

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205126

# 空间约束聚类分析的零部件图像镜面高光去除方法\*

程升勋 王建林 随恩光 郭永奇 李季

(北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029)

**摘要:**为了解决镜面高光造成的零部件图像质量下降问题,提出了一种空间约束聚类分析的零部件图像镜面高光去除方法。首先,将零部件图像投影到最小-最大色度空间,通过固定的聚类中心对聚类过程进行空间约束在保证簇中色度相近的同时实现彩色像素和消色像素的分离;然后,采用强度比调整和亮度直方图统计分别对彩色像素和消色像素中的镜面反射分量进行估计;最后,结合二色反射模型,实现零部件图像的镜面高光去除。实验结果表明,经所提方法去高光后的实际拍摄图像的平均熵值和结构相似度分别达到了 5.750、0.998 8,有效地去除了零部件图像中的镜面高光,提高了图像质量。

**关键词:** 镜面高光去除;二色反射模型;空间约束聚类;零部件图像

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.60

## Spatial constrained clustering analysis based specular highlight removal for component image

Cheng Shengxun Wang Jianlin Sui Enguang Guo Yongqi Li Ji

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** To solve the problem of image quality degradation caused by specular highlights, a specular highlight removal method based on spatial constrained clustering analysis is proposed in this paper. Firstly, after projecting the component image into the minimum-maximum chromaticity space, the fixed clustering center is introduced to realize the separation of chromatic pixels and achromatic pixels while ensuring the similar chromaticity in a cluster. Then, the intensity ratio adjustment and brightness histogram statistics are used to determine the specular reflection components in the clustering of chromatic pixels and achromatic pixels respectively. Finally, combined with dichromatic reflection model, specular highlight removal is realized. Experimental results show that the entropy value and structure similarity of the image are 5.750 and 0.998 8 after highlight removal by proposed method. The proposed method can effectively remove specular highlights in chromatic and achromatic regions and obtain high quality images.

**Keywords:** specular highlight removal; dichromatic reflection model; spatially constrained clustering; component image

## 0 引言

高端装备制造正向着自动化、智能化飞速发展,零部件的自动装配得到了广泛的应用。零部件的形态、颜色各异,准确的检测和定位是自动装配的保障。计算机视觉已经被应用于零部件的检测和定位,非接触和在线的特点使自动装配效率大大提高。然而由于零部件表面的反射特性常常使得获取的图像中出现镜面高光,造成图像质量的下降,影响图像后续的应用<sup>[1-3]</sup>。因此对零部件

图像进行高光去除具有重要的意义。

目前,镜面高光去除的相关工作主要可以分为两类:基于多幅图像的镜面高光去除方法和基于单幅图像的镜面高光去除方法<sup>[4]</sup>。

基于多幅图像的镜面高光去除方法主要通过结合不同图像的信息来实现镜面高光去除。ElMasry等<sup>[5]</sup>通过获取不同光谱下的食物图像,将主成分分析方法和二色反射模型相结合实现食物图像镜面高光去除。Zhu等<sup>[6]</sup>通过不同偏振角度下的图像进行归一化加权实现镜面高光去除。Yang等<sup>[7]</sup>通过对两幅不同视角且高光部分不

收稿日期: 2022-01-17 Received Date: 2022-01-17

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0107303)项目资助

重叠的图像之间的颜色差异进行色度匹配,并通过投票估计光照色度从而实现图像镜面高光去除。祝振敏等<sup>[8]</sup>则将BP神经网络用于工件图像镜面高光去除,通过将不同角度下获取的工件图像输入到网络中获取无高光点,通过对最优角度图像中的高光点进行替换实现图像镜面高光去除。基于多图像的镜面高光去除方法需要对图像的获取有更高的要求,需要相机增加额外的配件且难以直接获取。

