

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306767

基于改进梯度加权的零件图像高精度聚焦方法^{*}

曹震¹ 巢渊^{1,2,3} 徐魏¹ 杜帅帅¹ 张敏³

(1. 江苏理工学院机械工程学院 常州 213001; 2. 河海大学物联网工程学院 常州 213022;
3. 常州祥明智能动力股份有限公司 常州 213011)

摘要:以标准量块为实验对象,针对环形光源照射下的零件图像易出现倒角特征成像存在宽边缘,手动调焦缺乏相机聚焦的客观性而导致图像聚焦不精确等问题,提出一种基于改进梯度加权的零件图像高精度聚焦方法。首先采用条形光源 45° 布置的照射方式,消除倒角特征在成像中的宽边缘。其次,基于改进 Otsu 实现自适应分割阈值获取,提取图像特征边缘点。接着,基于 4 方向 Sobel 算子获取边缘点梯度值。然后,根据像素点与其 8 邻域像素点灰度分布差异值大小,获取像素点梯度加权系数。最后,通过改进梯度加权的聚焦评价函数完成图像清晰度评价,获取精确聚焦图像,实现高精度尺寸测量。实验结果表明,该方法相比传统高精度测量方法精度更高,与人工测量值相对误差在 0.002 4% 以内。改进聚焦评价函数相比传统评价函数清晰度比率平均提升 75 倍,灵敏度因子平均提升 5 倍,陡峭度平均提升 1 倍。

关键词:自动聚焦;清晰度评价;光源优化;梯度加权;视觉测量

中图分类号: TP391; TN302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

High-precision focusing method for parts image based on improved gradient weighting

Cao Zhen¹ Chao Yuan^{1,2,3} Xu Wei¹ Du Shuaishuai¹ Zhang Min³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;
2. College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;
3. Changzhou Xiangming Intelligent Drive System Corporation, Changzhou 213011, China)

Abstract: Taking the standard gauge block as the experimental object, to address the problems that the chamfer features of the parts are prone to wide edges in the parts image under the illumination of ring light source, and the inaccurate image focusing is caused by manual focusing, which lacks the objectivity of camera focusing, etc., a high-precision focusing method of parts image based on improved gradient weighting is proposed. Firstly, the illumination method of the strip light source arranged at a 45-degree angle is adopted to eliminate the wide edges of the chamfer features in the parts image. Secondly, the feature edge points of image are extracted by the adaptive segmentation threshold based on the improved Otsu. Then, the gradient values of edge pixels are obtained based on the 4-direction Sobel operator. Then, according to the grayscale distribution difference between the pixel and its 8 neighboring pixels, the gradient weighting coefficient of the pixel is obtained. Finally, the sharpness evaluation of image is completed by the improved function of gradient-weighted focus evaluation, thus, the accurate focus image is obtained and the high-precision measurement of size is realized. The experimental results show that the proposed method is more accurate than the traditional high-precision measurement method, and the relative error with the manual measurement is less than 0.002 4%. The improved focus evaluation function in this paper is improved by 75 times in sharpness ratio, 5 times in sensitivity factor and double in steepness on average compared with the traditional evaluation functions.

Keywords: auto-focus; articulation evaluation; light source optimization; gradient weighting; vision measurement

0 引言

随着现代工业自动化的发展,视觉测量技术在高精度零件尺寸测量领域得到广泛的研究和应用^[1]。工业零件是自动化设备的重要组成部分,通常存在倒角、圆环、矩形和凹槽等特征^[2-4],这些特征的尺寸精度将会直接影响设备的使用寿命和稳定性。因此,工业零件尺寸的高精度测量具有重要意义。目前,非接触式的机器视觉技术能够有效提高零件尺寸测量的精度和效率^[5]。该视觉测量方式主要通过相机拍摄零件图像,以零件图像作为检测对象进行尺寸测量,使用标准量块标定系统像素当量,将零件图像的像素尺寸转换为实际尺寸^[6]。采集高质量的图像,有利于提高尺寸测量的精度^[7],高质量的图像通常可通过优化光源^[8]和提高图像聚焦精度^[9]来获取。不同的光照方式会影响图像特征边缘的精确定位和提取^[10],采用环型光源垂直向下照射的光照方式,零件倒角特征成像存在宽边缘,不利于图像边缘的提取^[11]。为优化光照方式,使用光学仿真软件 TracePro 进行光照模拟,能够高效直观地反映光源的照度情况^[12]。为采集高质量零件图像,不仅需要采用合适的光照方式获取精确的图像边缘,还需要对零件图像进行精确聚焦。人工手动调焦缺乏相机聚焦的客观性,无法保证获取精确聚焦的零件图像,需要通过理想的聚焦评价函数对图像进行清晰度评价。

图像聚焦中经典的图像清晰度评价函数通常基于空域^[13]、频域^[14]和信息熵^[15]。基于空域的函数主要通过图像灰度梯度来描述图像的清晰度,计算简单且计算量小,但抗噪性不高。基于频域的函数计算量大,耗时较长,对噪声敏感。基于信息熵的函数受光照影响大,灵敏度和抗噪性低。因此,基于空域的灰度梯度评价函数通常得到广泛应用。为解决由目标内容分布及噪声引起干扰的问题,文献[16]提出一种新的自动聚焦算法,先设定阈值剔除大量无用的图像子块确定聚焦窗口,然后计算窗口子块的梯度、方差和像素加权作为聚焦评价函数,其算法在抗噪性、灵敏度和稳定性方面具有一定优势,但其不适用于特征简单的零件图像。针对传统的灰度梯度算法抗噪性和实时性低的问题,文献[17]提出改进的梯度阈值图像清晰度评价算法,该算法通过自适应分割阈值提取整幅图像的边缘像素点,采用多方向 Tenengrad 算子对图像进行评价运算,具有较强的抗噪性,但其灵敏度不高需要进一步提升。为提高图像清晰度评价算法的灵敏度,文献[18]提出改进的 Tenengrad 加权图像清晰度评价算法,该算法基于多方向 Sobel 算子对图像求梯度,通过人为设定加权系数对梯度进行加权,评价算法的抗噪性和灵敏度有所提高,但自适应性差。

为提高零件尺寸检测精度,本文对零件图像高精度聚焦方法进行改进。为解决环光下零件倒角特征在成像中存在宽边缘的问题,采用条形光源 45°布置的照射方式消除成像中的宽边缘,获取精确的图像边缘。针对传统视觉测量过程中存在目标图像聚焦不够精确的局限性^[19],提出基于改进梯度加权的零件图像高精度聚焦方法,对序列图像进行清晰度评价获取最清晰聚焦图像,实现高精度尺寸测量。通过两种光照下量块尺寸测量、本文和传统方法下量块尺寸测量、本文和传统聚焦函数性能评价等实验对比与分析,验证本文提出方法的有效性。

