

基于图像处理的光学晶体维氏硬度测量算法

程莹 赵行 张诗婧 丁守军 莫绪涛 黄仙山

Vickers hardness measurement algorithm for optical crystals based on image processing

CHENG Ying, ZHAO Xing, ZHANG Shijing, DING Shoujun, MO Xutao, HUANG Xianshan

引用本文:

程莹, 赵行, 张诗婧, 等. 基于图像处理的光学晶体维氏硬度测量算法[J]. 应用光学, 2024, 45(4): 796–803. DOI: 10.5768/JAO202445.0403005

CHENG Ying, ZHAO Xing, ZHANG Shijing, et al. Vickers hardness measurement algorithm for optical crystals based on image processing[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(4): 796–803. DOI: 10.5768/JAO202445.0403005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0403005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硬度压痕表面积的共聚焦测量方法

Confocal measurement for surface area of hardness indentation

应用光学. 2020, 41(6): 1222–1229 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0603001>

基于改进的概率Hough变换的转鼓装校技术研究

Research on rotary drum assembly and adjustment technology based on improved probabilistic Hough transform

应用光学. 2020, 41(2): 394–399 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205003>

基于矢量光场的TeO₂晶体旋光特性研究

Optical rotation properties of TeO₂ crystal based on vector light field

应用光学. 2021, 42(6): 963–968 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601003>

基于区域霍夫变换的机弹分离初始信息提取研究

Research on initial information extraction of aircraft and missile separation based on regional Hough transformation

应用光学. 2021, 42(1): 65–70 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0102003>

AOTF成像光谱仪声光晶体衍射效率研究

Study on diffraction efficiency of acousto-optical crystal in AOTF imaging spectrometer

应用光学. 2018, 39(3): 359–365 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0302003>

基于小波变换和数学形态学的孔径测量研究

Measurement of aperture based on wavelet transform and mathematical morphology

应用光学. 2017, 38(4): 622–626 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0403004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 04-0796-08

基于图像处理的光学晶体维氏硬度测量算法

程 莹, 赵 行, 张诗婧, 丁守军, 莫绪涛, 黄仙山

(安徽工业大学 微电子与数据科学学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘 要: 硬度是衡量材料软硬程度的一种性能指标。针对镨铝石榴石 (lutetium-aluminum garnet, LuAG) 和镨镓石榴石 (lutetium-gallium garnet, LuGG) 等光学晶体弹性小、受压易破损、压痕边界不清晰的特点, 提出一种基于图像处理的光学晶体维氏硬度测量方法。利用深度学习 YOLOv5s 网络, 从图像中分割出维氏压痕目标位置, 进行自适应二值化, 选取最大连通域、骨架提取, 进一步通过概率霍夫直线检测特定方向线段, 得到压痕 4 个顶点的准确位置。实验结果表明, 平均相对误差可以控制在 1.5% 以内, 有效降低了传统网络算法和传统图像处理算法的计算误差, 适用于对光学晶体维氏硬度的自动化精确测量。

关键词: 光学晶体; 维氏硬度; YOLOv5s; 概率霍夫直线

中图分类号: TN911.73; TP391.4

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0403005

Vickers hardness measurement algorithm for optical crystals based on image processing

CHENG Ying, ZHAO Xing, ZHANG Shijing, DING Shoujun, MO Xutao, HUANG Xianshan

(School of Microelectronics and Data Science, Anhui University of Technology, Ma Anshan 243000, China)

Abstract: Hardness is a performance index to measure the degree of softness and hardness of materials. In view of the characteristics of lutetium-aluminum garnet (LuAG), lutetium-gallium garnet (LuGG) and other optical crystals with small elastic compression, easy to break and unclear indentation boundary. An optical crystal Vickers hardness measurement method based on image processing was proposed. A deep learning YOLOv5s network was used to segment the image. The exact positions of the four vertices were obtained by adaptive binarization, maximum connected domain selection, skeleton extraction and then specific directional line segments detected by probabilistic Hough line treatment. The experimental results show that the average relative error can be controlled within 1.5%, which effectively reduces the calculation error of traditional network algorithm and traditional image processing algorithm, and is suitable for automatic and accurate measurement of optical crystal Vickers hardness.

