

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201901028



钎焊磨粒测量系统中的 显微图像快速融合

陈俊英^{1,2}, 崔长彩¹

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;

2. 集美大学 机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了直观地表征钎焊砂轮表面磨粒的形貌, 针对钎焊磨粒测量系统中显微镜头景深小, 难于一次性清晰成像的问题, 提出基于聚焦评价函数的磨粒显微图像快速融合方法, 以聚焦评价函数的最大值为依据判别聚焦像素点, 提取聚焦像素点颜色信息进行图像融合. 针对特殊照明条件造成的融合误差进行误差补偿, 对融合结果呈现的雾化现象, 采用暗通道先验法进行去雾处理. 实验结果表明: 单颗磨粒 137 幅 $1\ 600\ \text{px} \times 1\ 200\ \text{px}$ 显微图像融合过程用时 5.10 s; 文中方法可快速、直观地表征钎焊砂轮表面磨粒形貌.

关键词: 钎焊磨粒; 聚焦评价函数; 图像融合; 暗通道先验

中图分类号: TH 742; TG 74.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)05-0561-06

Microscope Image Quick Fusion in Brazed Grains Measurement System

CHEN Junying^{1,2}, CUI Changcai¹

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to intuitively characterize the grain topography of brazed grinding wheel, aiming at the problem of difficultly capturing clear image due to the small depth of field of microscope lens adopted in the grain measurement system, a quick image fusion method based on focusing evaluation function was proposed. Focused pixels were determined based on the maximum of focusing evaluation function and the color information of focused pixels was extracted for image fusion. The errors caused by lighting situation were compensated and the dark channel prior algorithm was used to remove the foggy phenomenon of fused image. The experiment results show that a total of 137 images of a single grain with $1\ 600\ \text{px} \times 1\ 200\ \text{px}$ were fused in 5.10 s. The proposed method can quickly and intuitively characterize the grain topography on brazed grinding wheel surface.

Keywords: brazed grains; focusing measure function; image fusion; dark channel prior

磨削是最常用的材料去除工艺, 几乎占整个加工过程生产总成本的 20%~25%^[1]. 磨削加工是砂轮表面磨粒与工件相互作用的过程^[2-3]. 其中, 钎焊砂轮是磨削加工中应用较为广泛的磨具. 研究人员需要观测并直观表征钎焊磨粒形貌, 以进一步指导钎焊砂轮加工工艺或辅助磨削机理研究, 最终达到提高磨削加工质量的目的^[4]. 钎焊砂轮磨粒和基体之间通过金属结合剂高温钎焊实现化学冶金结合, 其磨粒

收稿日期: 2019-01-07

通信作者: 崔长彩(1972-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事表面形貌评定技术、表面形貌测量技术及自动测量仪器的研究. E-mail: cuicbc@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1805251); 福建省厦门市科学技术局资助项目(3502Z20183019)

粒度和出露高度一般较大,采用普通机器视觉方法难以观测到磨粒的形貌细节^[5].采用垂直层析扫描获取显微图像序列,并从中提取视场中各点的高度值以实现三维重构是聚焦合成法的基本原理.该方法可根据磨粒的尺度选择合适的放大倍数和层析间距,是钎焊磨粒较为适用的光学测量方法.基于聚焦合成原理搭建测量平台,采集显微层析图像序列,由于显微镜头景深小,每幅显微图像仅能获得少量清晰成像点,因此,需对层析显微图像进行快速融合,从而获得超景深的磨粒形貌.常见的图像融合算法有基于空间域和基于变换域两类.像素级的灰度方差算子法、Sobel 梯度算子法、Laplace 算子法等^[6]空间域融合方法直观且效率高,但融合图像对比度较低^[7].而空间域方法中基于区域分割的相关改进算法^[8]对图像进行区域分解,提取出聚焦区域后再进行重构,其算法复杂度高.基于变换域的多尺度变换法^[9-12]的算法同样复杂.然而,钎焊磨粒出露于结合剂表面几十微米到几百微米,层析扫描的显微图像数量一般多达几十至上百幅,如果采用复杂的融合算法,则计算量大、速度慢.本文采用像素级空域方法进行融合,并通过暗通道先验技术进行去雾处理^[13],最终快速获得超景深融合图像.