1 算法原理

1.1 传统聚焦评价函数

为获取聚焦零件图像,需要通过聚焦评价函数对图像清晰度进行定量表征,将聚焦评价函数值最高的图像作为聚焦图像^[20]。选择具备灵敏度高、稳定性好、抗噪性强等特点的聚焦评价函数对图像的精确聚焦至关重要。本文首先就具有单峰性、无偏性和灵敏性的几种典型灰度梯度评价函数,进行简要分析。

1) Tenengrad 梯度函数

Tenengrad 梯度函数通过 Sobel 算子分别对像素点水平和垂直方向卷积获取梯度值,该梯度函数对噪声具有较强的抗干扰能力。表达式如式(1)所示。

$$F = \sum_x \sum_y (G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)) \quad (1)$$

$$G_x(x, y) = f(x, y) \otimes g_x \quad (2)$$

$$G_y(x, y) = f(x, y) \otimes g_y \quad (3)$$

$$g_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$g_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $f(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的灰度值, $\otimes$ 为卷积运算。 $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$ 分别为像素点 $f(x, y)$ 与 Sobel 算子水平和垂直方向的卷积, g_x 和 g_y 为相应的卷积模板。

2) Brenner 函数

Brenner 函数通过两个邻近像素点灰度差值平方作为相应像素点的梯度值。该函数具有较高的灵敏性和较强的抗噪性。表达式如式(6)所示。

$$F = \sum_x \sum_y [f(x+2, y) - f(x, y)]^2 \quad (6)$$

3) Roberts 能量函数

Roberts 能量函数通过 4 个相邻像素点对角灰度差值平方和作为相应像素点的梯度值。该函数具有较高的

灵敏性。表达式如式(7)所示。

$$F = \sum_x \sum_y \{ [f(x+1, y+1) - f(x, y)]^2 + [f(x+1, y) - f(x, y+1)]^2 \} \quad (7)$$

4) 平方梯度函数

平方梯度函数分别对相邻行和列的两个像素点进行灰度值求差,差值平方和作为相应像素点的梯度值。该函数具有较好的单峰特性。表达式如式(8)所示。

$$F = \sum_x \sum_y \{ [f(x+1, y) - f(x, y)]^2 + [f(x, y+1) - f(x, y)]^2 \} \quad (8)$$

5) 绝对梯度函数

绝对梯度函数通过同列中相邻行的两个像素点灰度差值绝对值作为相应像素点的梯度值。该函数能够反映图像的边缘细节和纹理变化特征,计算简单。表达式如式(9)所示。

$$F = \sum_x \sum_y |f(x+1, y) - f(x, y)| \quad (9)$$

1.2 评价函数性能指标

为验证改进算法的灵敏性、稳定性和抗噪性,本文选用清晰度比率^[21]、灵敏度因子^[22]、陡峭度^[23]等进行定量指标评价。

1) 清晰度比率

清晰度比率表示聚焦特性曲线中最大值和最小值的比值,该比值能够表示曲线的变化幅度,幅度越大聚焦效果越好。其表达式为:

$$R = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} \quad (10)$$

式中: R 为清晰度比率, $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 分别为聚焦特性曲线的最大值和最小值。

2) 灵敏度因子

灵敏度因子表示聚焦特性曲线聚焦位置附近清晰值的变化情况。将聚焦位置的最大清晰值与附近偏离聚焦位置的清晰值求相对变化量,变化量值越大,灵敏度因子越大,图像聚焦效果越好。其表达式为:

$$S_{\text{sen}} = \frac{F_{\max} - F(x_{\max} + \delta)}{F(x_{\max} + \delta)} \quad (11)$$

式中: S_{sen} 为灵敏度因子, $F_{\max}$ 和 $x_{\max}$ 分别为聚焦特性曲线的最大值和对应的横坐标, δ 为聚焦特性曲线横坐标的变化量。

3) 陡峭度

陡峭度表示聚焦特性曲线陡峭区清晰值的变化率,变化率越大,聚焦越灵敏,图像聚焦效果越好。陡峭度以聚焦位置为中心,分为左、右两个陡峭度,将两侧陡峭度均值作为聚焦特性曲线的陡峭度。其表达式为:

$$\begin{cases} S_t = \frac{S_{lt} + S_{rt}}{2} \\ S_{lt} = \frac{F_{\max} - F_{lct}}{W_l} \\ S_{rt} = \frac{F_{\max} - F_{rct}}{W_r} \end{cases} \quad (12)$$

式中: S_t 为整体曲线陡峭度, S_{lt} 和 S_{rt} 分别为曲线左侧和右侧陡峭度。 F_{lct} 和 F_{rct} 分别为左侧和右侧平缓区和陡峭区临界点处的聚焦函数值, W_l 和 W_r 分别为左右两侧陡峭区宽度。

1.3 改进梯度加权评价函数

1) 邻域灰度分布相关性

零件图像的特征边缘像素点个数在全局图像中占比较少^[24],特征边缘像素点梯度值高于非边缘像素点且通常作为清晰度评价的主要梯度信息^[25]。传统评价函数存在灵敏性差和易受噪声干扰等局限性,在评价高分辨率噪声零件图像时易产生清晰度评价误差。因此有必要针对传统灰度梯度评价函数的灵敏性和抗噪性进行改进,提高评价函数的稳定性。通过求取零件图像特征边缘像素点的梯度进行清晰度评价,实现零件图像聚焦。

图像特征边缘像素点邻域灰度分布通常存在差异,差异较大时评价效果较好。为提高聚焦评价函数的灵敏度,需要综合考虑特征边缘像素点与其邻域像素点灰度分布差异因素,对边缘像素点梯度进行加权^[18]。如图1(a)所示,传统梯度加权系数通常基于特征边缘像素点4邻域灰度分布差异关系获取,该方法只考虑图像空域中的水平和垂直两个方向,存在邻域方向不全面的局限性,易导致加权系数获取出现误差影响图像清晰度评价。因此需要针对梯度加权系数获取方法进行改进,如图1(b)所示,通过增加邻域45°、135°、225°和315°方向的灰度分布差异分析,有效提高了梯度加权系数获取的精确性和稳定性。根据特征边缘像素点与邻域像素点灰度分布差异关系分析其相关性^[26],本文提出基于8邻域灰度分布差异的改进梯度加权评价函数。

为获取归一化梯度加权系数,需要求取邻域灰度平均值进行像素点与邻域相关性分析。考虑到随机椒盐噪声可能会对邻域像素点产生灰度值突变的影响,导致清晰度评价出现误判,本文提出选取邻域灰度最优均值的方法。通过求取像素点与邻域灰度最优均值的相关性获取梯度加权系数 P ,能够有效增强梯度加权算法的灵敏性和抗噪性,如式(13)所示。通过对邻域筛选的6个有效灰度值求均值获取最优均值 f_{ave} ,能够保证邻域灰度均值的可靠性,如式(14)所示。通过遍历比较8邻域灰度值获取最大灰度值 $\max_{(i,j) \in S}$ 和最小灰度值 $\min_{(i,j) \in S}$,以其为界限进行邻域有效灰度值的判断,从而消除噪声点的干扰,如