Key words: optical crystals; Vickers hardness; YOLOv5s; probabilistic Hough line

引言

材料软硬程度测量的常用方法有维氏硬度、布氏硬度和努氏硬度测量等。其中, 维氏硬度具有计算简单、精确度高的特点, 因此常用维氏硬度测量材料硬度值^[1]。

随着图像处理技术的发展, 维氏硬度图像测量

已有半自动和全自动两类测量系统。半自动测量系统是将相机拍摄的压痕图像传送到计算机, 测量人员手动在图像上选取压痕 4 个顶点位置, 从而计算硬度值。全自动测量系统是将相机拍摄的图像传输到计算机检测网络中, 通过测量算法可直接获得材料的维氏硬度值, 测量过程无需人员参

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2024-01-26

基金项目: 国家自然科学基金 (52202001); 安徽省高校优秀青年人才支持计划项目 (gxyq2022014)

作者简介: 程莹 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事图像检测与处理研究。E-mail: yingcheng1216@163.com

通信作者: 黄仙山 (1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事图像识别与检测研究。E-mail: Huangxs@ahut.edu.cn

与。全自动测量方法有: SUGIMOTO T 等人^[2]用压痕图像灰度直方图确定图像阈值, 通过比较二次顶点坐标决定顶点的确切位置。YAO L 等人^[3-4]将压痕边缘像素转换到霍夫空间中, 并理论加权模糊 C-means 聚类技术得到压痕顶点, 利用最小二乘法计算压痕对角线的长度得到维氏硬度值。吴黎明等人^[5]运用小波分析技术和最小二乘法自动计算维氏硬度。杨波等人^[6]采用改进的动态轮廓模型对处理后的压痕图像进行轮廓提取, 实现维氏硬度自动测量。李尤丰^[7]根据基于顶点附近的压痕边缘趋于直线这一思想, 采用最小二乘法拟合顶点附近直线, 从而计算维氏压痕硬度值。刘文娟^[8]提出用冗余离散小波变换提取压痕纹理特征, 再用改进的 k-means 聚类算法用于压痕纹理图像分割。LIMA MOREIRA F D 等人^[9]通过自适应球囊吸引或排斥曲线来得到准确的压痕边缘。这些方法应用于自动测量金属材料维氏硬度, 但对易开裂的光学晶体压痕仍需进一步研究。

通常使用维氏硬度对晶体的压痕尺寸效应进行研究^[10-12]。光学晶体材料具有弹性小、透光的特征, 光学晶体压痕不同于金属压痕, 其压痕四周会产生裂纹^[13], 易受反射光线的影响。TANAKA Y 等人^[14]采用 2 个卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)对不同的压痕数据集进行训练, 第 1 个 CNN 网络从获得的低分辨率图像中检测并剪裁压痕基本边界, 第 2 个 CNN 网络从裁剪后的高分辨率图像中检测精确的角位置, 通过返回的原始图像对应边界框计算维氏硬度值。LI Z X 等人^[15]采用基于形态学处理的粗略定位方法提取压痕近似范围, 利用卷积神经网络从图像背景中分割出

维氏压痕, 进一步提出一种对提取后压痕边缘进行直线拟合的维氏硬度自动测量方法^[16]。但全连接神经网络输入图像尺寸有限, 传统图像处理算法易受表面杂质及裂纹影响。

本文对光学晶体维氏硬度测量方法进行研究, 提出一种基于图像处理的光学晶体维氏硬度自动测量方法。实验中采用 LuAG 等材料验证了该方法的准确性, 避免杂质和裂纹对目标选取的影响, 先使用深度学习 YOLOv5s 网络确定并提取压痕区域, 为解决提取后压痕图片尺寸多变这一问题, 采用传统图像处理算法对压痕进行精确定位。

1 方法

维氏硬度压头呈 136°正菱形, 所压压痕表面为正方的正四棱锥侧面积, 通过得到压痕对角线长度, 可以计算出维氏硬度 H_V :

$$H_V = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2)$$

式中: F 为试验力, 单位为 kgf; d 为压痕 2 条对角线长度 d_1 、 d_2 的平均值, 单位为 mm。

硬度计通过工业相机拍摄, 正菱形压痕其中 1 个角朝正上方方向呈现在计算机图片采集区域。测量过程中, 晶体表面杂质、裂纹、光照等因素会影响压痕值的准确性。为了解决这一问题, 采用 YOLOv5s 网络对目标进行粗略定位, 得到压痕大致范围, 并提取出压痕区域。进一步采用传统的图像处理算法得到 4 个顶点的精确位置, 并通过计算得到光学晶体的维氏硬度值, 所用方法如图 1 所示。