1 显微层析图像融合原理

聚焦合成法采用的显微镜头物像关系为

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}. \quad (1)$$

式(1)中: u 为物距; v 为像距; f 为焦距.

显微镜物像关系,如图1所示.移动显微镜头与电荷耦合器件(CCD)可使各层上的点依次聚焦成像,镜头移动量就是聚焦成像各点相对于初始位置的相对高度.采用聚焦评价函数评价某个像素点 (x, y) 在镜头移动过程中的聚焦程度,当该点聚焦时,聚焦评价函数值(聚焦测度值)最大.

聚焦点包含高频信号,而离焦点为低频信号,故采用高通滤波算子提取高频聚焦信号.常见的算子有基于梯度算子(GRA)、基于拉普拉斯算子(LAP)、基于小波算子(WAV)、基于统计学算子(STA)、基于离散余弦变换算子(DCT)和 Miscellaneous 杂项算子(MIS).其中,LAP 各方面性能均具有优越性^[14].LAP 是像素点与邻域像素点二阶差分的和,其表达式为

$$F(x, y, n) = |4g'(x, y, n) - g'(x, y + s, n) - g'(x, y - s, n) - g'(x + s, y, n) - g'(x - s, y, n)|. \quad (2)$$

式(2)中: $F(x, y, n)$ 为像素点 (x, y) 灰度值 $g'(x, y, n)$ 的拉普拉斯变换值; s 为步长; n 为图像序列号.

显微图像融合原理,如图2所示.对于像素点 (x, y) ,当其聚焦评价函数取得极大值时,其对应的图像序列号为 k ,则 (x, y) 的相对高度值为 $k \times \Delta h$ (Δh 为扫描层析间隔).此像素点的红、绿、蓝色彩值 r, g, b 存储于融合图像彩色通道数组 R, G, B 中,遍历所有像素点,提取聚焦点高度信息生成三维点云实现重构,提取聚焦点颜色信息生成融合图像 $I(x, y)$,则在三维形貌测量的同时,完成图像融合.

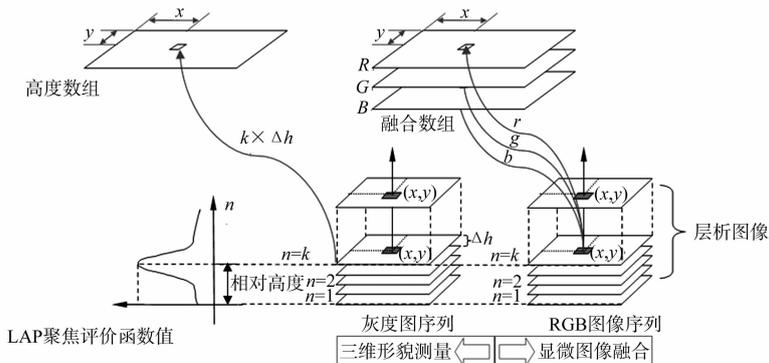


图2 显微图像融合原理

Fig. 2 Principle of microscopic image fusion

2 钎焊砂轮表面磨粒形貌测量与图像融合系统

磨粒形貌测量与图像融合过程需进行垂直扫描,故测量系统需要一个垂直方向(Z 向)的运动控制,为了精确获取镜头与 CCD 移动量,应配置 Z 向位移反馈.此外,系统还应配备轴向方向(Y 向)的运动控制和位移反馈,以及砂轮转动装置与转动反馈.

测量与融合系统的原理,如图 3 所示.砂轮表面全场所有磨粒均可通过运动控制移动到显微镜镜头的视场中,通过系统反馈,可获取磨粒的位置信息,最终实现砂轮表面全场测量.