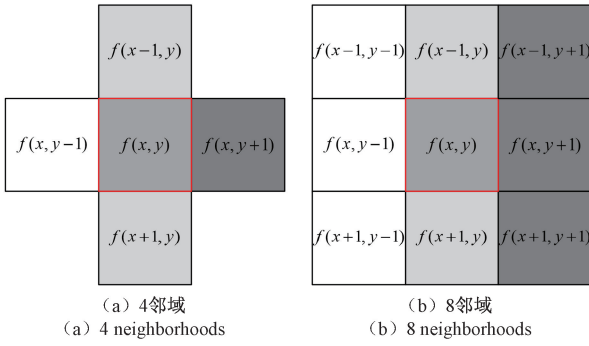


图 1 邻域灰度分布图

Fig. 1 Distribution images of neighborhood gray scale

式(15)所示。

$$P = 1 - \frac{2 \times f(x, y) \times f_{ave}}{f^2(x, y) + f_{ave}^2} \quad (13)$$

$$f_{ave} = \frac{1}{6} \sum_{(i,j) \in S} f(x+i, y+j) \times \lambda_{i,j} \quad (14)$$

$$\lambda_{i,j} = \begin{cases} 1, & f(x+i, y+j) \in (\min_{(i,j) \in S}, \max_{(i,j) \in S}) \\ 0, & f(x+i, y+j) \in \{\min_{(i,j) \in S}, \max_{(i,j) \in S}\} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $f(x, y)$ 为像素点灰度值, S 为 8 邻域点的集合, i, j 分别为像素点 8 邻域点的横、纵坐标。

2) 图像特征边缘提取

应用传统 Otsu 算法进行零件图像特征边缘提取时,虽然能够自适应获取分割阈值,但易受噪声影响,在零件图像特征边缘点判定过程中易产生误差。因此有必要针对图像自适应分割阈值获取方法进行改进,获取抗噪性较强的自适应分割阈值,提高图像特征边缘像素点提取的精确性。

为提高清晰度评价函数的抗噪能力,本文提出基于改进 Otsu 的自适应分割阈值获取方法,精确筛选出图像特征边缘有效像素点,进而对有效边缘点进行清晰度评价运算。改进的自适应分割阈值表达式为:

$$T = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum \sum [f(x, y) - T_{Otsu}]^2} \quad (16)$$

式中: $M \times N$ 为图像像素尺寸, T_{Otsu} 为传统 Otsu 自适应分割阈值^[27]。

采用局部灰度方差分析图像像素点的边缘特性,以像素点 (x, y) 为中心,选用 3×3 的局部窗口计算该像素点的灰度方差,局部灰度方差表达式为:

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 [f(x+i, y+j) - \mu(x, y)]^2 \quad (17)$$

$$\mu(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 f(x+i, y+j) \quad (18)$$

式中: $\sigma^2(x, y)$ 为局部灰度方差, $\mu(x, y)$ 为局部灰度平

均值, $f(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的灰度值。

将改进自适应阈值 T 作为图像有效边缘点的筛选界限,有效边缘点置 1,非边缘点置 0。图像边缘有效像素点 $C(i, j)$ 筛选表达式为:

$$C(i, j) = \begin{cases} 1, & \sigma^2(x, y) \geq T \\ 0, & \sigma^2(x, y) < T \end{cases} \quad (19)$$

3) 改进 4 方向 Tenengrad 函数

Tenengrad 梯度函数存在梯度方向不全面的局限性,易使图像清晰度评价产生误差。零件图像特征边缘像素点的梯度方向具有多方向随机性,为提高零件图像特征边缘像素点梯度计算的精确性和稳定性,需要改进 Tenengrad 函数,通过对像素点的 8 个方向求梯度值,将所求梯度值之和作为像素点的最终梯度。综合考虑梯度方向的全面性和梯度值的计算量,本文提出改进 4 方向 Tenengrad 梯度算法,能够有效解决梯度方向的随机性问题。

改进的 4 个方向算子模板表示为:

$$g_0 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$g_{45} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$g_{90} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$g_{135} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: g_0 、 g_{45} 、 g_{90} 和 g_{135} 分别为水平、45°、垂直和 135°方向的模板。

通过 4 个方向的 Sobel 算子模板对图像边缘像素点卷积求梯度。改进的梯度算法表达式为:

$$F = \sum_x \sum_y [G_1^2(x, y) + G_2^2(x, y) + G_3^2(x, y) + G_4^2(x, y)] \quad (24)$$

$$G_1(x, y) = f(x, y) \otimes g_0 \quad (25)$$

$$G_2(x, y) = f(x, y) \otimes g_{45} \quad (26)$$

$$G_3(x, y) = f(x, y) \otimes g_{90} \quad (27)$$

$$G_4(x, y) = f(x, y) \otimes g_{135} \quad (28)$$

式中: $G_1(x, y)$ 、 $G_2(x, y)$ 、 $G_3(x, y)$ 和 $G_4(x, y)$ 分别为像素点 $f(x, y)$ 在 0°、45°、90°和 135°方向的梯度值。

对像素点梯度进行加权,加权后的梯度之和即为清晰度评价价值 $F_{\text{weighted-gradient}}$ 。表达式为:

$$F_{\text{weighted-gradient}} = \sum_x \sum_y \{ [G_1^2(x, y) + G_2^2(x, y) + G_3^2(x, y) + G_4^2(x, y)] \times P \} \quad (29)$$

式中: P 为梯度加权系数, 计算公式如式 (13) 所示。

1.4 图像聚焦及零件尺寸测量的实现

本文为实现高精度尺寸测量, 通过图像聚焦获取量块聚焦图像, 如图 2 所示, 为图像聚焦流程图。使用 30 mm 标准量块聚焦图像进行标定, 高精度测量零件像素尺寸, 如图 3 所示, 为零件尺寸测量流程图。

步骤 1) 通过优化光照方式提高量块边缘精度, 采用条形光源与量块表面呈 45° 布置的照射方式, 消除倒角特征在成像中的宽边缘。

步骤 2) 以步距 1 mm 改变相机与目标物之间的工作距离, 采集序列图像并记录相应相机拍照位置。

步骤 3) 应用式 (16) 获取自适应分割阈值, 提取序列图像有效特征边缘点。

步骤 4) 基于 4 方向 Sobel 算子, 应用式 (24) 准确获取边缘像素点的梯度值。

步骤 5) 根据边缘像素点与其 8 邻域像素点灰度分布差异值大小, 应用式 (13) 获取梯度加权系数。

步骤 6) 通过梯度加权系数对 4 方向梯度值进行加权, 应用式 (29) 获取清晰度评价。

步骤 7) 归一化清晰度评价, 绘制聚焦特性曲线, 找到聚焦图像和相应相机拍照位置, 实现图像聚焦。

步骤 8) 对量块聚焦图像使用 Zernike 矩亚像素边缘检测^[28]提取量块边缘坐标。

步骤 9) 依据文献[28]遍历提取的图像边缘像素点, 搜索保存边缘最外侧像素点, 通过最小二乘法拟合边缘直线, 求取其中一条边缘直线上随机 500 个点到另一条边缘直线的平均距离作为量块宽度的像素尺寸。