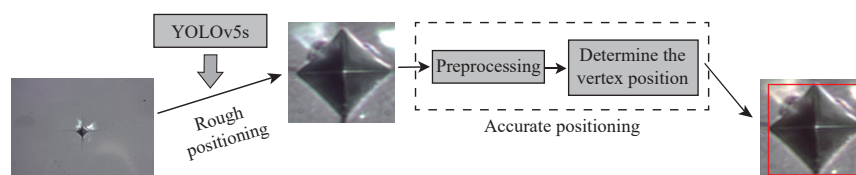


图 1 方法概述图

Fig. 1 Overview of proposed method

1.1 粗略定位

晶体材料压痕面积小, 采用传统图像处理算法选取目标区域, 压痕周围的裂纹以及背景中较大的杂质都会对其产生影响。而卷积神经网络可以通过学习图像中特征完成对目标的准确识别, 其

在目标检测、目标分类^[17-18]等领域有广泛应用。YOLOv5s 在 YOLOv5 系列中参数量最小, 具有硬件要求低, 运算速度快的特点。采用 YOLOv5s 网络识别目标区域, 根据预测框位置, 对压痕区域进行扩大剪裁。YOLOv5s 网络结构如图 2 所示。

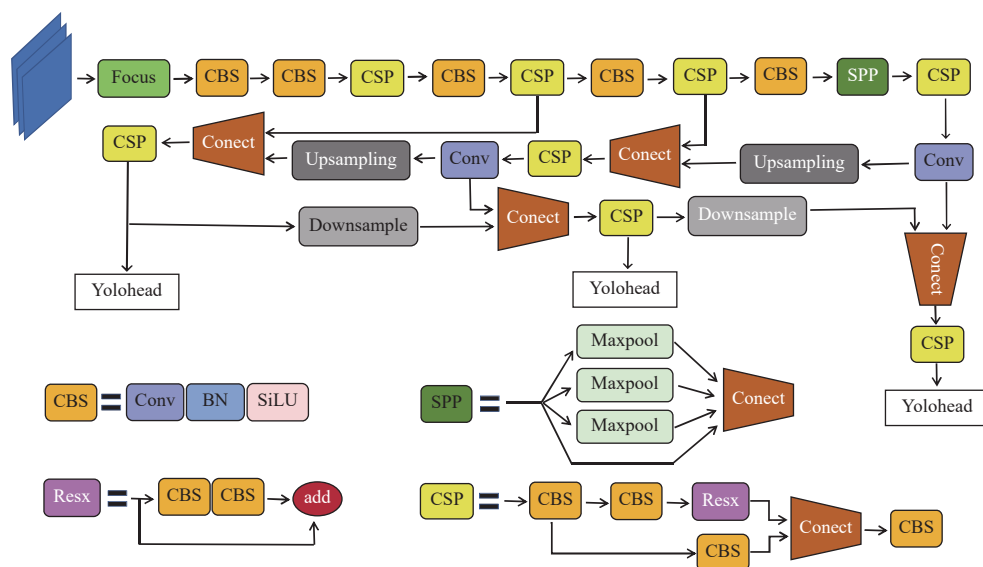


图2 YOLOv5s 网络结构图

Fig. 2 Structure diagram of YOLOv5s network

1.1.1 网络训练的数据集

如图3所示,维氏硬度计的顶部配备了1个工业摄像机,前部配有1个测微目镜,用于人工测量,以观察和测量材料的压痕。工业摄像机连接计算机,通过计算机对压痕图像进行采集。

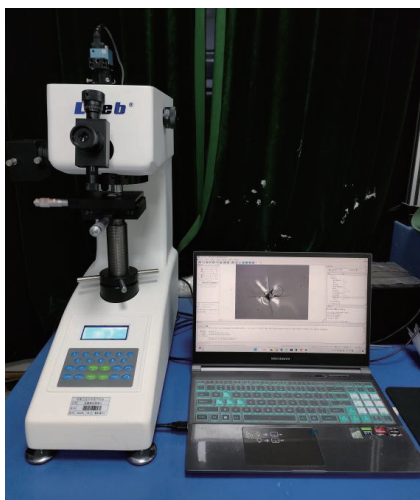


图3 数据采集实验平台

Fig. 3 Experimental platform for data collection

为了使训练后网络能正确识别各种材料,提高网络鲁棒性,选择施加不同载荷后的标准硬度块和光学晶体材料的压痕图像构建数据集。标准硬度块包括HV0.2和1这2个型号,光学晶体材料包括LuAG、LuGG等。使用载荷分别为1 kgf, 0.5 kgf, 0.3 kgf, 0.2 kgf, 0.1 kgf和0.05 kgf。采集各种压痕图片,用多点图像标记法手工标记所采集图像中

