焦-离焦线纹图像序列中的第 1 幅图像的边缘,再通过 Hough 变换将边缘图像从图像空间转化到 Hough 空间。经过变换,图像空间中的点  $(x, y)$  被映射到 Hough 空间极坐标系  $\rho-\theta$  中的一条三角曲线。由于图像空间中的每一条直线在 Hough 空间中都有一个点与之对应,而且该条直线中的任意一段线段都对应 Hough 空间中的同一点,统计 Hough 空间中三角曲线交于一点的次数,次数最多的那一点所对应的直线的斜率即为线纹的主方向<sup>[16-17]</sup>。在垂直于刻线的方向上找到两个像素  $(x, y)$  和  $(x+m, y+n)$ , 计算这两个像素的灰度差,如图 3 所示。 $m$  和  $n$  为两个像素在水平和垂直方向间隔的像素个数,  $m$  和  $n$  均为整数,  $m/n$  近似等于线纹

的斜率,则  $m$  和  $n$  满足

$$\begin{cases} \frac{m}{n} \approx \tan \theta \\ -5 \leq m \leq 5, -5 \leq n \leq 5 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中  $m$  和  $n$  的取值范围要适中:取值范围过大,则两像素的灰度差无法表示线纹边缘的灰度变化;取值范围过小,则评价函数的梯度算子方向与线纹法线方向的偏差过大。

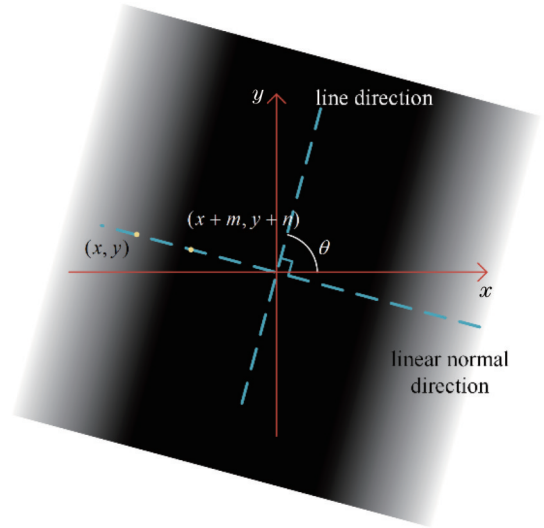


图 3 垂直于刻线方向上的两个像素

Fig. 3 Two pixels perpendicular to direction of inscribed line

最后计算垂直于刻线方向上的这两个像素的灰度差,并将所有像素的灰度差平方和作为图像的清晰度评价函数。基于 Hough 变换的灰度评价函数的函数表达式为

$$F = \sum_x \sum_y [I(x+m, y+n) - I(x, y)]^2 \quad (9)$$

从理论上分析,对于任意一个角度的线纹,本文所提出的清晰度评价函数能够保证梯度算子的方向与线纹近似垂直,即梯度算子方向与线纹灰度变化最剧烈的方向保持一致。梯度算子的幅值大,噪声对评价函数运算结果的影响较小,基于 Hough 变换的灰度评价函数具有较强的抗噪能力和稳定性。从式(9)中可以看出,该评价函数只利用了一个方向上的梯度算子。对于一个像素,评价函数只进行一次差运算和平方运算,其计算量与传统的 Brenner 评价函数相当。

### 3 实验结果

为了验证基于 Hough 变换的灰度评价函数在焦距测量中的对焦灵敏度、稳定性与运行效率等性能以及线纹角度对清晰度函数的影响,使用平行光管、电动位移台和数字显微镜搭建了一套镜头焦距测量系统,如图 4 所示。