步骤 10) 同理, 采用以上相同的算法对零件求取像素尺寸, 通过标定的像素当量获取实际尺寸。

2 实验结果与分析

2.1 实验平台搭建

为验证光照优化方法的效果和改进图像聚焦算法的性能, 设计图像采集平台原理图如图 4 所示, 搭建实验平台如图 5 所示。图像采集平台硬件装置主要包括 Z 轴手轮调节滑台、海康威视型号为 MV-CS200-10UM 的 2000 万像素黑白面阵 CMOS 工业相机、德鸿视觉型号为 M150-04XMPW 且工作距离为 150 mm 的双远心镜头、可调环形和条形白光光源、上位机和 SHAHE 三和量仪生产的标准量块。上位机系统为 Windows 11, 图像处理软件为 OpenCV 3.4.1 版本, 光源仿真分析软件为 TracePro 7.0.3 版本, 曲线绘制软件为 MATLAB R2022a 版本, 处理器为 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.30 GHz, 内存 16 GB。

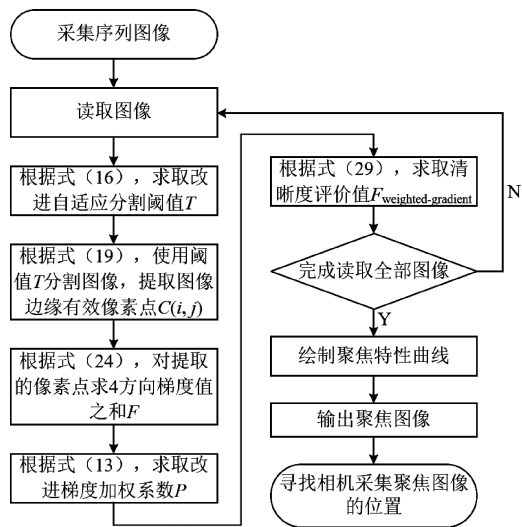


图 2 图像聚焦流程

Fig. 2 Flow chart of image focusing

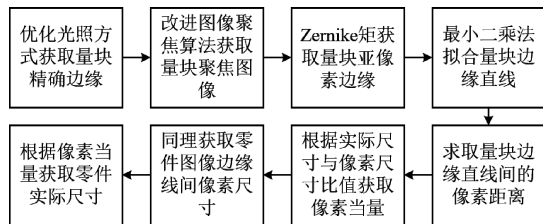


图 3 零件尺寸测量流程

Fig. 3 Flow chart of parts size measurement

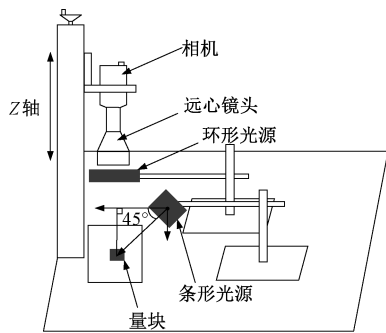


图 4 图像采集平台原理

Fig. 4 Schematic diagram of image acquisition platform

2.2 量块尺寸测量对比实验

1) 光照分析与系统标定

为验证本文提出的光源优化效果, 本文分别使用环光正上方照射和条光 45° 照射方式采集量块图像, 以尺寸测量的精度作为光源优化效果的评价指标。

图像采集过程中, 相机是通过接收量块表面反射的光线数量决定成像明暗, 倒角处反射进入相机靶面光线较少。因此, 虽然在光照仿真分析中倒角表面存在光照,

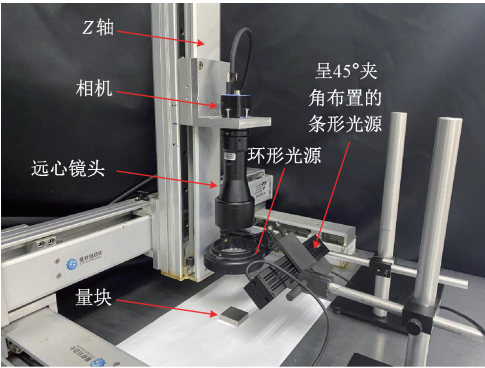


图 5 图像采集实验平台

Fig. 5 Experiment platform of image acquisition

但实际采集效果中倒角成像为暗。本文通过 TracePro 光源仿真软件对两种光照方式下的量块表面和倒角照度进行模拟分析,如图 6 所示。

分析照度图可知,如图 6(a)和(b)所示,环光下量块的表面照度高于倒角照度,量块表面比倒角亮。如图 6(c)和(d)所示,条光下量块的表面照度略高于倒角照度,但都属于低照度,成像时偏暗。如图 6(a)和(c)所示,量块表面在环光下的照度高于在条光下的照度,环光下成像高亮,条光下成像偏暗。两种光照下倒角照度都低于表面照度,成像都偏暗。

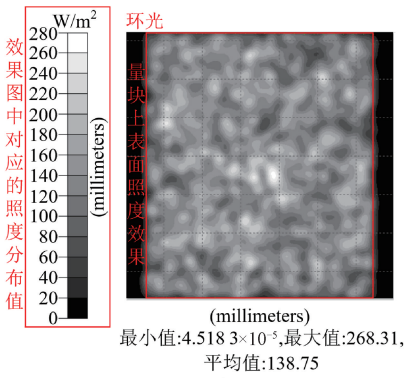
为进一步分析光源优化的实际成像效果,分别用两种光照方式进行量块图像采集,如图 7(a)和(b)所示。综合考虑光源类型和光照角度因素,两种光照方式具备各自的最优成像照度。在两种光照下量块边缘背景成像都会存在阴影,分别调节环形光源和条形光源亮度直至阴影消失,获取特征边缘和背景分明的量块图像。如图 7(a)所示的环光照射下量块表面成像高亮,倒角呈现黑色像素点的宽边缘。如图 7(b)所示的条光照射下量块表面成像偏暗,倒角融入量块表面整体,有效避免了宽边缘现象的影响。

分别对两种光照下的 30 mm 量块聚焦图像重复测量 10 次,环光和条光下量块的像素宽度分别为 4 930. 863 61 和 4 929. 641 39 pixels,求得像素当量分别为 0. 006 084 13 和 0. 006 085 64 mm/pixel。

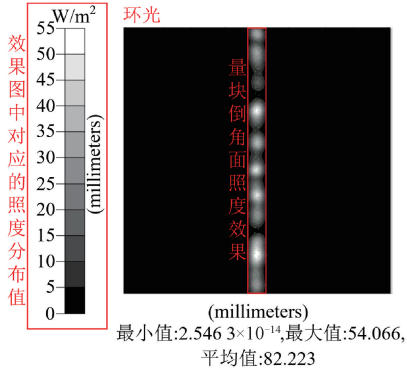
2) 光源优化效果分析

应用两种像素当量标定结果分别测量 20 mm 量块实际尺寸,采用精度为 0. 002 mm 杠杆千分尺进行人工测量,测得量块宽度为 20. 000 mm,将 3 个测量值进行对比,如表 1 所示。