的压痕边缘。在手动标记压痕区域后,获得了1个压痕外接矩形边界框。

数据增强可以帮助图像较少的数据集获得更多样本,并通过添加人工干扰来提高训练的鲁棒性。本文通过明暗变化、调整对比度和灰度变换来增加数据,共获得了4 524个图像样本。

1.1.2 网络训练

深度学习框架是基于Tensorflow建立的。数据集被随机分为训练集、验证集和测试集,比例为8:1:1。实验训练迭代300次,迭代批次大小设置为8,选择SGD作为优化器。初始学习率为0.01,随着迭代次数的增加,通过余弦退火进行学习率衰减,设置最小学习率为0.000 1。如图4所示,随着网络训练迭代次数的增加,损失值不断减小。

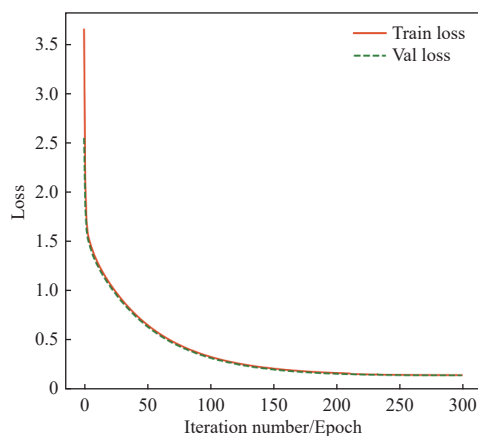


图4 模型训练损失图

Fig. 4 Diagram of model training loss

在迭代 200 次后开始拟合, 拟合效果好。达到 300 次时, 损失几乎不下降, 说明网络已经收敛, 训练完成。训练后的网络能准确识别到压痕大致区域, 得到预测框左上(left, top)和右下(right, bottom)这 2 个顶点位置。因 YOLOv5s 网络识别出的压痕位置并不精确, 预测框可能不能完整包含压痕顶点, 所以扩大预测框的范围对图像进行剪裁。剪裁后提取出的区域左上顶角和右下顶角坐标分别为(left-10, top-10), (right+10, bottom+10)。

1.1.3 评价指标与结果分析

平均精度 (Average precision, P_{AP})、召回率 (Recall, R)、精确率 (Precision, P) 是常见的评价指标。平均精度与召回率和精确率有关, 网络对某一类别目标的检测性能可以由平均精度表示, 平均精度值越大, 检测性能越好。召回率指识别出的正样本占有所有正样本的比例, 精确度指被识别为正样本的样本数中正确正样本所占比例, 计算公式为

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_N} \quad (3)$$

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p} \quad (4)$$

式中: T_p 表示预测为正样本, 实际为正样本; F_N 表示预测为负样本, 实际为正样本; F_p 表示预测为正样本, 实际为负样本; T_N 表示预测为负样本, 实际为负样本。

平均精度是指 Precision-Recall 曲线下的面积, 是网络对某一类目标检测性能的综合评定。实验中检测类别数为 1, 平均精度越高, 网络检测性能越好。计算公式为

$$P_{AP} = \int_0^1 P dR \quad (5)$$

将 YOLOv5s 与 YOLOv3、Faster-RCNN 进行对比, 如表 1 所示, YOLOv5s 网络召回率达到 100%; 精确率较 YOLOv3 下降 0.38%; 平均精度分别提升 1.62%、0.54%, 达到 99.91%; 参数量为 27.83 Mb。综合比较, YOLOv5s 算法能够在压痕检测上取得优秀的检测效果。

表 1 不同网络检测结果

Table 1 Test results of different networks

Force/kgf	Recall/%	Precision/%	AP/%	Parameters/Mb
YOLOv3	98.36	98.77	98.29	236.51
Faster-RCNN	99.80	97.01	99.37	522.83
YOLOv5s	100.00	98.39	99.91	27.83

1.2 精确定位

根据所压压痕表面为正方形的正四棱锥侧面这一特点, 本文通过图像处理算法对压痕顶点进行精确定位。光学晶体弹性小, 压痕周围易产生开裂, 根据顶角为直角和顶角周围轮廓趋于直线这一思想找到顶角两条边, 通过求这两条边的交点确定顶点位置。