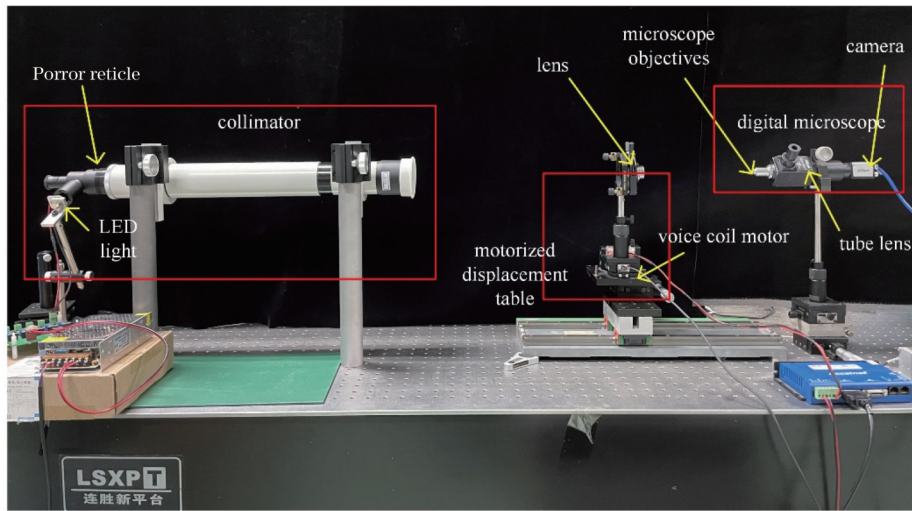


图 4 镜头焦距测量系统

Fig. 4 Lens focal length measurement system

为了减小光源频闪以及轴向色差对测量结果的影响,实验中使用LED单色光源。在测试过程中,为了减小平行光管出射光的平行度误差,需要对平行光管进行校正,确保玻罗板准确安装到平行光管焦平面上;再将待测镜头固定在电动位移台上,镜头跟随音圈电机从正离焦位置往负离焦位置移动,电机移动的步长为显微镜景深的一半;最后,通过数字显微镜拍摄一组玻罗板线纹像。数字显微镜由无限远共轭显微物镜、镜筒透镜和 CMOS 相机(华睿科技 A5201MG50)组成。放大倍数高、数值孔径大的显微物镜具有更小的景深,有利于提高自动对焦结果的准确性和焦点坐标

的测量精度;但是,更高放大倍数的显微物镜视场太小,不能满足使用要求,所以实验中采用数值孔径 NA 为 0.25 的 10 倍无限远共轭显微物镜、0.5 倍镜筒透镜和像元尺寸为  $4.8\ \mu\text{m}$  的  $2/3\ \text{inch}$  ( $1\ \text{inch}=2.54\ \text{cm}$ ) CMOS 相机。经计算,显微镜的景深大小为  $8.24\ \mu\text{m}$ ,所以在实验中音圈电机移动的步长设置为  $4\ \mu\text{m}$ 。

通过实验平台采集 5 组不同角度的离焦-正焦-离焦的玻罗板线纹图像,线纹角度分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$ 。图 5(a)~(c)分别为  $0^\circ$  方向、 $45^\circ$  方向和  $90^\circ$  方向的线纹。每组离焦-正焦-离焦的图像序列均包含 50 幅图像,图片大小为  $470\ \text{pixel}\times 470\ \text{pixel}$ 。

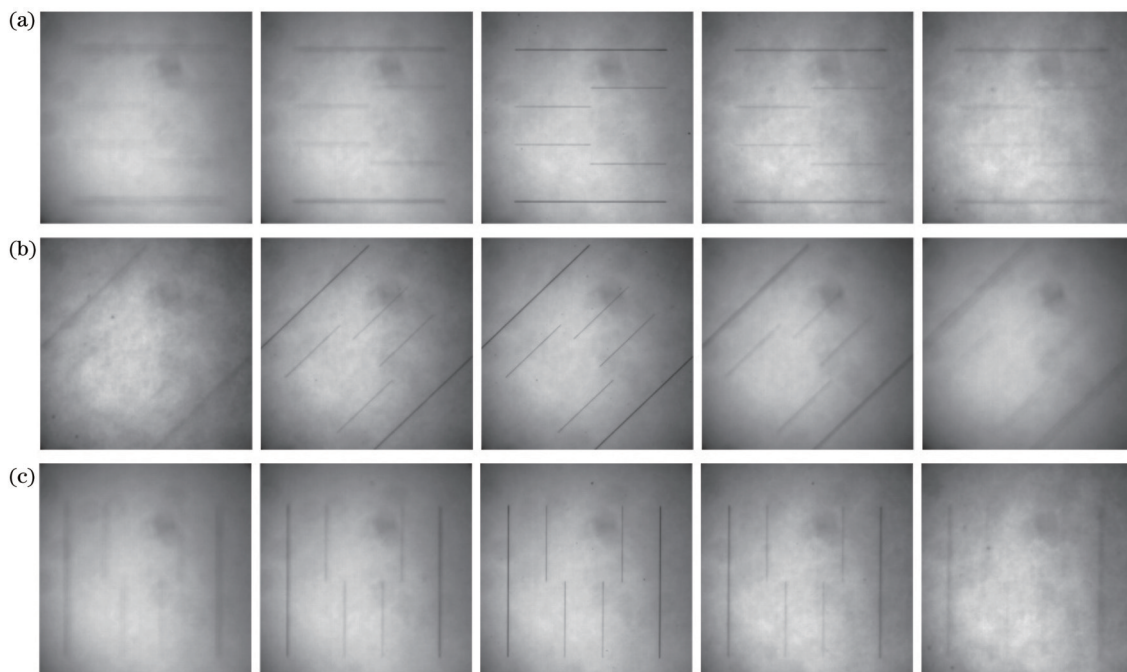


图 5 离焦-正焦-离焦的玻罗板线纹图像。(a)  $0^\circ$  线纹;(b)  $45^\circ$  线纹;(c)  $90^\circ$  线纹

Fig. 5 Out of focus-positive focus-out of focus Porror reticle line pattern images. (a)  $0^\circ$  line pattern; (b)  $45^\circ$  line pattern; (c)  $90^\circ$  line pattern

基于 Hough 变换的灰度函数通过 Hough 变换计算离焦量较大时线纹的角度。若 Hough 计算的角度产生较大误差或错误,可能对评价函数的性能造成很大的影响。所以,首先通过 Hough 变换分别检测 5 组角度下不同程度离焦的线纹,计算每组角度的均值、标准差和最大偏差,如表 2 所示。