基于单幅图像的镜面高光去除方法利用高光区域附近的特征信息实现镜面高光去除。对于存在镜面高光的彩色图像, Tan 等<sup>[9]</sup>设计了镜面-漫反射机制,以获得无高光(specular-free, SF)图像,利用相邻像素间的相互作用,采用迭代的方法去除图像的镜面高光; Shen 等<sup>[10]</sup>通过添加偏移量得到了修正后的无高光(modified specular-free, MSF)图像,在伪色度空间进行聚类后,通过估计每个簇的强度比,实现镜面高光去除; Yang 等<sup>[11]</sup>提出了一种计算最大漫反射色度的新方法,使用最大漫反射色度为引导采用联合双边滤波方式实现图像的镜面高光去除; Souza 等<sup>[12]</sup>发现镜面高光像素在最小-最大色度空间中以三角形投影,将像素分成3个簇,从而提高了镜面高光去除的精度和速度。对于存在镜面高光的消色图像, Yu 等<sup>[13]</sup>将图像转换到HSV空间后,用多项式拟合亮度通道,并对其他两个通道进行修补实现镜面高光去除; Wang 等<sup>[14]</sup>通过对每个镜面高光像素减去阈值化处理后的暗通道值从而实现了路面镜面高光的去除; Wang 等<sup>[15]</sup>采用快速行进算法对海洋表面图像中的消色区域进行着色实现镜面高光去除。

然而,上述方法未考虑彩色区域和消色区域的镜面高光的不同特点,在处理彩色和消色区域镜面高光同时存在的情况时,会导致高光去除不彻底甚至造成图像结构损坏。为此,本文提出了一种空间约束聚类的零部件图像镜面高光去除方法。在最小-最大色度空间,在保证聚类中色度相近的同时,通过引入固定聚类中心对聚类过程进行空间约束,实现消色像素和彩色像素分离。然后分别根据改进的强度比调整和亮度调整方法对彩色区域和消色区域进行镜面高光去除。

## 1 高光图像空间约束聚类分析

由二色反射模型可知像素的强度由漫反射分量和镜面反射分量线性组成<sup>[16]</sup>:

$$I(x) = I^d(x) + I^s(x) = m^d(x)\Lambda + m^s(x)\Gamma \quad (1)$$

式中:  $I^d(x)$  是漫反射分量;  $I^s(x)$  是镜面反射分量;  $m^d(x)$  和  $m^s(x)$  分别为点  $x$  的漫反射权重系数和镜面反射权重系数;  $\Lambda$  和  $\Gamma$  为漫反射色度和镜面反射色度,可由下式得到:

$$\Lambda = \frac{I_c^d}{\sum_{c \in \{r, g, b\}} I_c^d}, \Gamma = \frac{I_c^s}{\sum_{c \in \{r, g, b\}} I_c^s} \quad (2)$$

在光照为白光时,镜面反射分量的三通道值相同,可以得到  $\Gamma = (1/3, 1/3, 1/3)$ 。因此,只要准确估计出图像中的镜面反射分量就能实现图像镜面高光的去除。

彩色区域的像素RGB三通道的灰度值差异明显,叠加镜面反射分量时,可依据RGB三通道的灰度值确定镜面反射分量,从而实现镜面高光的去除。而消色区域像素的RGB三通道灰度值差异很小,很难依据灰度值确定镜面反射分量,实现镜面高光去除。因此,对于彩色区域像素和消色区域像素的镜面高光需要单独处理。通过在聚类过程中引入固定的聚类中心实现消色像素和彩色像素的分离。

采用只有漫反射的无高光图像  $I^{MSF}(x)$  来计算色度可以有效避免镜面高光引起的色度偏差,  $I^{MSF}(x)$  的定义如下:

$$I^{MSF}(x) = I_c(x) - I_{\min}(x) + \bar{I}_{\min} \quad (3)$$

式中:  $I_{\min}(x) = \min(I_r(x), I_g(x), I_b(x))$ ;  $\bar{I}_{\min}$  为  $I_{\min}(x)$  中所有像素的均值。根据无高光图像计算得到相应的最小-最大色度:

$$\Lambda_{\min}^{MSF} = \min(\Lambda_{c \in \{r, g, b\}}^{MSF}), \Lambda_{\max}^{MSF} = \max(\Lambda_{c \in \{r, g, b\}}^{MSF}) \quad (4)$$