1.2.1 图像预处理算法

通过 YOLOv5s 网络扩大剪裁得到的图像, 压痕区域和背景部分有明显的灰度变化。先采用边缘检测得到压痕轮廓, 常用的边缘检测方法有 Laplacian, Sobel 和 Canny 算法, 检测结果如图 5 所示。

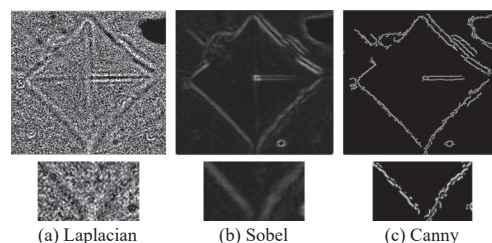


图 5 压痕区域边缘检测结果

Fig. 5 Results of indentation area edge detection

由图 5 可知, Laplacian 算法易受噪声影响, Canny 算法检测边缘不连续, Sobel 算法不易受噪声影响且边缘轮廓平滑。与 Canny 算法相比, Sobel 算法简单、检测效率高。综上所述, 选择 Sobel 算子和腐蚀操作对剪裁后图像进行预处理, 预处理步骤如图 6 所示。

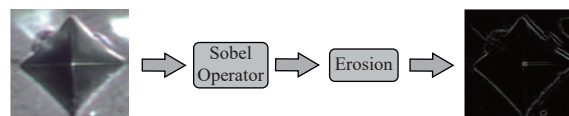


图 6 图像预处理步骤

Fig. 6 Image preprocessing

1.2.2 确定顶点位置

压痕 4 条边缘中部凹陷且会产生裂纹, 为避免这一部分对边缘检测的影响, 从预处理图片选取上下左右 4 个部分, 然后分别对这 4 个部分进行处理。4 个 ROI 区域选取方法如式(6)所示:

$$\begin{cases} R_{O11}: (\alpha w, 0), ((1-\alpha)w, \beta h) \\ R_{O12}: (\alpha w, (1-\beta)h), ((1-\alpha)w, h) \\ R_{O13}: (0, \beta h), (\alpha w, (1-\beta)h) \\ R_{O14}: ((1-\alpha)w, \beta h), (w, (1-\beta)h) \end{cases} \quad (6)$$

式中: α 和 β 为 $[\frac{1}{5}, \frac{1}{3}]$ 范围内的系数; w 、 h 分别为

剪裁后压痕图像的宽、高,单位为像素。

式(6)选取4个ROI区域如图7所示。当 α 、 β 等于 $\frac{1}{3}$ 时,为红色和绿色虚线所选区域,即图7(b)所示区域;当 α 、 β 等于 $\frac{1}{5}$ 时,为红色和绿色实线所选区域,即图7(c)所示区域。

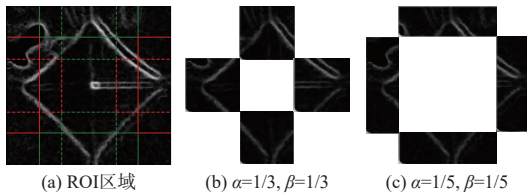
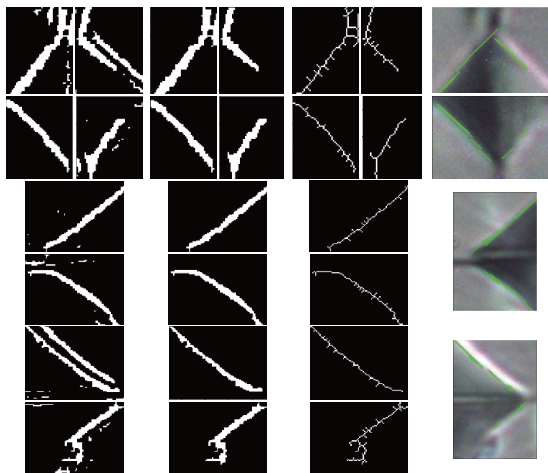


图7 4个ROI所选区域

Fig. 7 Four selected regions of ROI

对每个ROI区域进行检测。根据顶角两条边位置将每个区域分成两部分分别处理,通过自适应二值化、选取最大连通域获得准确压痕边缘,提取骨架方法得到边缘中心线,对边缘进行直线检测。

直线检测方法有霍夫直线检测和概率霍夫直线检测。霍夫变换本质上是把图像映射到霍夫空间中,霍夫空间中的点代表图像上的一条线。霍夫直线需要计算所有的 N 个边缘点,所需内存和运算量大。概率霍夫直线通过设定阈值只需选取 $n(n < N)$ 个边缘点,且能够检测出图像中直线端点。选择概率霍夫对直线进行检测,选取斜率为1或-1的直线,根据线段端点坐标从2个斜率的直线中分别选取最靠近顶点的直线,通过直线求得交点。图8为压痕上下左右4个顶角对应8条边缘的部分操作。