表 2 Hough 变换对 5 组线纹序列的检测结果

Table 2 Detection results of Hough transform on 5 sets of line sequences unit: ( $^{\circ}$ )

Angle	Average value	Standard deviation	Maximum deviation
0	0.034	0.104	0.5
30	29.672	0.355	1.4
45	44.870	0.673	1.8
60	59.714	0.356	1.1
90	89.984	0.148	0.4

从表 2 可知,对离焦-正焦-离焦的线纹图像序列进行 Hough 变换,都能得到较高精度的角度,其中最大偏差均小于  $2^{\circ}$ 。由于基于 Hough 变换的灰度函数中梯度方向是近似于线纹的法线方向,其差值大于  $2^{\circ}$ ,所以离焦量较大对 Hough 变换的检测结果影响不大,对评价函数性能的影响可以忽略不计。

分别用 Brenner 函数、Roberts 函数、Laplace 函数、Tenengrad 函数、EOG 函数和基于 Hough 变换的灰度函数,对 5 组玻罗板线纹的图像序列进行评价运算。基于 Hough 变换的灰度函数中灰度算子的方向,即  $m$  和  $n$  的取值,随线纹角度的变化而变化。根据式(8),对于  $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$  和  $90^{\circ}$  的玻罗板线纹,  $(m, n)$  的取值分别为  $(0, 2)$ 、 $(3, 5)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(5, 3)$  和  $(2, 0)$ 。对于  $0^{\circ}$  线纹,  $(m, n)$  的取值为  $(0, 1)$  或者  $(0, 2)$  都能保证函数的灰度算子的方向垂直于线纹。但是,相比于选择相邻像素,选择相隔的两个像素能够减弱噪声的影响。间隔的像素过多,又难以表现边缘灰度的变化。因此,线纹角度为  $0^{\circ}$  和  $90^{\circ}$  时,  $(m, n)$  的取值为  $(0, 2)$  和  $(2, 0)$ 。通过 Bezier 曲线拟合得到归一化的清晰度评价函数曲线,如图 6 所示。最后,通过搜索算法找出评价曲线中的极值点。

利用一个良好的清晰度评价函数对图像进行清晰

度评价时,生成的聚焦评价曲线应该在形状上类似于高斯函数,即具有单峰性、无偏性、抗噪性、高灵敏度、实时性等特点<sup>[18-19]</sup>。

从图 6 中可以看出,对于不同角度的玻罗板线纹:在线纹处于水平时,Brenner 函数不满足其单峰性、无偏性等特性,无法准确得到正焦位置;在线纹位于其他角度时,Brenner 函数都能够准确找到正焦位置,灵敏度较高,其对噪声的抵抗能力随着线纹角度的变化逐渐增强。Roberts 函数对于 5 个角度的线纹都能较准确地对焦,但是它在平缓区具有较大的波动,更容易陷入局部极值的陷阱中。Laplace 函数和 EOG 函数都是计算水平和垂直方向上相邻像素的灰度差,它们的评价函数曲线也具有几乎相同的特点:它们在峰值附近具有较高的灵敏度;Laplace 函数和 EOG 函数对于  $45^{\circ}$  线纹能够准确对焦,但是对于其他角度的线纹,对焦误差较大,不满足无偏性的要求;Laplace 函数和 EOG 函数在平缓区也具有很明显的波动。Tenengrad 函数和基于 Hough 变换的灰度函数的效果很好,对于不同角度的线纹,在离焦位置的函数值和波动小,灵敏度高、抗噪能力强。

## 4 数据分析

为了能够准确客观地对比上述评价函数的优劣,需要引入一些定量指标来评定评价函数的性能。理想的归一化清晰度评价函数如图 7 所示,其中以评价函数值  $F_D$  对应的两点  $x_L$  和  $x_R$  为分界点,  $x_L$  的左边为左侧平缓区,  $x_R$  的右边为右侧平缓区,两个分界点之间为陡峭区,  $x$  处为正焦位置。当需要客观准确地比较各个清晰度评价函数的优劣时,可以引入平缓区均值、平缓区标准差、陡峭区占比、正焦位置偏差和平均耗时等指标<sup>[20]</sup>。

通过上述 5 类定量评价指标,定量评定 5 组玻罗板刻线的图像序列,每组图像序列有 50 幅图像,其中分界点的函数值  $F_D$  取 0.2,定量评定结果如表 3~7 所示。

从表 3~7 中的数据可以看出,对于不同角度的线纹图像,由于轻微离焦和正焦位置的线纹的梯度算子幅值较大,线纹角度对清晰度评价函数曲线中陡峭区

表 3 评价函数的定量评定结果( $0^{\circ}$ 刻线)Table 3 Quantitative evaluation results of evaluation function ( $0^{\circ}$  line)