所有像素被投影在最小-最大色度空间中一个三角形区域中。同时可以发现,像素越接近  $(1/3, 1/3)$ , 就越接近消色,而彩色区域的像素则远离  $(1/3, 1/3)$ 。因此,为了尽可能分离初始聚类中心,3个点分别设为:最大色度值最大的点、离  $(0, 1)$  和  $(1/3, 1/3)$  所形成的直线最远的点和最大色度值最小的点。每个像素根据色度的最小距离分配到每个聚类中心。在保证簇中色度相近后,引入第4个固定的聚类中心点  $(1/3, 1/3)$  以实现消色像素和彩色像素的分离。聚类完成后,如果其他聚类中心到  $(1/3, 1/3)$  的欧氏距离过小,则将相应的簇合并。最后,可以得到以  $(1/3, 1/3)$  为聚类中心的消色像素的簇和其他的彩色像素的簇。因此当图像中不存在消色区域时,引入的固定聚类中心在聚类结束后得到的消色像素的簇为空;当图像中只存在消色区域时,簇合并只留下消色像素的簇。“Color”图像的聚类结果如图1所示,其中图(c)为最终聚类的结果,其右下角接近于点  $(1/3, 1/3)$  的簇为消色像素而其他簇为彩色像素,加粗的点是每个簇的聚类中心。

## 2 空间约束聚类分析的零部件图像镜面高光去除

在对零部件高光图像进行空间约束聚类分析后,可以得到包含镜面高光的彩色区域和消色区域。对于彩色

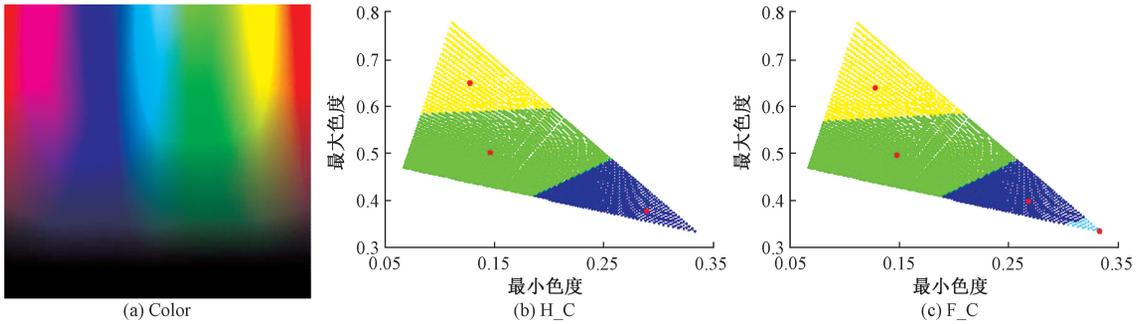


图 1 Color 聚类结果

Fig. 1 Clustering results of Color

区域的镜面高光,根据区域内高光像素的强度比和非高光像素的强度比不同,通过采用改进的强度比调整方法对彩色区域镜面高光进行去除;对于消色区域的镜面高光,根据区域内高光像素相对于非高光像素在亮度上会有一个突变峰值,通过采用亮度直方图统计的方法实现消色区域镜面高光去除。

### 2.1 零部件图像彩色区域镜面高光去除

强度比是指 RGB 三通道中最大灰度值与最大最小灰度值之差的比值,如式(5)所示,当彩色像素不存在镜面反射分量时,强度比仅和漫反射色度有关。当彩色像素存在镜面反射分量时,强度比会增大,且强度比随着镜面反射分量的增大而增大。

$$Q(x) = \frac{I_{\max}(x)}{I_{\max}(x) - I_{\min}(x)} = \frac{I_{\max}^d(x) + I_{\max}^r(x)}{I_{\max}^d(x) - I_{\min}^d(x)} = \frac{\Lambda_{\max}}{\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}} + \frac{m_s(x)\Gamma}{m_d(x)(\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min})} \quad (5)$$