(a) 自适应二值化 (b) 选取最大连通域 (c) 骨架提取 (d) 概率霍夫直线检测

图8 边缘处理

Fig. 8 Edge processing

通过上述方法,得到4个顶点在其ROI区域内的位置 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) ,通过式(7)将各顶点位置换算为完整压痕图上的位置 (x_1', y_1') , (x_2', y_2') , (x_3', y_3') , (x_4', y_4') 。根据4个顶点位置,即可求得压痕的2条对角线长度 d_{p1} , d_{p2} ,如式(8)所示。再由式(1)即可得出维氏硬度值。

$$\begin{cases} (x_1', y_1') = (x_1 + \alpha w, y_1) \\ (x_2', y_2') = (x_2 + \alpha w, y_2 + (1 - \beta)h) \\ (x_3', y_3') = (x_3, y_3 + \beta h) \\ (x_4', y_4') = (x_4 + (1 - \alpha)w, y_4 + \beta h) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} d_{p1} = \sqrt{(x_1' - x_2')^2 + (y_1' - y_2')^2} \\ d_{p2} = \sqrt{(x_3' - x_4')^2 + (y_3' - y_4')^2} \end{cases} \quad (8)$$

1.3 结果判断

压痕对角线两长度之差不超过对角线平均值的5%,且光学晶体压痕图像中间位置会出现1个光亮的圆形区域。通过判断两对角线长度之差占对角线平均值的比例和对角线交点位置是否在圆内,来确定计算得到的维氏硬度值是否正确。若比例不超过5%且对角线交点在圆内,则认为得到的硬度值正确,进行保存;反之,则认为压痕破损严重导致测量不准确,不保存该测量数据。

从剪裁后的压痕图像中选取中间位置的ROI区域,ROI区域左上和右下顶点位置分别为 $((2/5)w, (2/5)h)$ 和 $((3/5)w, (3/5)h)$ 。通过霍夫圆检测得到亮斑位置。比较交点到圆心的距离,即可判断其是否在圆内。剪裁后压痕图像的霍夫圆检测结果如图9所示。

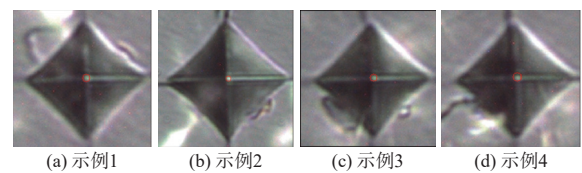


图9 霍夫圆检测结果

Fig. 9 Detection results of Hough circles

2 实验与讨论

本组实验所选择的光学晶体试验材料为LuAG和LuGG,实验中使用了几种合适的试验力,并将本文方法提取的结果与YOLOv5s网络预测的结果进行了比较。图10分别显示了LuAG和LuGG的预测结果,图11为不同光照条件下压痕预测结果。

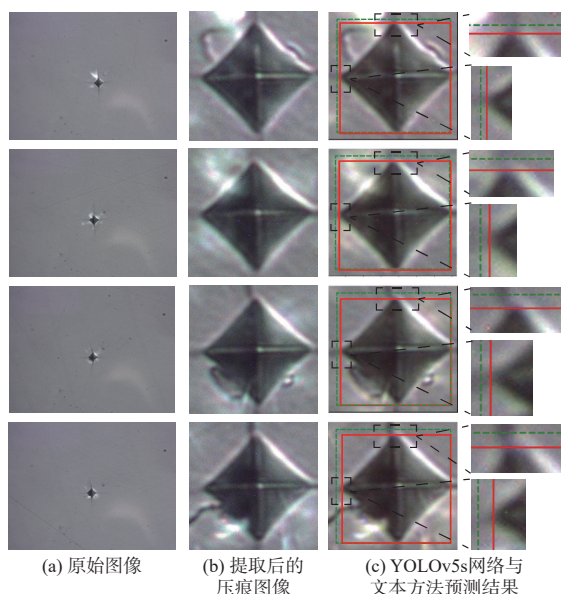


图 10 测试集实验结果

Fig. 10 Experimental results of test set

图 10 和图 11 中每行从上到下的图像显示了原始压痕图, YOLOv5s 提取后压痕图像, 以及压痕预测框, 其中 YOLOv5s 预测的边界框和本文方法预测结果分别用虚线框和实线框标记。从图 10(c) 和图 11(c) 中可以看出, 本文方法较 YOLOv5s 网络可以更准确地得到压痕区域。