Type of evaluation function	Percentage of steep areas $P_s / \%$	Focusing position deviation	Mean of smoothing area $M_s$	Standard deviation of smoothing area $\sigma$	Average time $\bar{T} / \text{ms}$
Roberts	58.02	0.079	0.103	0.051	14.771
Laplace	65.50	1.650	0.118	0.059	21.057
Tenengrad	52.30	0.048	0.043	0.029	47.200
EOG	65.68	1.587	0.118	0.061	15.114
Proposed function	48.59	0.047	0.049	0.031	14.257

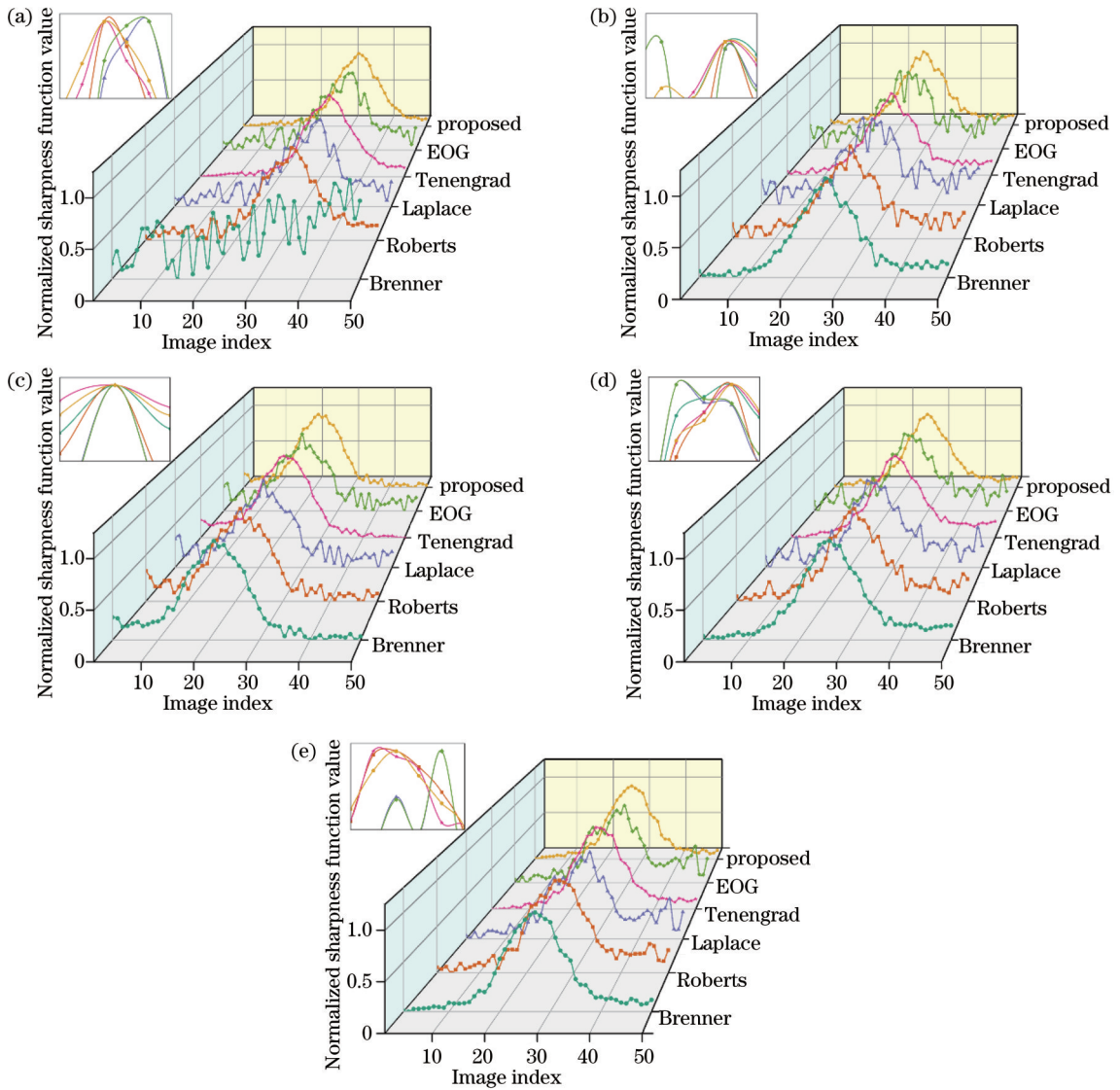


图 6 归一化评价函数曲线(左上为峰值附近的局部放大图)。(a) 0°线纹;(b) 30°线纹;(c) 45°线纹;(d) 60°线纹;(e) 90°线纹  
 Fig. 6 Normalized evaluation function curves (top left is partial magnification near peak). (a) 0° line pattern; (b) 30° line pattern; (c) 45° line pattern; (d) 60° line pattern; (e) 90° line pattern