式中,  $I_{\max}(x) = \max(I_r(x), I_g(x), I_b(x))$ 。

但是,强度比的大小除了受到镜面反射分量影响外,还受到灰度值大小的影响,当像素的三通道值较小,不存在镜面反射分量时,会由于最大最小通道的值相近造成该像素点的强度比过大而被调整镜面反射分量。受高如新等<sup>[17]</sup>改进漫反射色度估计值的启发,本文引入修正项:

$$\xi = \frac{\sum_{x=1}^k I_{\min}(x)}{k} \quad (6)$$

式中:  $k$  为所有的漫反射区域的像素个数。从而可以得到修正后的强度比:

$$Q^r(x) = \frac{I_{\max}(x)}{I_{\min}(x)} = \frac{I_{\max}(x)}{I_{\max}(x) - I_{\min}(x) + \xi} \quad (7)$$

修正项的引入将在一定程度上改善最大最小通道的值相近的情况。

在空间约束聚类分析后,所获得的聚类簇中无高光像素所占的比例一定,因此可以得到图像的镜面反射

分量:

$$I^r(x) = \max(I_{\max}(x) - \hat{Q}^r I_{\min}(x), 0) \quad (8)$$

$$\hat{Q}^r = \text{median}_{x \in \Omega^r}(Q^r(x)) \quad (9)$$

式中:  $\Omega^r$  为每个彩色区域的簇;  $\text{median}(\cdot)$  为中值操作。

### 2.2 零部件图像消色区域镜面高光去除

根据消色区域高光像素亮度的突变特性,通过基于亮度直方图统计的亮度调整方法实现消色区域的高光去除。首先,将聚类后消色区域的像素从 RGB 空间转换到 YCbCr 空间来进行初步亮度分析,然后对 Y 通道进行直方图统计以获得合适的亮度阈值。由于消色区域像素三通道相近,因此转换到亮度空间后仍然符合二色反射模型:

$$\mathbf{A} * I(x) + \mathbf{a} = \mathbf{A} * (I^d(x) + I^r(x)) + \mathbf{a} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为 RGB 空间到 YCbCr 空间的转换矩阵;  $\mathbf{a}$  为偏置<sup>[18]</sup>。对亮度通道 Y 进行分离:

$$Y = \mathbf{A}_1 * (I^d(x) + I^r(x)) + \mathbf{a}_1 = Y^d + Y^s \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{A}_1$  为 Y 通道的转换系数;  $\mathbf{a}_1$  为 Y 通道的偏置;  $Y^d$  为漫反射分量亮度;  $Y^s$  为镜面反射分量亮度。

高光图像空间约束聚类分析后,对消色区域进行亮度直方图统计得到 Hist,其结果如图 2 所示。可以发现高光区域在直方图的右侧形成一个突变的高峰,检测到该峰值  $Y^p$  之后向低亮度值方向寻找合适的亮度阈值并进行高光亮度的调整,最后将图像从 YCbCr 空间转换回 RGB 空间。亮度的调整公式如下:

$$\text{thr} = \max_y(\text{Hist} > Y^p) \quad (12)$$

$$Y^s = \max(Y - \text{thr}, 0) \quad (13)$$

$$Y^d = Y - Y^s \quad (14)$$

### 2.3 空间约束聚类分析的零部件图像镜面高光去除方法实现

图 3 给出了空间约束聚类分析的零部件图像镜面高光去除方法的算法流程。

其具体步骤如下:

步骤 1) 通过式(3)得到 MSF 图像,通过式(4)将

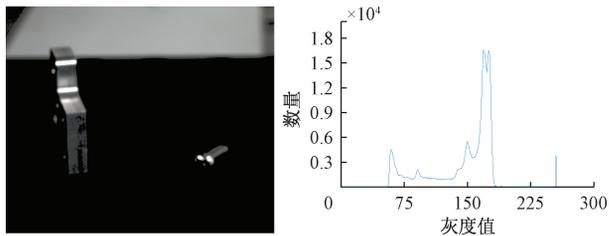


图 2 消色区域亮度直方图统计

Fig. 2 Histogram statistics of image brightness

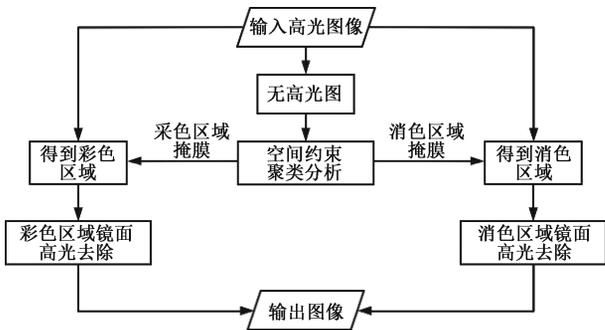


图 3 零部件图像高光处理算法流程

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

MSF 图像转换到最小-最大色度空间;

步骤 2) 通过空间约束聚类在聚类过程中保持簇中色度相近的同时将消色度区域和彩色区域分离;

步骤 3) 对于彩色区域, 采用 2.1 节中所述方法进行镜面高光去除; 对于消色区域, 采用 2.2 节中所述方法进行镜面高光去除;

步骤 4) 将消色区域和彩色区域合并最终得到无镜面高光的图像。

### 3 实验结果与分析

实验分为零部件仿真图像镜面高光去除和零部件图像镜面高光去除两部分。测试时所用系统环境是 Windows 10 家庭中文版 64 位操作系统, 中央处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-9300 CPU @ 2.40 GHz, 系统内存 16 GB, 所使用的开发平台为 MATLAB R2020b。

采用峰值信噪比 (PSNR) 和图像均方误差 (IMMSE) 评定仿真图像的处理结果, PSNR 值越大, IMMSE 值越小说明处理效果越好误差越小<sup>[19]</sup>; 采用熵值 (EN) 和结构相似度 (SSIM) 评定真实图像的处理结果, EN 越大说明去高光后的图像信息越丰富, SSIM 越大则说明去高光后图像的结构保留越完整<sup>[20]</sup>。4 种评价指标皆由 MATLAB 自带工具包计算获得。

#### 3.1 零部件仿真图像镜面高光去除

第 1 部分实验的对象为仿真的零部件高光图像, 在

无高光的零部件图像中添加镜面高光生成。如图 4 所示, 第 1 列和第 3 列为仿真的高光图像“Im1”和“Im2”, 第 2 列和第 4 列为相应的无镜面高光的真值图, 第 2 行为第 1 行图像的局部放大。合成图像中彩色区域和消色区域均包含镜面高光, 可以有效验证镜面高光去除方法的有效性。

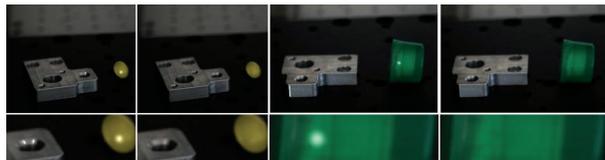


图 4 零部件仿真高光图像

Fig. 4 Synthesis highlight images of component

本文方法与现有方法的结果对比如图 5 所示, 第 1~4 行是“Im1”的处理结果, “Im1”的局部放大、“Im2”的处理结果和“Im2”的局部放大, 相应的峰值信噪比和图像均方误差如表 1 所示。