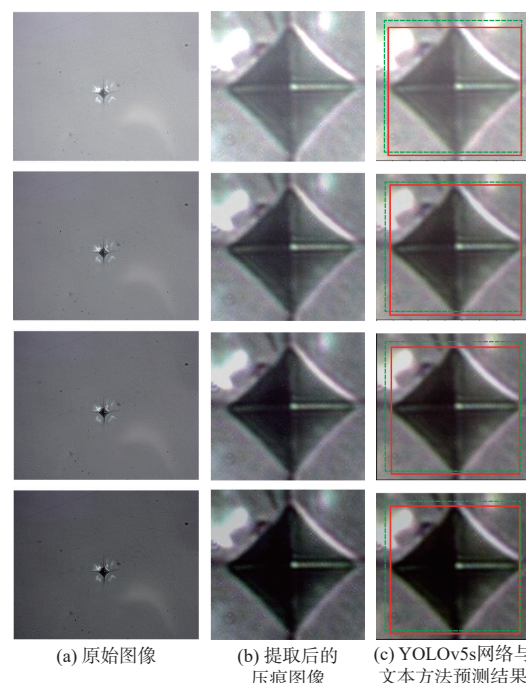


图 11 不同光照下的实验结果

Fig. 11 Experimental results under different illumination treatments

此外, 表 2 和表 3 显示了 LuAG、LuGG 这 2 种晶体采用人工标记、YOLOv5s 和本文方法测量结果之间的详细比较。

表 2 LuAG 维氏硬度试验结果

Table 2 Test results of LuAG Vickers hardness

Force/kgf	Manual/HV	YOLOv5s/HV	Average relative error/%	Ours/HV	Average relative error/%
0.1	1 628.28±13.19	1 510.38±26.39	7.24	1 622.01±19.69	0.82
0.2	1 545.72±26.34	1 431.19±25.94	7.40	1 536.48±22.95	0.81
0.3	1 521.05±34.28	1 397.21±53.46	8.15	1 510.81±40.21	0.89

表 3 LuGG 维氏硬度试验结果

Table 3 Test results of LuGG Vickers hardness

Force/kgf	Manual/HV	YOLOv5s/HV	Average relative error/%	Ours/HV	Average relative error/%
0.1	1 647.54±15.38	1 478.31±48.11	10.28	1 634.35±26.24	1.25
0.2	1 542.93±16.32	1 436.21±27.21	6.93	1 543.67±22.94	0.63
0.3	1 536.29±15.43	1 445.87±62.81	6.58	1 523.30±26.62	1.05

在 0.1 kgf, 0.2 kgf, 0.3 kgf 这 3 种载荷下, 将 YOLOv5s 预测的压痕值、本文方法得到的压痕值与人工测量结果进行比较。为了客观性, 人工读数的每个压痕由测量人员读 3 次取平均值, 同一载荷下, 取 10 个不同压痕的测量结果计算得到平均压痕值及其标准偏差。

如表 2 和表 3 所示, 对于同一种光学晶体, 不

同载荷下测量得到的维氏硬度值符合压痕尺寸效应: 随着试验载荷的增加而硬度值降低。本文方法对 LuAG 的最大平均相对误差为 0.89%, YOLOv5s 对 LuAG 的最大平均相对误差为 8.15%; 本文方法对 LuGG 的最大平均相对误差为 1.25%, YOLOv5s 对 LuGG 的最大平均相对误差为 10.28%, 且本文方法得到的压痕值在人工测量值的标准偏差

内。综上所述,与YOLOv5s方法相比,本文方法计算出的维氏硬度值更接近于人工测量的结果。

3 结论

光学晶体材料弹性小受压易破损,采集图像中压痕面积小。传统图像处理算法无法准确提取出较小的压痕区域,传统神经网络对压痕目标检测精度不够。本文结合卷积神经网络和传统图像处理算法提出了1种基于图像处理的光学晶体维氏硬度测量算法。该方法先通过YOLOv5s网络识别目标区域,对预测框进行扩大剪裁,提取出压痕区域。根据靠近压痕顶点部分边缘近似为直线这一思想,进一步通过概率霍夫直线算法检测顶点边缘,得到压痕4个顶点的精确位置,从而计算出光学晶体的维氏硬度值。实验结果显示,该方法得到的测量结果与人工测量结果之间的差异很小,误差在允许的范围内,压痕图片平均检测时间为2.18 s。这意味着在大多数情况下,本文方法可以代替人工来测量光学晶体材料的维氏硬度值。