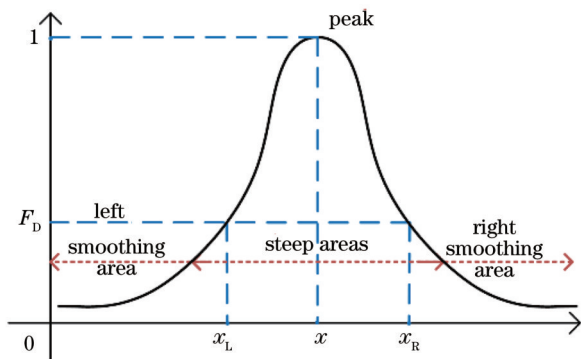


图 7 理想的归一化清晰度评价函数  
 Fig. 7 Ideal normalized clarity evaluation function

占比的影响较小。对于不同评价函数,陡峭区占比的波动也不大,最大波动率为 19.97%。但是,对于离焦量较大的线纹图像,由于其梯度算子幅值较小,评价函

数更容易受到线纹角度和噪声的影响,平缓区的均值和标准差的大小和波动较大,对评价函数的抗噪性能有明显的影 响。对于 Brenner 函数,在 0°线纹下,该函数无法满足无偏性和单峰性,对焦失败;对于其他角度的线纹,Brenner 函数的平缓区均值和标准差随线纹角度变化较明显,线纹角度越接近函数梯度算子方向,平缓区均值和标准差越小,函数的抗噪能力越强,平缓区均值的最大波动率为 43.25%,平缓区标准差的最大波动率为 44.50%。对于 Roberts 函数,其在不同角度的线纹下都表现出较差的抗噪能力,其平缓区的均值和标准差分别为 0.136 和 0.070。对于 Laplace 函数和 EOG 函数,两者都是利用竖直和水平方向上的梯度算子,因此具有相似的性能指标,平缓区均值为 0.180,标准差为 0.089。这两种评价函数的性能易受到噪声的影响,在平缓区容易陷入局部极值的陷阱中,而且函

表 4 评价函数的定量评定结果(30°刻线)

Table 4 Quantitative evaluation results of evaluation function (30° line)

Type of evaluation function	Percentage of steep areas $P_s / \%$	Focusing position deviation	Mean of smoothing area $M_s$	Standard deviation of smoothing area $\sigma$	Average time $\bar{T} / \text{ms}$
Brenner	51.61	0.063	0.097	0.069	14.486
Roberts	44.95	0.016	0.160	0.072	14.771
Laplace	33.63	2.357	0.255	0.105	21.057
Tenengrad	44.19	0.053	0.058	0.037	47.200
EOG	33.94	2.232	0.259	0.104	15.114
Proposed function	43.81	0.063	0.059	0.039	14.257

表 5 评价函数的定量评定结果(45°刻线)

Table 5 Quantitative evaluation results of evaluation function (45° line)

Type of evaluation function	Percentage of steep areas $P_s / \%$	Focusing position deviation	Mean of smoothing area $M_s$	Standard deviation of smoothing area $\sigma$	Average time $\bar{T} / \text{ms}$
Brenner	42.87	0.153	0.086	0.066	14.200
Roberts	45.70	0.165	0.131	0.074	14.400
Laplace	42.56	0.157	0.165	0.080	20.886
Tenengrad	41.68	0.051	0.051	0.042	46.886
EOG	42.95	0.157	0.160	0.080	14.286
Proposed function	43.81	0.052	0.051	0.042	14.229

表 6 评价函数的定量评定结果(60°刻线)

Table 6 Quantitative evaluation results of evaluation function (60° line)

Type of evaluation function	Percentage of steep areas $P_s / \%$	Focusing position deviation	Mean of smoothing area $M_s$	Standard deviation of smoothing area $\sigma$	Average time $\bar{T} / \text{ms}$
Brenner	51.25	0.176	0.084	0.045	14.545
Roberts	54.05	0.160	0.134	0.073	15.152
Laplace	54.36	1.876	0.167	0.082	21.485
Tenengrad	51.99	0.084	0.051	0.042	48.455
EOG	54.11	1.876	0.166	0.083	15.424
Proposed function	51.99	0.096	0.053	0.043	14.364

表 7 评价函数的定量评定结果(90°刻线)

Table 7 Quantitative evaluation results of evaluation function (90° line)

Type of evaluation function	Percentage of steep areas $P_s / \%$	Focusing position deviation	Mean of smoothing area $M_s$	Standard deviation of smoothing area $\sigma$	Average time $\bar{T} / \text{ms}$
Brenner	49.91	0.080	0.041	0.029	14.182
Roberts	45.94	0.470	0.152	0.080	14.485
Laplace	46.14	2.092	0.195	0.120	21.727
Tenengrad	50.31	0.082	0.039	0.031	47.455
EOG	46.14	2.092	0.192	0.123	14.545
Proposed function	49.91	0.080	0.041	0.029	14.242

数的正焦位置偏差明显大于其他函数。由于 Tenengrad 函数采用 Sobel 算子,该函数对线纹的方向较不敏感且具有较强的抗噪能力,平缓区的各项指标都远小于其他函数,平缓区的均值和方差分别为

0.048和0.036。但是 Tenengrad 函数中多方向算子在提升函数抗噪能力的同时,大幅增加了函数的运行时间,对比其他函数,其运行时间增加了 198.89%。基于 Hough 变换的线纹清晰度评价函数由于引入线纹