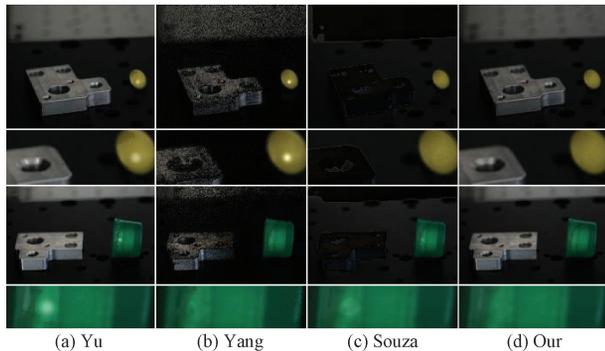


图 5 仿真高光图像处理结果

Fig. 5 Processing results of synthesis highlight image

表 1 零部件仿真高光图像处理结果

Table 1 Comparison of different algorithms

指标	图像	Yu	Yang	Souza	Our
PSNR/dB	Im1	28.29	20.79	15.51	<b>53.68</b>
	Im2	30.37	17.58	15.38	<b>47.83</b>
IMMSE	Im1	96.42	542.09	1 827.37	<b>0.28</b>
	Im2	59.77	1 136.14	1 884.82	<b>1.07</b>

Yang 的方法估计图像的最大漫反射色度后通过联合双边滤波进行图像镜面高光去除, 但是该方法在估计消色像素的最大漫反射色度时误差较大, 导致后续的镜面高光去除效果较差, 可以看到图 5 中 Yang 的方法所得图像的消色区域被破坏, 表 1 中 Yang 的方法的处理结果峰值信噪比较小而图像均方误差较大。Souza 的方法通过强度比调整进行图像镜面高光去除, 但是强度比调整方法在处理消色区域时会出现较大误差, 可以看到图 5

中 Souza 的方法所得图像的消色区域被破坏,表 1 中 Souza 的方法的处理结果峰值信噪比较小而图像均方误差较大。Yu 通过亮度调整进行图像镜面高光去除,但亮度调整无法有效处理彩色区域的镜面高光,可以看到图 5 中 Yu 的方法所得图像有残留的光斑,表 1 中 Yu 的方法的处理结果峰值信噪比和图像均方误差适中。本文方法对图像进行空间约束聚类分析,将彩色区域和消色区域分离后,采用引入校正项的强度比调整方法和基于亮度直方图统计的亮度调整方法分别实现彩色像素和消色像素的镜面高光去除,可以看到图 5 中本文方法所得结果最优,表 1 中本文方法的处理结果峰值信噪比最大,图像均方误差最小,彩色区域和消色区域的镜面高光均得到有效去除,镜面高光去除后的零部件图像具有更高的质量。