钎焊磨粒出露于结合剂表面,呈现出复杂的形貌.由于显微测量采用同轴光照明,磨粒多面体形状中的侧面区域使光反射在孔径角外,光学系统接收不到侧面反射光,造成这些点成像失败.因此,需要外加光纤冷光源,使侧面区域反射光进入光学系统.然而,外加光源在改善侧面区域照明的同时,也带来磨粒表面、金属结合剂表面的强反射现象,由于强反射光中多为偏振炫光,故在测量系统中应采用偏振片滤除.

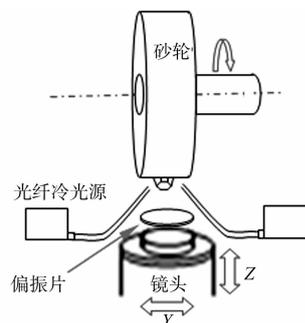


图 3 测量与融合系统的原理
Fig. 3 Principle of grain measurement and fusion system

3 实验结果及分析

3.1 实验平台的搭建

搭建的实验平台,如图 4 所示.图 4 中: Y, Z 轴位移由滚珠丝杆与步进电机驱动,步进分辨率为 $1 \mu\text{m}$,均配备直线光栅进行位置反馈,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$;砂轮转动由步进电机驱动,转动圆光栅反馈分辨率为 0.001° ;显微镜镜头放大倍数为 350 倍,横向分辨率为 $0.67 \mu\text{m}$;镜头景深值小于 $5 \mu\text{m}$; Z 向层析间距应小于 $2.5 \mu\text{m}$,以确保纵向测量精度小于 $5 \mu\text{m}$.图像序列号 n 分别为 10, 50, 90 时的层析图像,如图 5 所示.

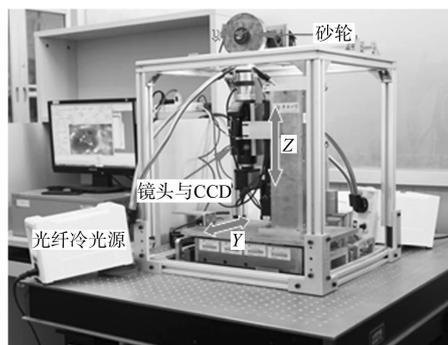


图 4 实验平台
Fig. 4 Experimental platform

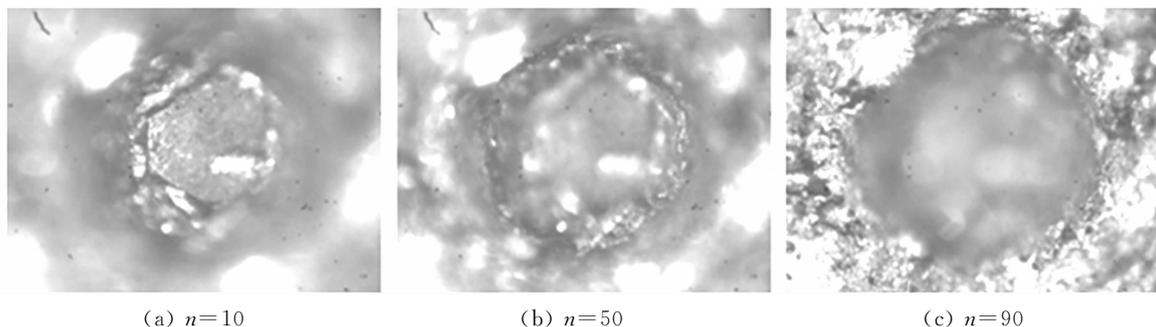


图 5 显微图像系列中的典型图像

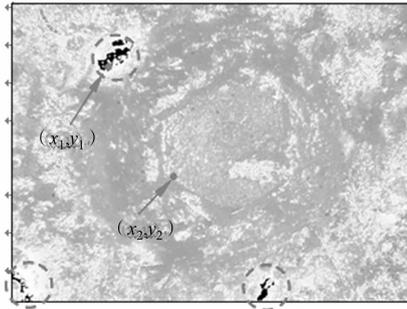
Fig. 5 Typical images in microscopic image sequence