角度,可保证其梯度算子方向垂直于线纹,对于任意角度的线纹在对焦过程中都具有较大幅值的梯度算子,所以该函数在具有较陡峭的函数曲线的同时,还具有较强的抗噪能力,陡峭区占比的最大波动率为 8.00%,平缓区均值为 0.051,平缓区均值的最大波动率为 16.60%,平缓区标准差为 0.037,平缓区均值的最大波动率为 21.20%。

自动对焦中评价函数的作用是准确判断图像是否清晰。判断一个评价函数的优劣,最重要的也是准确

找到最清晰的图像,即正焦图像。正焦位置是否准确,直接影响镜头焦点坐标的测量精度,也影响正焦线纹图像的清晰程度,进而影响线纹间距以及镜头焦距的测量精度。分别通过上述 6 种评价函数获取正焦的线纹图像,再提取正焦线纹图像中的线纹中心线,得到线纹间距,最后根据线纹间距的测量结果计算出镜头的焦距。对于不同角度的线纹,分别测量 20 次镜头焦距 ( $f=40$  mm),根据 Grubbs 准则剔除粗大误差,计算焦距的平均值以及误差,如表 8 所示。

表 8 镜头焦距的测量结果

Table 8 Measurement results of focal length of lens

Function	Lens focal length $f$ / mm					Error / %
	0°	30°	45°	60°	90°	
Roberts	39.9905	39.9731	39.9697	39.9532	39.9677	0.117
Laplace	39.8554	39.8912	39.9727	39.8780	39.8468	0.383
Tenengrad	39.9934	39.9800	39.9690	39.9639	39.9647	0.090
EOG	39.8431	39.9062	39.9797	39.8737	39.8526	0.392
Proposed function	39.9922	39.9795	39.9726	39.9629	39.9637	0.093

从表 8 中镜头焦距的测量结果可以看出,所提出的评价函数能够提高镜头焦距的测量精度。Brenner 函数在线纹处于某些特定角度下对焦失败,无法进行镜头焦距的测量。Roberts 函数的对焦偏差小于 0.2 个步长,因此镜头焦距的测量精度较高,镜头焦距的相对误差为 0.117%;Laplace 函数与 EOG 函数在线纹角度为 0°、30°、60°和 90°时,函数的对焦偏差约为 2 个步长,正焦线纹不够清晰,镜头焦距的测量误差较大,镜头焦距的相对误差分别为 0.383%、0.392%;Tenengrad 函数和所提出的函数的对焦偏差小于 0.1 个步长,镜头焦距的测量精度最高,相对误差为 0.090%和 0.093%。

与传统的清晰度评价函数相比,基于 Hough 变换的灰度函数的平缓区均值平均减小 59.85%,标准差平均减小 46.05%,对焦偏差减小 92.63%。该函数只有一个方向上的梯度算子,大幅减少了计算量,平均运行时间减少 36.37%。在采用放大率法测量镜头焦距时,将基于 Hough 变换的评价函数用于自动对焦中,焦距的相对误差能够减小 62.12%。对于线纹图像的角度变化,本文所提出的清晰度评价函数有着较好的鲁棒性;在镜头焦距测量中,该函数具有稳定性好、运行速度快、测量精度高等特点。

## 5 结 论

针对焦距测量中波罗板线纹的方向不确定性导致清晰度评价函数准确性差、抗噪能力弱等问题,根据传统灰度函数的原理,对传统灰度函数的梯度算子方向进行分析。传统灰度函数的梯度算子方向单一且固定,对线纹的角度变化比较敏感;在传统函数的基础上添加更多方向算子又会增加计算量和运行时间。根据

线纹的灰度分布特性,在保证清晰度评价函数的运行效率的基础上,提出了基于 Hough 变换的线纹清晰度评价函数。该函数通过 Hough 变换在离焦图像中获取线纹的角度,将线纹角度引入评价函数的构建中,保证函数的梯度算子方向为线纹灰度变化最大的方向,以提高评价函数对线纹角度变化的鲁棒性。为了验证线纹角度对评价函数抗噪能力的影响,利用 Brenner 函数、Roberts 函数、Laplace 函数、Tenengrad 函数、EOG 函数和基于 Hough 变换的灰度函数对 5 组不同角度的波罗板线对图像进行清晰度评价,并引入陡峭区占比、平缓区波动量来定量评定评价函数的性能。实验结果表明,线纹角度对传统的清晰度评价函数曲线中陡峭区的参数影响较小,陡峭区占比的最大波动率为 19.97%。但是平缓区参数受到线纹角度的影响较大,Brenner 函数的平缓区均值的最大波动率为 43.25%。Tenengrad 函数与基于 Hough 变换的灰度函数在对焦稳定性和准确性上难分伯仲,但是 Tenengrad 函数所耗费的时间约是其他函数的 3 倍,可能难以满足快速对焦的需求。而对于任意角度的线纹,基于 Hough 变换的灰度函数在陡峭区和平缓区表现出良好的稳定性,陡峭区占比的最大波动率分别为 8.00%,平缓区标准差的最大波动率为 16.60%,平缓区均值的最大波动率为 21.20%。与传统的清晰度评价函数进行对比,基于 Hough 变换的灰度函数的平缓区均值平均减小了 59.85%,标准差平均减小了 46.05%,对焦偏差减小 92.63%,平均运行时间减少了 36.37%。所提出的函数能够提高镜头焦距的测量精度,焦距的相对误差减小 62.12%。该函数能够有效提高线纹测量中自动对焦的准确性和运行效率,对于具有明显方向性的图像分析,如缺陷检测、工件显微测量和病理学分析也