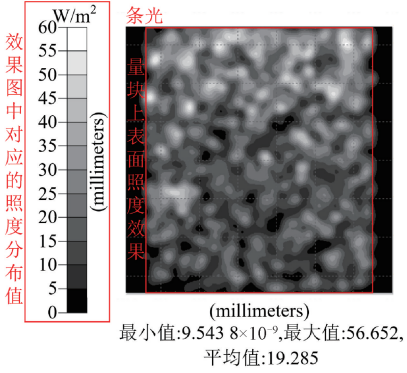
由表 1 可知,通过环光和条光标定测得量块尺寸分别为 19. 994 56 和 19. 999 53 mm,误差均值分别为-5. 44 和-0. 47 μm,与人工测量值的相对误差分别为-0. 027 2%和-0. 002 4%。原因在于,环光下的量块图像



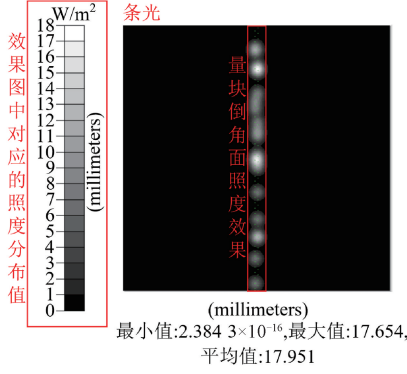
(a) 照度图1
(a) Illuminance diagram 1



(b) 照度图2
(b) Illuminance diagram 2



(c) 照度图3
(c) Illuminance diagram 3



(d) 照度图4
(d) Illuminance diagram 4

图 6 量块仿真照度图

Fig. 6 Simulation illuminance diagram of gauge block

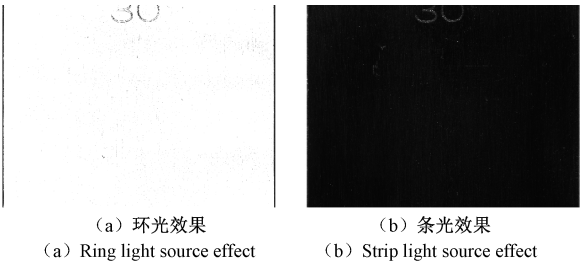


图 7 采集的量块聚焦图像
Fig. 7 Focus images of acquired gauge block

表 1 两种像素当量下量块尺寸测量结果
Table 1 Results of gauge block size measured by two pixel equivalents

序号	测量的像素值/ pixel	环光下像素当量	条光下像素当量
		标定值测得的 实际值/mm	标定值测得的 实际值/mm
1	3 286. 351 90	19. 994 59	19. 999 55
2	3 286. 364 13	19. 994 66	19. 999 64
3	3 286. 351 58	19. 994 59	19. 999 55
4	3 286. 345 66	19. 994 55	19. 999 52
5	3 286. 359 85	19. 994 64	19. 999 60
6	3 286. 329 71	19. 994 46	19. 999 42
7	3 286. 311 70	19. 994 35	19. 999 31
8	3 286. 352 91	19. 994 60	19. 999 56
9	3 286. 336 78	19. 994 50	19. 999 46
10	3 286. 369 80	19. 994 70	19. 999 66
平均值	3 286. 347 40	19. 994 56	19. 999 53
误差均值		-0. 005 44	-0. 000 47
相对误差/%		-0. 027 2	-0. 002 4

在倒角处存在一定宽度像素,在筛选边缘像素点时易受噪声和光照影响,提取精度下降。本文提出如图 5 所示的条形光源 45°布置照射方法,能够消除量块图像的倒角宽边缘,筛选边缘像素点时更精确。

为验证本文方法在高精度测量应用中的有效性,通过以上相同测量对比方法,将本文图像聚焦方法的尺寸测量精度与文献[29]中手动调焦的尺寸测量精度进行对比。文献[29] Zernike 矩方法与本文方法的尺寸测量值,以及人工测量值的对比如表 2 所示。

由表 2 可知,应用文献[29] Zernike 矩方法和本文方法测得量块尺寸分别为 19. 995 46 和 19. 999 53 mm,误差均值分别为-4. 54 和-0. 47 μm,与人工测量值的相对误差分别为-0. 022 7%和-0. 002 4%。文献[29] Zernike 矩方法与本文方法存在 0. 8 个像素差异,原因是文献[29] Zernike 矩方法检测的量块图像通过手动调焦采集,图像聚焦不精确,特征边缘提取存在误差,Zernike 矩边缘检测精度下降,影响实际尺寸测量的精度。本文方法检测的高精度量块聚焦图像,边缘提取更精确,有效提高 Zernike 矩边缘检测精度,实现尺寸的高精度测量。

表 2 两种算法测量量块尺寸结果

Table 2 Results of gauge block size measured by two algorithms

序号	文献[29]算法测量的像素值/pixel 与实际值/mm		本文算法测量的像素值/pixel 与实际值/mm	
1	3 287. 129 48	19. 995 44	3 286. 351 90	19. 999 55
2	3 287. 123 20	19. 995 41	3 286. 364 13	19. 999 64
3	3 287. 135 63	19. 995 48	3 286. 351 58	19. 999 55
4	3 287. 120 87	19. 995 39	3 286. 345 66	19. 999 52
5	3 287. 140 88	19. 995 51	3 286. 359 85	19. 999 60
6	3 287. 137 18	19. 995 49	3 286. 329 71	19. 999 42
7	3 287. 130 22	19. 995 45	3 286. 311 70	19. 999 31
8	3 287. 133 39	19. 995 47	3 286. 352 91	19. 999 56
9	3 287. 139 88	19. 995 51	3 286. 336 78	19. 999 46
10	3 287. 135 50	19. 995 48	3 286. 369 80	19. 999 66
平均值	3 287. 132 63	19. 995 46	3 286. 347 40	19. 999 53
误差均值		-0. 004 54		-0. 000 47
相对误差/%		-0. 022 7		-0. 002 4

2. 3 聚焦评价算法对比实验

1) 图像聚焦实验

为验证本文改进聚焦评价函数的性能,将选择的几种灰度梯度评价函数、文献[17]中的 Improved-Tenengrad 评价函数、文献[18]中的 Proposed-Tenengrad 评价函数与之进行对比试验。本文实验对象为 25 张分辨率为 5 472×3 648 的“离焦-聚焦”量块序列图,部分图像及局部放大图像展示如图 8 所示。