3.2 图像融合及融合误差补偿

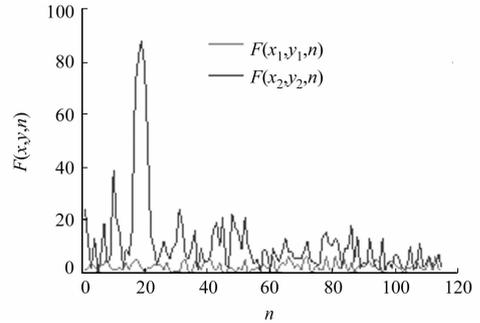
由式(2)可知,拉普拉斯变换为像素点与相邻 s 的像素点进行的差分运算,由于相邻像素点的点扩散函数之间互相干扰,引起多极值现象,不利于极值点的提取^[15].因此,常采用改进的拉普拉斯算子,即步长 $s > 1$.然而,步长 s 太大会造成信号的过度平滑.由于 $s = 3$ 的重构精度评价指标(Q_c)优于其他选值^[14],故选择 $s = 3$ 作为拉普拉斯变换步长.同时, $s = 3$ 也是三维形貌测量与重构所采用的拉普拉斯变换步长.文中图像融合算法与高度测量重构可同时进行,仅需增加聚焦点颜色信息读取的运行时间,无需采用如小波变换等方法在变换域进行融合运算再进行反变换的复杂运算,也无需增加额外的硬件支持.图像融合误差分析与补偿,如图 6 所示.图 6 中: $F(x, y, n)$ 为聚焦测度.

由于钎焊砂轮的结合剂为金属材质,在显微测量条件下,强反射引起少量区域曝光现象难以避免,这些像素点始终不能清晰成像,融合效果图(圆形虚线框)呈现明显的融合误差,如图 6(a)所示.提取误

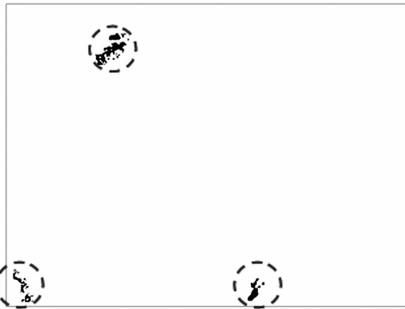
差点与正常像素点的聚焦测度曲线,如图6(b)所示.由图6(a),(b)可知: (x_1, y_1) 为误差点, $F(x_1, y_1, n)$ 聚焦测度值偏小,且无单值尖峰; (x_2, y_2) 为正常点,聚焦测度曲线呈现明显的单值尖峰.根据聚焦测度最大值的特征,采用阈值将正常区域与异常区域进行区分,如图6(c)所示.对于分割出的异常像素点,取该像素点层析序列图像 r, g, b 的均值.误差补偿结果,如图6(d)所示.由图6可知:融合效果满足直观表征磨粒的要求,但有一定的对比度不足和雾化现象.因此,需进一步进行去雾算法处理,以获得更好的图像效果.



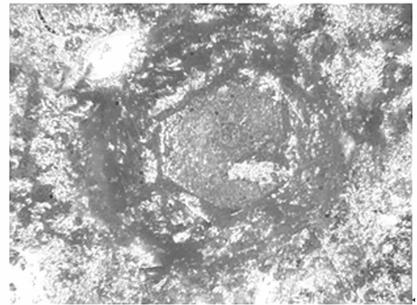
(a) 图像融合结果



(b) 正常与误差点的聚焦测度曲线



(c) 正常点与误差点的区分



(d) 误差补偿后的图像效果

图6 融合误差分析与补偿

Fig. 6 Fusion error analysis and compensation

3.3 暗通道先验去雾处理

由于磨粒突出于结合剂,图像中结合剂过渡到磨粒的区域照明光线弱,形成暗通道区域,故采用一种基于暗通道先验的去雾算法对融合图像进行去雾处理^[13,16].有雾化现象的图像数学模型为