具有一定实际意义。

## 参 考 文 献

- [1] 杨建宇, 林家明, 余俊, 等. 基于数字图像处理方法的焦距测量技术研究[J]. 光学技术, 2007, 33(5): 796-798.  
Yang J Y, Lin J M, Yu J, et al. Research on focal length measurement based on digital image processing[J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 796-798.
- [2] 李奇, 冯华君, 徐之海, 等. 数字图像清晰度评价函数研究[J]. 光子学报, 2002, 31(6): 736-738.  
Li Q, Feng H J, Xu Z H, et al. Digital image sharpness evaluation function[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(6): 736-738.
- [3] 王焯茹, 冯华君, 徐之海, 等. 基于饱和像素剔除的自动对焦评价函数[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1210001.  
Wang Y R, Feng H J, Xu Z H, et al. Autofocus evaluation function based on saturate pixels removing[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1210001.
- [4] Qin B Y, Shang R, Li S Y, et al. Reliable clarity automatic-evaluation method for optical remote sensing images[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9675: 967533.
- [5] Lüthi B S, Thomas N, Hviid S F, et al. An efficient autofocus algorithm for a visible microscope on a Mars lander[J]. Planetary and Space Science, 2010, 58(10): 1258-1264.
- [6] Yang X L, Lu Y X, Sun D, et al. An improved clarity evaluation algorithm based on HVS theory[C]//2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, May 25-27, 2018, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2018: 852-855.
- [7] He C M, Li X R, Hu Y Y, et al. Microscope images automatic focus algorithm based on eight-neighborhood operator and least square planar fitting[J]. Optik, 2020, 206: 164232.
- [8] 王秀峰, 孙小伟, 王加科, 等. 余弦变换与拉普拉斯算子结合的聚焦评价方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2410005.  
Wang X F, Sun X W, Wang J K, et al. Focus measure operator combining cosine transform and Laplacian operator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2410005.
- [9] Bahy R M. Autofocus microscope system based on blur measurement approach[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1721(1): 012058.
- [10] 曾海飞, 韩昌佩, 李凯, 等. 改进的梯度阈值图像清晰度评价算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 2211001.  
Zeng H F, Han C P, Li K, et al. Improved gradient threshold image sharpness evaluation algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2211001.
- [11] 熊锐, 顾乃庭, 徐洪艳. 一种适应多方向灰度梯度变化的自动对焦评价函数[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0418001.  
Xiong R, Gu N T, Xu H Y. An auto-focusing evaluation function adapted to multi-directional gray gradient change[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0418001.
- [12] Osibote O A, Dendere R, Krishnan S, et al. Automated focusing in bright-field microscopy for tuberculosis detection[J]. Journal of Microscopy, 2010, 240(2): 155-163.
- [13] Rudnaya M E, Mattheij R M M, Maubach J M L. Evaluating sharpness functions for automated scanning electron microscopy [J]. Journal of Microscopy, 2010, 240(1): 38-49.
- [14] Redondo R, Cristóbal G, Garcia G B, et al. Autofocus evaluation for brightfield microscopy pathology[J]. Journal of Biomedical Optics, 2012, 17(3): 036008.
- [15] 徐从裕, 魏广智, 丁晨, 等. 线纹辨识与特征值提取算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1937-1942.  
Xu C Y, Wei G Z, Ding C, et al. Study on algorithm for line scale identification and eigenvalue extraction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(12): 1937-1942.
- [16] Fernandes L A F, Oliveira M M. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1): 299-314.
- [17] Herout A, Dubská M, Havel J. Review of Hough transform for line detection[M]//Real-time detection of lines and grids. London: Springer, 2012: 3-16.
- [18] 兰天成, 兰荣华, 陈晓西, 等. 液晶透镜爬山自动对焦算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1411003.  
Lan T C, Lan R H, Chen X X, et al. Research on liquid crystal lens hill climbing autofocus algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1411003.
- [19] 于春水, 卢荣胜. 叠焦大景深成像中的聚焦评价子性能评估方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 1415027.  
Yu C S, Lu R S. Performance evaluation method for focusing evaluation operator in superposed large depth imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 1415027.
- [20] 张从鹏, 曹文政, 徐明刚, 等. 结核杆菌涂片显微视觉检测系统的自动聚焦[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1480-1488.  
Zhang C P, Cao W Z, Xu M G, et al. Automatic focusing of micro-vision detection system of mycobacterium tuberculosis smear[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1480-1488.