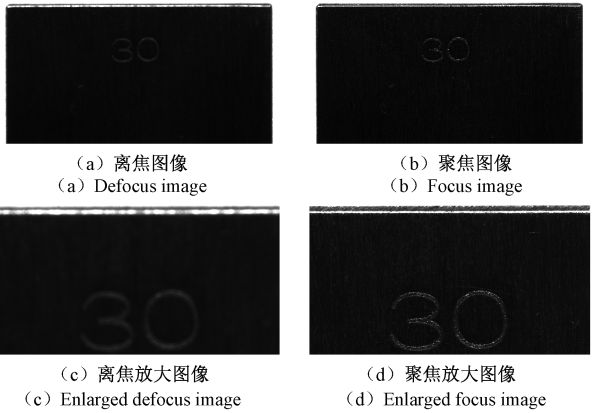


图 8 部分量块序列图像

Fig. 8 Partial sequence images of gauge block

通过 MATLAB 将归一化处理后的序列图像清晰值绘制成图像聚焦特性曲线,如图 9 所示。通常性能优异的评价函数特性曲线都满足单峰性、无偏性、灵敏性和陡峭性^[30]。通过对比可以看出,本文 Weighted-Gradient 函数,相比 Improved-Tenengrad 函数具有更好的灵敏性和陡峭性,相比 Proposed-Tenengrad 函数、Tenengrad 函数、Brenner 函数、Roberts 能量函数、平方梯度函数和绝对梯度函数具有更高的清晰度比率、灵敏性和陡峭性。

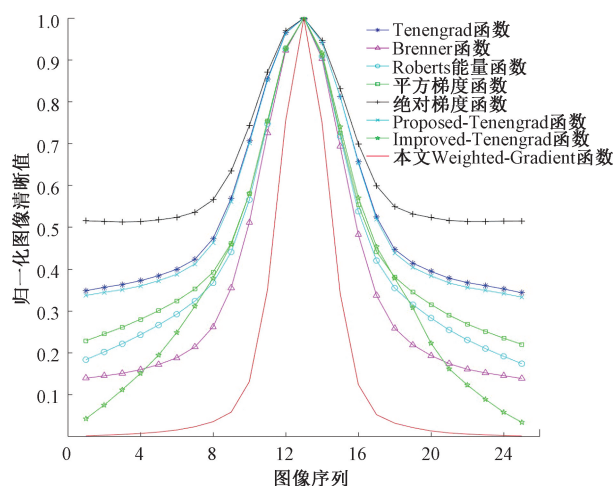


图 9 序列图像聚焦特性曲线

Fig. 9 Focusing characteristic curves of sequence images

为验证本文改进聚焦评价函数的抗噪性,在量块序列图像中分别添加 3 000 和 5 000 的随机椒盐噪声,方差 σ 为 3 和 5 的高斯噪声。添加噪声后的图像聚焦特性曲线如图 10 所示。

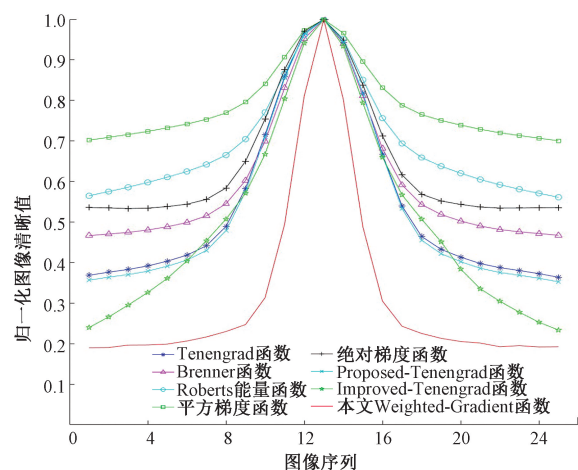
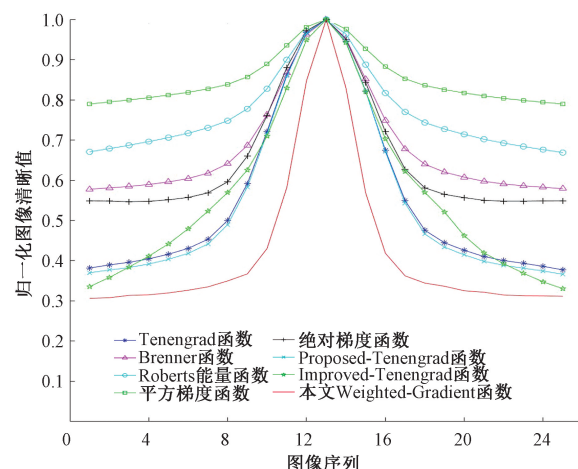
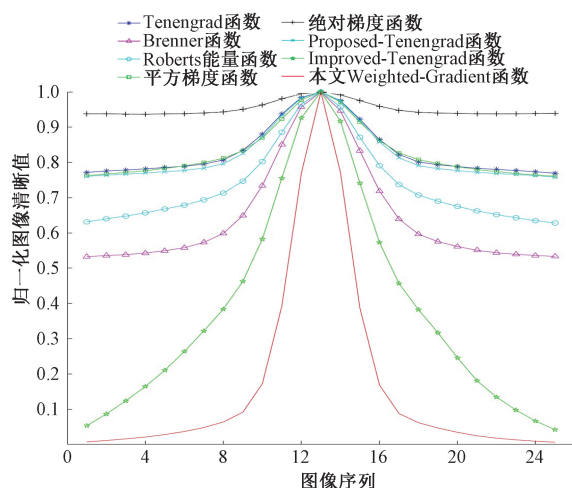
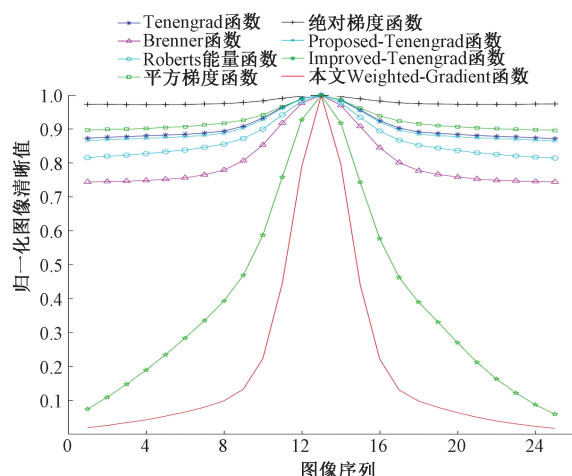
(a) 3 000 椒盐噪声
(a) 3 000 salt-and-pepper noise(b) 5 000 椒盐噪声
(b) 5 000 salt-and-pepper noise(c) 方差为3的高斯噪声
(c) Gaussian noise with variance of 3(d) 方差为5的高斯噪声
(d) Gaussian noise with variance of 5

图 10 添加噪声的图像聚焦特性曲线

Fig. 10 Focusing characteristic curves of image with noise

从图 10 可以看出,在椒盐噪声下,所有评价函数都有清晰度比率下降的趋势,并且随着椒盐噪声的增大而降低,但本文聚焦评价函数清晰度比率依旧高于对比评价函数。本文聚焦评价函数灵敏性和陡峭性基本不变,其余评价函数灵敏性和陡峭性下降。在高斯噪声下,本文聚焦评价函数和文献[17]中 Improved-Tenengrad 评价函数的清晰度比率、灵敏性和陡峭性基本不变,且 3 个指标都优于 Improved-Tenengrad 评价函数。文献[18]中 Proposed-Tenengrad 评价函数与传统评价函数随着高斯噪声的增大,聚焦特性曲线越趋于平缓,灵敏性下降,陡峭性下降。因此,本文聚焦评价函数对椒盐和高斯噪声都有着较强的抗噪性。