$$I(x, y) = J(x, y)t(x, y) + A(1 - t(x, y)). \quad (3)$$

式(3)中: $I(x, y)$ 为需进行去雾处理的融合磨粒图像; $J(x, y)$ 为生成的无雾图像; A 为光成分; $t(x, y)$ 为透射率.

求得 A 与 $t(x, y)$,即可获得无雾图像 $J(x, y)$.

对图像中每个像素点 R, G, B 分量的最小值进行最小值滤波,获得暗通道图.由暗通道先验理论可知,无雾图像的暗通道图趋于0.据此理论推导,可得透射率预估值 $\hat{t}(x, y)$ 为

$$\hat{t}(x, y) = 1 - \omega \cdot \min_{y \in \Omega(x, y)} \left(\min_c \left(\frac{I^c(x, y)}{A^c} \right) \right). \quad (4)$$

式(4)中: c 为 R, G, B 通道; $\Omega(x, y)$ 是以像素 (x, y) 为中心的一个窗口; ω 为保留少量雾化引入的因子, $\omega = 0.95$.

A 值按以下规则进行估算:1)在暗通道图中,按亮度大小取前0.1%的像素;2)从这些像素位置,在原有有雾图像 $I(x, y)$ 中提取这些点中亮度最大值的像素点的 R, G, B 值,其均值即为 A 值.

由于 $\hat{t}(x, y)$ 很小时,可能导致白场,故设置一个阈值 t_0 ,当 $\hat{t}(x, y)$ 值小于 t_0 时, $\hat{t}(x, y) = t_0$,取 $t_0 = 0.1$.最终的去雾恢复公式为

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A}{\max(\hat{t}(x, y), t_0)} + A. \quad (5)$$

去雾处理结果,如图 7 所示.

3.4 对比分析

将文中方法与其他图像融合方法的运行时间进行对比,如表 1 所示.表 1 中: t 为时间;PCA 为主成分分析法;GFF 为导引滤波法;Multi-GFF 为多尺度导引滤波法;GIF 为综合几种图像融合方法的一种应用的简称^[12].

文中方法基于 Intel(R) Core(TM) i3-4130 CPU,12 G 内存,Win 7,VS2010,单颗磨粒 137 幅 1 600 px×1 200 px 显微图像融合过程用时 5.10 s,平均每幅图像融合时间为 0.04 s.在文献[12]中,每组有 2 幅图像,文中方法处理 2 幅图像的时间为 0.08 s.由此可知,采用基于拉普拉斯聚焦评价函数的空域方法更直观、高效、快速.