### 3.2 零部件图像镜面高光去除

第 2 部分的实验对象为真实的零部件高光图像,如图 6 所示,图像中彩色区域和消色区域均包含镜面高光。

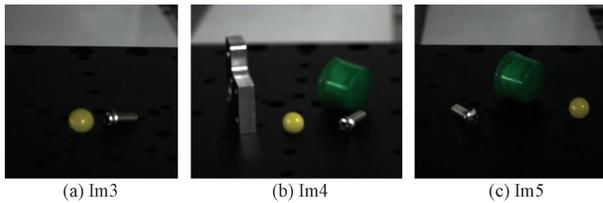


图 6 零部件高光图像

Fig. 6 Highlight images of component

本文方法与现有方法的结果对比如图 7 所示,第 1~3 行是“Im3”、“Im4”以及“Im5”的处理结果,相应的熵值和结构相似度如表 2 所示。

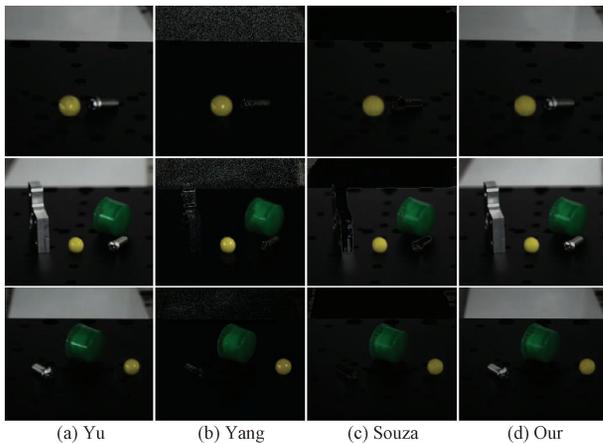


图 7 零部件高光图像处理结果

Fig. 7 Processing results of highlight image

表 2 零部件高光图像处理结果

Table 2 Comparison of different algorithms

指标	图像	Yu	Yang	Souza	Our
EN	Im3	5.422	5.006	4.660	<b>5.445</b>
	Im4	6.186	5.241	5.365	<b>6.276</b>
	Im5	5.523	4.281	4.726	<b>5.528</b>
SSIM	Im3	0.991 5	0.403 3	0.766 7	<b>0.999 3</b>
	Im4	0.984 6	0.372 6	0.738 0	<b>0.998 1</b>
	Im5	0.990 8	0.423 1	0.780 8	<b>0.999 1</b>

Yang 和 Souza 的方法能够较好实现彩色区域镜面高光去除,但是背景中的消色会被检测为镜面高光,处理后图像结构会被破坏,所得镜面高光去除图像的熵值和结构相似度都较小。Yu 的方法去除图像镜面高光时没有对图像的结构造成破坏,但是会导致全局亮度的改变,所得镜面高光去除图像的熵值和结构相似度适中。本文方法采用不同的方式处理彩色区域和消色区域的镜面高光,避免将消色区域采用强度比调整方法进行处理而造成结构破坏,同时避免彩色区域采用亮度调整方法进行处理而使得镜面高光去除不完全;因此本文方法所得镜面高光去除图像的熵值和结构相似度最大,在去除镜面高光的同时更多地保留了零部件图像原本的信息,没有造成图像结构的破坏,有效提高了零部件图像的镜面高光处理效果。

## 4 结 论

为了去除零部件图像彩色区域和消色区域的镜面高光,本文提出了一种空间约束聚类分析的镜面高光去除方法。与现有的聚类方法不同的是,采用空间约束聚类的方法,可以在保持聚类中色度相近的同时将消色像素和彩色像素分离,从而使彩色区域和消色区域镜面高光可以采用合适的方法进行分别处理;通过引入校正项,提高了彩色镜面高光的去除效果;通过对消色区域进行亮度直方图统计来确定高光阈值,有效去除了消色镜面高光。实验结果表明本文方法在去除零部件图像镜面高光方面优于现有的方法,在误差更少的同时图像的信息保留更完整。

本文方法在处理局部存在镜面高光的零部件图像时取得了较好的效果,但在图像中存在强镜面高光导致图像结构被破坏时,并不能恢复图像结构,因此基于图像修复的零部件图像镜面高光去除有待进一步研究。