2) 算法性能分析

采用如式(10)、(11)和(12)所示的清晰度比率 R 、灵敏度因子 S_{sen} 和陡峭度 S_t ,验证本文聚焦评价函数的

聚焦效果、抗噪能力、灵敏性和陡峭性,其中灵敏度因子的坐标变化量 δ 取值为 2,陡峭度的分界点视聚焦特性曲线选取。本文聚焦评价函数与对比评价函数在无噪声干

扰的情况下,性能指标如表 3 所示;在添加噪声的情况下,性能指标如表 4 所示。

表 3 聚焦函数评价性能指标

Table 3 Evaluation performance metrics of focusing functions

性能指标	Tenengrad 函数	Brenner 函数	Roberts 能量函数	平方梯度函数	绝对梯度函数	Proposed-Tenengrad 函数	Improved-Tenengrad 函数	本文 Weighted-Gradient 函数
R	2. 910	7. 190	5. 736	4. 537	1. 950	3. 002	29. 226	593. 231
S_{sen}	0. 231	0. 442	0. 394	0. 378	0. 203	0. 232	0. 351	1. 924
S_t	0. 097	0. 131	0. 128	0. 123	0. 088	0. 099	0. 136	0. 236

表 4 聚焦函数在不同噪声下的评价性能指标

Table 4 Evaluation performance metrics of focusing functions under different noise

性能指标	噪声类型	噪声能量	Tenengrad 函数	Brenner 函数	Roberts 能量函数	平方梯度函数	绝对梯度函数	Proposed-Tenengrad 函数	Improved-Tenengrad 函数	本文 Weighted-Gradient 函数
R	椒盐	3 000	2. 749	2. 144	1. 782	1. 427	1. 875	2. 835	4. 281	5. 267
		5 000	2. 651	1. 731	1. 495	1. 267	1. 829	2. 733	3. 026	3. 263
	高斯	3	1. 299	1. 877	1. 593	1. 315	1. 067	1. 318	23. 985	162. 483
		5	1. 147	1. 344	1. 228	1. 115	1. 029	1. 156	16. 924	57. 745
S_{sen}	椒盐	3 000	0. 222	0. 233	0. 175	0. 116	0. 193	0. 224	0. 259	1. 049
		5 000	0. 217	0. 175	0. 127	0. 079	0. 186	0. 218	0. 219	0. 759
	高斯	3	0. 084	0. 200	0. 148	0. 094	0. 025	0. 088	0. 349	1. 587
		5	0. 045	0. 101	0. 070	0. 040	0. 011	0. 048	0. 345	1. 266
S_t	椒盐	3 000	0. 094	0. 081	0. 068	0. 052	0. 074	0. 096	0. 099	0. 189
		5 000	0. 092	0. 072	0. 051	0. 036	0. 072	0. 094	0. 086	0. 159
	高斯	3	0. 039	0. 080	0. 058	0. 038	0. 013	0. 041	0. 135	0. 228
		5	0. 024	0. 049	0. 033	0. 019	0. 006	0. 025	0. 134	0. 217

由表 3 可知,无噪声干扰时,将本文聚焦评价函数的 3 个指标分别与对比评价函数对应的 3 个指标均值求差值百分比,其中清晰度比率平均提升 75 倍,灵敏度因子平均提升 5 倍,陡峭度平均提升 1 倍。本文聚焦评价函数在评价序列图像时,聚焦图像有效边缘像素点个数远高于最模糊离焦图像,对有效像素点求 4 方向梯度平方和并进行加权,能够进一步有效增大聚焦图像与最模糊图像的清晰值差值,大幅提高了评价函数的清晰度比率。随着聚焦图像相邻图像清晰值的大幅改变,灵敏度因子和陡峭度也随之提升。本文基于灰度分布的改进梯度加权算法有效提高了聚焦评价函数的灵敏度和陡峭度。

由表 4 可知,加入椒盐和高斯噪声后,对比评价函数随着噪声能量的加入,评价函数性能指标呈下降趋势。本文聚焦评价函数用于不同能量噪声时,清晰度比率有所下降,在椒盐噪声下依旧保持较好的评价性能;在高斯噪声下远高于对比评价函数。同样,本文聚焦评价函数灵敏度因子和陡峭度也高于对比评价函数。本文聚焦评价函数具有更强的抗噪性。

在工业零件尺寸视觉测量中,改变相机到零件表面的工作距离,采集序列零件图像并记录相应拍照位置。通过本文提出的聚焦评价方法,对序列零件图像进行清晰度评价,获取最清晰图像,将相机移动到相应拍摄位置,实现图像的聚焦。精确聚焦的零件图像特征边缘更

锐利,提取边缘时更精确,从而实现零件尺寸的高精度测量。

3 结 论

本文针对环形光源照射下零件倒角特征成像存在宽边缘、零件图像聚焦不精确无法满足高精度零件尺寸测量等问题,提出一种基于改进梯度加权的零件图像高精度聚焦方法。在光源优化阶段,为消除倒角特征在成像中的宽边缘,采用条光 45°布置的照射方式。在图像聚焦阶段,首先,为高精度提取图像有效边缘像素点,改进 Otsu 自适应分割阈值;接着,为提高有效边缘像素点梯度获取的准确度,基于 4 方向 Sobel 算子改进灰度梯度算法;然后,为增强梯度加权算法的灵敏性和抗噪性,基于 8 邻域灰度分布差异值大小获取梯度加权系数;最后,为实现高精度尺寸测量,通过改进梯度加权的聚焦评价函数获取聚焦图像。实验结果表明,本文方法测量值与人工测量值相对误差在 0. 002 4% 以内,精度高于传统高精度测量方法。本文聚焦评价函数相比传统评价函数清晰度比率平均提升 75 倍,灵敏度因子平均提升 5 倍,陡峭度平均提升 1 倍。在工业零件尺寸视觉测量中,通过本文提出的零件图像高精度聚焦方法,能够精确获取最清晰零件图像,实现零件尺寸的高精度测量。