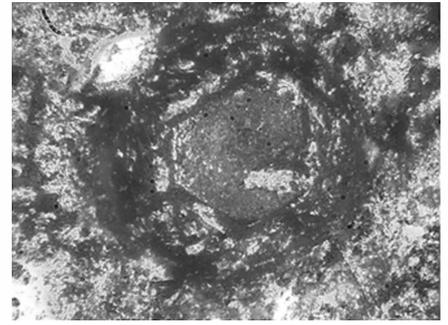


图 7 去雾处理结果

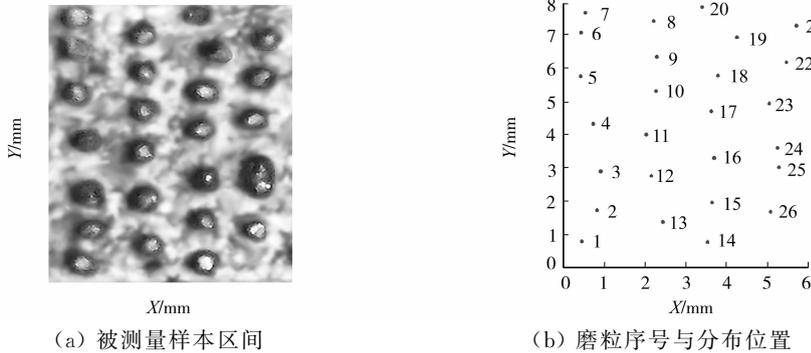
Fig. 7 Haze removal process result

表 1 融合算法运行时间对比

Tab.1 Running time of different image fusion methods

参数	PCA	文献[12]方法	GIF	GFF	Multi-GFF	文中方法
t/s	1.59	8.40	0.58	1.04	1.50	0.08

磨粒分布位置和出露高度,如图 8 所示.图 8 中: X 为圆周方向; Y 为轴向方向.部分融合后的超景深磨粒图像,如图 9 所示.由图 9 可知:磨粒 1 和磨粒 17 顶端破碎;磨粒 23 和磨粒 26 晶型完整;磨粒 24 和磨粒 25 位置靠近黏连团聚(虚线框);磨粒 20 根部断裂;磨粒 10 横向断裂.这些磨粒中,磨粒 25 出露高度大,其顶端与工件相互作用发生磨损,而磨粒 20 发生了根部断裂,出露高度最小.