## Sharpness Evaluation Function for Line Patterns in Focal Length Measurement

Liu Jihao, Lu Rongsheng\*, Zhang Zilong, Zhang Ailin

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

### Abstract

**Objective** When the focal length of a lens is measured by the magnification method, a microscope is used to obtain a line pattern image of the Perot plate. Line pair spacing is then measured to determine the focal length of the lens and the coordinates of its focal point. Consequently, the sharpness of the line pattern image, namely, the focusing accuracy, affects the measurement accuracy of the focal length and focal coordinates of the lens. Due to its poor accuracy,

inefficiency, and subjectivity, manual focusing has been gradually replaced by autofocusing. Currently, a grayscale-based evaluation function is frequently employed to determine the sharpness of a microscopic image. Although increasing the calculable directions of the evaluation function in a haphazard manner may improve the robustness of the function to some degree, it considerably prolongs the focusing time. To address the aforementioned issue, this study, starting from a line pattern's grayscale distribution, designs an evaluation function that retains favorable robustness and focusing accuracy without extending the focusing time when the angle of the line pattern varies.

**Methods** The direction of the line pattern is correlated with the grayscale distribution of the line pattern's edges. Grayscale variation is not apparent in the direction along the line pattern. In contrast, the grayscale value varies drastically in the direction perpendicular to the line pattern. A larger amplitude of the grayscale operator in the evaluation function corresponds to a smaller effect of noise on the evaluation function. Consequently, obtaining the angle of the line pattern and introducing the evaluation function are applicable to the autofocusing of line patterns. Specifically, Hough transform-based line detection is performed on the first image acquired (the image with a large defocusing amount). Being highly resistant to interference, Hough transform-based line detection is able to overcome negative effects, such as edge loss due to defocusing and more precisely determine the angle of a blurred line pattern. With due consideration given to the angle of the line pattern, a Hough transform-based sharpness evaluation function for line patterns is constructed to ensure that the direction of the grayscale operator in the function is always perpendicular to that of the line pattern. The proposed function is utilized for autofocusing under various angles of the line pattern to quantitatively evaluate the performance of the evaluation function and to investigate the effect of the angle of the line pattern on the performance of the evaluation function.

**Results and Discussions** To accommodate the strong directionality and uncertain direction of the line pattern, this study presents a Hough transform-based sharpness evaluation function for line patterns without sacrificing focusing efficiency. The proposed function improves the robustness of focusing and ensures high focusing efficiency. For line patterns with different defocusing amounts, Hough transform-based line detection can obtain their angles accurately. Moreover, the deviation of the angle of the line pattern obtained is invariably smaller than  $2^\circ$  (Table 2), indicating that the performance of the evaluation function is essentially unaffected. For line patterns at different angles, the Hough transform-based grayscale function exhibits small fluctuations in the smooth area, strong noise immunity, and favorable stability when the image is heavily defocused (Fig. 6). Additionally, the mean of the smooth area of the evaluation curve is 0.051, and its maximum fluctuation rate is 16.60%. The standard deviation of this area is 0.037 (Tables 3-7). Near the in-focus position, the focusing error is small, and the device has high focusing accuracy (Fig. 6), with a deviation smaller than 0.1 steps from the in-focus position (Tables 3-7). The Hough transform-based grayscale function also outperforms the conventional evaluation function (Fig. 6) in that it reduces the mean of the smooth area, the standard deviation, and the focusing deviation by 59.85%, 46.05%, and 92.63%, respectively, on average. Since the function has just one gradient operator, the computational effort is saved markedly, and the average running time is reduced by as much as 36.37% (Tables 3-7). In the measurement of a lens' focal length, the relative error in the focal length is reduced by 62.12% (Table 8).

**Conclusions** In this study, a Hough transform-based sharpness evaluation function for line patterns is constructed. This function can be used to accurately detect the angle of defocused line patterns by Hough transform-based line detection, and it incorporates the angle of the line pattern into the construction of the evaluation function. The grayscale operator in the evaluation function is perpendicular to the direction of the line pattern, and the grayscale value of the pixels perpendicular to the line pattern changes drastically with a large amplitude of the gradient operator. The grayscale value and distribution of the noise in the image of the line pattern are random, and the proposed evaluation function does not amplify the effect of the noise. The noise immunity is thereby enhanced. The experimental results show that the focusing accuracy and stability of the Hough transform-based grayscale function are not affected by the angle of the line pattern in the Perot plate. This function can prevent the search algorithm from falling into the trap of local extremes. Its focusing accuracy and focusing speed are also superior to those of the conventional focusing function, enabling it to meet the need for rapid and accurate focusing. In the measurement of a lens' focal length, the improvement of focusing accuracy ensures the measurement accuracy of line pair spacing, which in turn improves the measurement accuracy of focal length. As a result, the relative error in the focal length is reduced by 62.12%. The proposed Hough transform-based sharpness evaluation function for line patterns can effectively improve the accuracy and operational efficiency of autofocusing in focal length measurement. It has practical significance for images with obvious directionality, such as those in defect detection, microscopic workpiece measurement, and pathological analysis.

**Key words** measurement; autofocusing; sharpness evaluation; focal length measurement; magnification method; Hough transform