参考文献

- [1] LI B. Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision [J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018, 2018: 1-9.
- [2] 毛向向, 王红军. 薄壁零件复杂光照情况下的轮廓特征识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3): 137-143.
MAO X X, WANG H J. Improved retinex and edge detection fusion of thin-walled complex part contour recognition algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 137-143.
- [3] 殷宗琨, 江明, 柏受军, 等. 基于 2D 预处理的点云分割和测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 53-63.
YIN Z K, JIANG M, BAI S H J, et al. Research on point cloud segmentation and measurement based on 2D preprocessing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 53-63.
- [4] SONG C, JIAO L, WANG X, et al. Development and testing of a multi-sensor measurement system for roundness and axis straightness errors of deep-hole parts [J]. Measurement, 2022, 198: 111069.
- [5] XIAO G, LI Y, XIA Q, et al. Research on the on-line dimensional accuracy measurement method of conical spun workpieces based on machine vision technology[J]. Measurement, 2019, 148: 106881.
- [6] 石照耀, 孙衍强. 齿轮三维测量中线激光传感器位姿标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 39-46.
SHI ZH Y, SUN Y Q. A position and attitude calibration method for the linear laser sensor in gear 3D measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 39-46.
- [7] 陈芳. 大尺寸零件在线视觉测量关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
CHEN F. Study on key technologies of online vision measurement for large scale parts [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [8] WU X, GAO G. LED light design method for high contrast and uniform illumination imaging in machine vision[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): 1694-1704.
- [9] 刘剑, 马骏驰, 于鹏, 等. 基于图像聚焦定位的 AFM 自动逼近方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 58-67.
LIU J, MA J CH, YU P, et al. Research on auto-feeding approach of AFM based on image autofocus [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 58-67.
- [10] 刘红涛, 陆安江, 彭熙舜, 等. 光照不均匀下的工件图像亚像素边缘检测[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(10): 1-7.
LIU H T, LU AN J, PENG X SH, et al. Subpixel edge detection of workpiece images under uneven illumination [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(10): 1-7.
- [11] 谢俊, 李玉萍, 左飞飞, 等. 基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(2): 93-98.
XIE J, LI Y P, ZUO F F, et al. On-line dimension detection of hole parts based on machine vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(2): 93-98.
- [12] 明振兴, 吕清花, 明月, 等. 基于改进粒子群算法的 LED 光源阵列优化[J]. 应用光学, 2022, 43(3): 524-531, 543.
MING ZH X, LYU Q H, MING Y, et al. Optimization of LED light source array based on improved particle swarm algorithm [J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(3): 524-531, 543.
- [13] ZHAN Y B, ZHANG R. No-reference image sharpness assessment based on maximum gradient and variability of gradients[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(7): 1796-1808.
- [14] LIANG J B, CAI J F, XIE J P, et al. Depth-resolved and auto-focus imaging through scattering layer with wavelength compensation [J]. Journal of the Optical Society of America, 2019, 36(6): 944-949.
- [15] WASSON V, KAUR B. Image quality assessment: Edge based entropy features estimation using soft computing techniques[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 3261-3271.
- [16] 吕美妮, 玉振明. 光学显微镜自动聚焦算法研究[J]. 中国测试, 2018, 44(6): 11-16.
LYU M N, YU ZH M. Study on automatic focusing algorithm of optical microscope [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(6): 11-16.
- [17] 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): 285-293.
ZENG H F, HAN CH P, LI K, et al. Improved gradient threshold image sharpness evaluation algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 285-293.
- [18] 潘宏亮, 孙金霞, 韩希珍. 图像清晰度评价与变步长融合调焦方法[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(1): 248-253.
PAN H L, SUN J X, HAN X ZH. Image sharpness

- evaluation and variable-step fusion focusing method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(1): 248-253.
- [19] 瞿瑞德, 李子印, 汪小东, 等. 面向纤维显微成像的图像清晰度评价算法[J]. 毛纺科技, 2022, 50(12): 85-94.
- QU R D, LI Z Y, WANG X D, et al. Image sharpness evaluation algorithm for fiber microscopic imaging [J]. Wool Textile Journal, 2022, 50(12): 85-94.
- [20] 张丰收, 李斯文, 胡志刚, 等. 一种改进的 Sobel 梯度函数自动对焦评价算法[J]. 光学技术, 2017, 43(3): 234-238.
- ZHANG F SH, LI S W, HU ZH G, et al. An improved auto-focus evaluating algorithm based on Sobel gradient function [J]. Optical Technique, 2017, 43(3): 234-238.
- [21] 郑馨, 艾列富, 刘奎, 等. 结合全局和局部灰度变化的显微图像自动聚焦函数[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 252-259.
- ZHENG X, AI L F, LIU K, et al. Auto-focusing function for microscopic images based on global and local gray-scale variation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 252-259.
- [22] 李璐, 王高, 师钰璋, 等. 基于红外自动聚焦过程的最优函数选取[J]. 红外技术. 2020, 42(11): 1017-1021.
- LI L, WANG G, SHI Y ZH, et al. Optimal function selection based on infrared auto-focusing processes [J]. Infrared Technology, 2020, 42(11): 1017-1021.
- [23] 袁涛, 易定容, 蒋威, 等. 基于双模糊的显微图像聚焦评价方法[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 63-72.
- YUAN T, YI D R, JIANG W, et al. Double blur micro-images focusing evaluation method [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 63-72.
- [24] 包丞啸, 姜威, 王玉潇. 基于大津法分割和局部最大梯度的自动聚焦算法[J]. 光学技术, 2019, 45(6): 756-761.
- BAO CH X, JIANG W, WANG Y X. Automatic focusing algorithm based on Otsu segmentation and local maximum gradient [J]. Optical Technique, 2019, 45(6): 756-761.
- [25] 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): 373-380.
- 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): 373-380.
- [26] HAN Q L, LIU L, ZHAO Y D, et al. A neighborhood median weighted fuzzy c-means method for soil pore identification[J]. Pedosphere, 2021, 31(5): 746-760.
- [27] MA G, YUE X. An improved whale optimization algorithm based on multilevel threshold image segmentation using the Otsu method [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 113: 104960.
- [28] 巢渊, 唐寒冰, 刘文汇, 等. 基于改进 Zernike 矩的轴类零件尺寸测量方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 169-176.
- CHAO Y, TANG H B, LIU W H, et al. Improved Zernike moment-based dimensional measurement method for shaft parts [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(3): 169-176.
- [29] 刘利平, 孙建, 孙文悦. 改进 Zernike 矩的亚像素圆孔类零件测量方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 69-77.
- LIU L P, SUN J, SUN W Y. Measurement method of subpixel circular hole parts based on improved Zernike moment [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 69-77.
- [30] YAN X, LEI J, ZHAO Z. Multidirectional gradient neighborhood-weighted image sharpness evaluation algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-7.

作者简介



曹震, 2018 年于南京信息工程大学滨江学院获得学士学位, 现为江苏理工学院硕士研究生, 主要研究方向为机电产品检测与智能控制。

E-mail: cz_albert@163.com

Cao Zhen received his B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science & Technology Binjiang College in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Jiangsu University of Technology. His main research interest includes mechanical and electrical product detection and intelligent control.



巢渊(通信作者), 2011 年于东南大学获得学士学位, 2017 年于东南大学获得博士学位, 现为江苏理工学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为机器视觉测量与检测、机电一体化装备智能控制技术。

E-mail: chaoyuan@jsut.edu.cn

Chao Yuan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Southeast University in 2011 and Ph. D. degree from Southeast University in 2017. Now he is an associate professor and M. Sc. supervisor at Jiangsu University of Technology. His main research interests include machine vision measurement and inspection, intelligent control technology of mechatronics equipment.