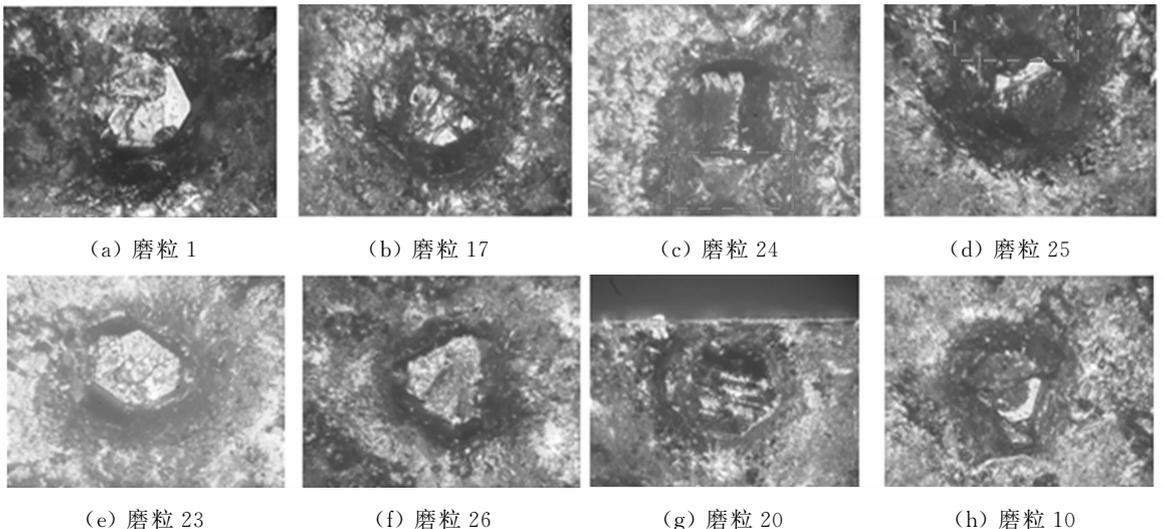


(a) 被测量样本区间

(b) 磨粒序号与分布位置

图 8 样本区间及磨粒位置

Fig. 8 Sample interval and grains position



(a) 磨粒 1

(b) 磨粒 17

(c) 磨粒 24

(d) 磨粒 25

(e) 磨粒 23

(f) 磨粒 26

(g) 磨粒 20

(h) 磨粒 10

图 9 部分磨粒形貌

Fig. 9 Partial grains morphology

4 结束语

采用聚焦评价函数进行显微图像的快速融合,获得磨粒超景深显微图像.研究钎焊磨粒的形貌特殊性,并提出有效的照明改善方案.分析图像融合的误差原因,并进行误差补偿;对融合结果呈现的对比度较低及雾化现象,采用暗通道先验算法进行去雾处理,最终获得满足直观表征要求的磨粒超景深显微图像.搭建闭环控制测量系统,基于测量系统的运动反馈,可在获得融合图像的同时,获得磨粒位置.结果表明:文中方法可以快速、有效、直观地表征钎焊砂轮表面磨粒.今后将对文中方法测量其他工艺制作的砂轮的适用性进行研究.

参考文献:

- [1] 邓朝晖,刘战强,张晓红.高速高效加工领域科学技术发展研究[J].机械工程学报,2010,46(23):106-120. DOI:10.3901/JME.2010.23.106.
- [2] SU Honghua, DAI Jianbo, DING Wenfeng, *et al.* Experimental research on performance of monolayer brazed diamond wheel through a new precise dressing method: Plate wheel dressing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9/10/11/12): 3249-3259. DOI: 10.1007/s00170-016-8646-9.
- [3] TAHVILIAN A M, LIU Zhaoheng, CHAMPLAUD H, *et al.* Characterization of grinding wheel grain topography under different robotic grinding conditions using confocal microscope[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5/6/7/8): 1159-1171. DOI: 10.1007/s00170-015-7109-z.
- [4] 黄辉,林思煌,徐西鹏.单颗金刚石磨粒磨削玻璃的磨削力研究[J].中国机械工程,2010,21(11):1278-1282.
- [5] 杨栖凤,崔长彩,黄国钦.金刚石砂轮表面二维形貌全场测量和分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2018,39(4):13-18. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201711013.
- [6] 姜志国,史文华,韩冬兵,等.基于聚焦合成的显微三维成像系统[J].CT理论与应用研究,2004,13(4):10-15. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4140.2004.04.003.
- [7] AISHWARYA N, BENNILA T C. An image fusion framework using morphology and sparse representation[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 77(8): 9719-9736. DOI: 10.1007/s11042-017-5562-4.
- [8] 刘明君,董增寿,邵贵成,等.基于改进的四叉树分解多聚焦图像融合算法研究[J].科技通报,2019,35(4):152-156.
- [9] 冯鑫,胡开群,袁毅,等.基于超分辨率和组稀疏表示的多聚焦图像融合[J].光子学报,2019(7):90-101.
- [10] 李凯,罗晓清,张战成,等.基于四元数小波变换和 Copula 模型的图像融合[J].计算机科学,2019,46(4):293-299. DOI:10.11896/j.issn.1002-137X.2019.04.046.
- [11] 谢颖贤,武迎春,王玉梅,等.基于小波域清晰度评价的光场全聚焦图像融合[J/OL].北京航空航天大学学报. DOI:10.13700/j. bh. 1001-5965. 2018. 0739.
- [12] 杨艳春,李娇,党建武,等.基于引导滤波与改进 PCNN 的多聚焦图像融合算法[J].光学学报,2018,38(5):78-87. DOI:10.3788/aos201838.0510001.
- [13] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiao'ou. Guided image filtering[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Heraklion: Springer, 2010: 1-14. DOI: 10.1007/978-3-642-15549-9_1.
- [14] PERTUZ S, PUIG D, GARCIA M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(5): 1415-1432. DOI: 10.1016/j. patcog. 2012. 11. 011.
- [15] 王超,蒋远大,翟光杰,等.基于数字图像处理的自控显微镜聚焦算法研究[J].仪器仪表学报,2009,30(6):1290-1294. DOI:10.3321/j.issn:0254-3087.2009.06.033.
- [16] 王伟鹏,戴声奎.引导滤波在雾天图像清晰化中的应用[J].华侨大学学报(自然科学版),2015,36(3):263-268. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.03.0263.

(责任编辑:钱筠 英文审校:崔长彩)