参考文献:

- [1] 蔡成林,李泽贤,印峰.维氏硬度试验中的视觉检测算法研究综述[J].材料导报,2023,37(8):119-128.
CAI Chenglin, LI Zexian, YIN Feng. Visual detection algorithms in Vickers hardness test: a review[J]. Materials Reports, 2023, 37(8): 119-128.
- [2] SUGIMOTO T, KAWAGUCHI T. Development of an automatic Vickers hardness testing system using image processing technology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(5): 696-702.
- [3] YAO L, FANG C H. An automatic hardness measuring method using transform and fuzzy c-means algorithm[J]. IEEE International Fuzzy Systems Conference, 2001: 842-847.
- [4] YAO L, FANG C H. A hardness measuring method based on Hough fuzzy vertex detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(3): 950-962.
- [5] 吴黎明,周曲,邓耀华,等.维氏硬度试验压痕图的小波分析与自动计算硬度[J].中国机械工程,2004,15(6):498-500.
WU Liming, ZHOU Qu, DENG Yaohua, et al. Automatically analyzing the impress image of Vickers hardness test using wavelet[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(6): 498-500.
- [6] 杨波,赵秀阳,尹衍升,等.基于动态轮廓模型的维氏显微硬度自动测量[J].计算机工程与应用,2006,42(12):16-18.
YANG Bo, ZHAO Xiuyang, YIN Yansheng, et al. Active contour model based automatically measurement of the Vickers microhardness[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(12): 16-18.
- [7] 李尤丰.图像处理技术在硬度测量系统中的应用研究[D].南京:南京理工大学,2009.
LI Youfeng. Research on the application of image processing technology in hardness measurement system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [8] 刘文娟.小波纹理分析及维氏硬度压痕分割应用[D].广州:广东工业大学,2011.
LIU Wenjuan. Vickers hardness indentation segmentation based on wavelet texture analysis[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.
- [9] LIMA MOREIRA F D, KLEINBERG M N, ARRUDA H F, et al. A novel Vickers hardness measurement technique based on adaptive balloon active contour method[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 45: 294-306.
- [10] LI H, BRADT R C. The microhardness indentation load/size effect in rutile and cassiterite single crystals[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(4): 917-926.
- [11] IURCHENKO A, BORC J, SANGWAL K, et al. Microindentation deformation of lithium dihydrogen phosphate single crystals: microhardness measurement and indentation size effect[J]. Materials Chemistry and Physics, 2016, 170: 276-284.
- [12] BADREDDINE K, SROUR A, AWAD R, et al. The investigation of mechanical and dielectric properties of Samarium doped ZnO nanoparticles[J]. Materials Research Express, 2020, 7(2): 16-25.
- [13] 孙云,王圣来,顾庆天,等.快速生长KDP晶体的显微硬度测试研究[J].功能材料,2011,42(10):1829-1832.
SUN Yun, WANG Shenglai, GU Qingtian, et al. Microhardness measurement of KDP crystal grown by point-seed technique[J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(10): 1829-1832.
- [14] TANAKA Y, SEINO Y, HATTORI K. Vickers hardness measurement by using convolutional neural net-

- work[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1065: 062001.
- [15] LI Z X, YIN F. Automated measurement of Vickers hardness using image segmentation with neural networks[J]. *Measurement*, 2021, 186: 110-200.
- [16] LI Z X, YIN F. A novel coarse-to-fine localization algorithm for automated Vickers hardness measurement[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2021, 1996(1): 012001.
- [17] 李轩, 杨舟, 陶新宇, 等. 基于Mask R-CNN结合边缘分割的颗粒物图像检测[J]. *应用光学*, 2023, 44(1): 93-103.
- LI Xuan, YANG Zhou, TAO Xinyu, et al. Particles image detection based on Mask R-CNN combined with edge segmentation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1): 93-103.
- [18] 杨舟, 程莹, 张诗婧, 等. 基于改进YOLOv5算法的直拉法单晶硅位错检测模型研究[J]. *应用光学*, 2023, 44(5): 1022-1029.
- YANG Zhou, CHENG Ying, ZHANG Shijing, et al. Czochralski monocrystalline-silicon dislocation detection method based on improved YOLOv5 algorithm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(5): 1022-1029.