### 参考文献

[ 1 ] LI F, JIANG Q, ZHANG S, et al. Robot skill

- acquisition in assembly process using deep reinforcement learning[J]. *Neurocomputing*, 2019, 345: 92-102.
- [ 2 ] 罗毅, 杨昆, 商春雪, 等. 基于多摄像头的汽车保险丝盒检测与装配方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(8): 30-39.
- LUO Y, YANG K, SHANG CH X, et al. Automobile fuse box detection and assembly method based on multi-camera [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(8): 30-39.
- [ 3 ] 苑玮琦, 郭绍陶. 圆柱型覆膜锂电池圆周面凹坑检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(2): 146-156.
- FAN W Q, GUO SH T. Research on the detection method of pit on the cylindrical surface of cylindrical coated lithium battery[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2): 146-156.
- [ 4 ] GUO Y, WANG J, QIU K, et al. Specular reflection separation for a single image using IR-SIP[C]. *Chinese Intelligent Systems Conference*. Springer, Singapore, 2019: 504-512.
- [ 5 ] ELMASRY G, GOU P, AL-REJAIE S. Effectiveness of specular removal from hyperspectral images on the quality of spectral signatures of food products [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 289: 110148.
- [ 6 ] ZHU Z, XIANG P, ZHANG F. Polarization-based method of highlight removal of high-reflectivity surface[J]. *Optik International Journal for Light & Electron Optics*, 2020, 221.
- [ 7 ] YANG Q, WANG S, AHUJA N, et al. A uniform framework for estimating illumination chromaticity, correspondence, and specular reflection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(1): 53-63.
- [ 8 ] 祝振敏, 裴爽, 陈世明, 等. 基于偏振信息的强反射工件高光去除及视觉测量方法[J]. *光学学报*, 2019, 38(11): 1112005.
- ZHU ZH M, PEI SH, CHENG SH M, et al. Highlight removal of high reflectivity workpiece and vision measurement based on polarization information[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 38(11): 1112005.
- [ 9 ] TAN R T, IKEUCHI K. Separating reflection components of textured surfaces using a single image [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(2): 178-193.
- [ 10 ] SHEN H, ZHENG Z. Real-time highlight removal using intensity ratio [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4483-4493.
- [ 11 ] YANG Q, TANG J, AHUJA N. Efficient and robust specular highlight removal [C]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(6): 1304-1311.
- [ 12 ] SOUZA A C, MACEDO M C, NASCIMENTO V P, et al. Real-time high-quality specular highlight removal using efficient pixel clustering [C]. *31st Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*, 2018, 10: 56-63.
- [ 13 ] YU D, HAN J, JIN X, et al. Efficient highlight removal of metal surfaces [J]. *Signal Processing*, 2014, 103: 367-379.
- [ 14 ] WANG Y, FU F, SHI J, et al. Efficient specular reflection separation based on dark channel prior on road surface [J]. *Intelligent Computing Theories and Application*, 2016, 9772: 426-435.
- [ 15 ] WANG S, YU C, SUN Y, et al. Specular reflection removal of ocean surface remote sensing images from UAVs [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018: 1-17.
- [ 16 ] SHAFER S A. Using color to separate reflection components [J]. *Color Research & Applications*, 1985, 10(4): 210-218.
- [ 17 ] 高如新, 李雪颖. 双边滤波的改进高光去除[J]. *中国图象图形学报*, 2018, 23(1): 9-17.
- GAO R X, LI X Y. Specular highlight removal using improved bilateral filtering [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2018, 23(1): 9-17.
- [ 18 ] RAMOS V S, JÚNIOR L G D Q S, SILVEIRA L F D Q. Single image highlight removal for real-time image processing pipelines [J]. *IEEE Access*, 2019, 8: 3240-3254.
- [ 19 ] 易开宇, 戴贞明. 基于混合非凸性二阶全变分和重叠组稀疏的非盲图像去模糊算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(9): 229-235.
- YI K Y, DAI ZH M. Non blind image deblurring based on hybrid non convex second order total variation and the overlapping group sparse [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(9): 229-235.
- [ 20 ] 马燕, 余海军, 钟发生, 等. 基于残差编解码网络的CT图像金属伪影校正[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 160-169.
- MA Y, YU H J, ZHONG F SH, et al. CT metal artifact reduction based on the residual encoder-decoder network [J].

Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8):  
160-169.

### 作者简介



程升勋, 2019 年于北京化工大学获得学士学位, 现为北京化工大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。

E-mail: 980678017@qq.com

**Cheng Shengxun** received his B. Sc. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Beijing University of Chemical Technology. His main research interest includes image processing.



王建林(通信作者), 1993 年于天津大学获得硕士学位, 1997 年于天津大学获得博士学位, 现为北京化工大学教授, 主要研究方向为视觉检测技术、智能检测与传感技术。

E-mail: wangjl@mail.buct.edu.cn

**Wang Jianlin** (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Tianjin University in 1993 and Ph. D. degree from Tianjin University in 1997, respectively. Now he is a professor in Beijing University of Chemical Technology. His main research interests include visual detection technology, intelligent detection and sensing technology.