DOI：10.13382/j.jemi.B2407784

三分量双色反射模型驱动的透明 PET 瓶图像高光去除方法研究*

乔景慧　苏冠赫　闫书源

（沈阳工业大学机械工程学院　沈阳　110870）

摘　要：光照射条件下物体表面产生的高光造成物体自身颜色信息丢失，影响立体匹配、三维重建中特征提取的质量。针对含有漫反射量和镜面反射量的双色反射模型无法准确描述透明 PET 瓶反射量的成分分布，提出基于 L2 归一化三分量双色反射模型的高光去除方法。首先对透明 PET 图像构建 L2 归一化三分量双色反射模型，阐明透明 PET 瓶反射量成分分布机理；再依据此模型将透明 PET 图像全局像素信息进行分解，计算 L2 归一化色度图；在此基础上依据 L2 归一化色度图计算全局像素的 L2 色度强度比；其次对指数变换 L2 归一化色度图聚类分析，检测透明 PET 瓶的高光区域并捕捉 PET 瓶自身颜色信息；最后结合 L2 色度强度比实现高光区域的像素信息恢复。实验部分建立了透明 PET 瓶数据集并进行验证，实验结果表明，与传统双色反射模型驱动的高光去除方法相比，所提出方法在均方误差（MSE）、峰值信噪比（PSNR）及结构相似性（SSIM）分别提高了 12.1%、21.1%、11.5%。

关键词：透明 PET 瓶；双色反射模型；高光去除；图像修复；L2 归一化色度

中图分类号：TN919.8；TB96　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：510.80

Research on highlight removal method driven by three component dichromatic reflection model for transparent PET bottle images

Qiao Jinghui　Su Guanhe　Yan Shuyuan

（School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China）

Abstract: The highlight generated on the surface of an object under light irradiation conditions causes the loss of its own color information, which affects the quality of feature extraction in stereo matching and 3D reconstruction. Aiming at the phenomenon that the dichromatic reflection model containing diffuse reflection and specular reflection cannot accurately describe the component distribution of reflection in transparent PET bottles, a highlight removal method based on L2 normalized three component dichromatic reflection model is proposed. Firstly, a L2 normalized three component dichromatic reflection model is constructed for transparent PET images to elucidate the distribution of reflectance components in transparent PET bottles. Based on this model, decompose the global pixel information of the transparent PET image and calculate the L2 normalized chromaticity map; On this basis, calculate the L2 chromaticity intensity ratio of global pixels based on the L2 normalized chromaticity diagram. Next, perform clustering analysis on the L2 normalized chromaticity diagram using exponential transformation to detect the highlight areas of transparent PET bottles and capture the inherent color information of the PET bottles. Finally, combining L2 chromaticity intensity ratio to achieve pixel information recovery in highlight areas. The experimental part established a transparent PET bottle dataset and validated it. The experimental results showed that compared with the traditional dichromatic reflection model driven highlight removal method, the proposed method improved the mean square error (MSE), peak signal-to-noise ratio (PSNR), and structural similarity (SSIM) indicators by 12.1%, 21.1%, and 11.5%, respectively.

Keywords: transparent PET bottle; dichromatic reflection model; highlight removal; image restoration; L2 normalized chromaticity

收稿日期：2024-08-26　　Received Date: 2024-08-26

*基金项目：辽宁省教育厅面上基金（LJ212410142020）、辽宁省研究生教育教学改革研究（LNYJG2022073）、沈阳工业大学研究生教育教学改革研究项目（SYJG20222002）、沈阳工业大学重点科研基金（ZDZRGD2020004）项目资助

0　引　言

当自然环境光照射至物体表面时,复杂曲面不同位置对光的反射角度不相同,部分区域的反射光存在大量镜面反射,从而导致相机拍摄的图像中存在高光区域,造成部分目标物体颜色信息丢失。在目标识别[1]、目标跟踪[2]、三维重建[3]等视觉任务中,高光区域影响计算机对目标物体信息的获取,无法准确提取所需的特征。基于双色反射模型,非朗伯模型表面的反射强度由漫反射分量与高光分量的线性组合表示。在理想漫反射条件下粗糙物体表面对某一方向入射光的漫反射特性遵从朗伯漫反射定律,该定律描述物体表面光的漫反射强度分布规律。因此视觉任务处理图像过程中,朗伯漫反射定律能够保证从像素强度信息获取目标物体固有颜色。

目前,图像高光区域去除的方法及应用领域众多[4-21],关键难点在于高光检测及高光区域信息恢复两个环节。众多的高光去除方法中从策略上可分为两类,分别是基于光学物理模型的策略以及图像统计的策略。文献[4]基于双色反射模型实现有光泽物体表面的外观重建。文献[5]对双色反射模型引入全局色线约束,依据全局色线信息实现镜面反射量与漫反射量的分离。文献[6]基于双色反射模型针对镜面反射与漫反射的一般性质建立凸优化模型,通过计算最优解来描述两者关系。在结构光三维测量领域中,Xu 等[7]基于双色反射模型通过拟合投影强度及像素绘制技术实现对镜面反射区域的消除。文献[8]对双色反射模型进行改进,定义 L2 色度、提出 L2 归一化双色反射模型,首先将图像像素的 L2 色度分解到光照色度方向及无镜面反射的光照正交子空间中,得到像素镜面反射量及无镜面反射量。再使用漫反射区域的两量比值重新估计高光区域的镜面反射量信息以实现高光区域像素信息的恢复。文献[9]基于双色反射模型,使用色彩方差分析和局部色彩细化恢复高光区域的漫反射色彩信息。针对光器件中金线表面的高光去除,文献[10]首先使用归一化相关系数匹配法粗略检测出图像的高光区域,再通过阈值处理准确找到高光区域,最后用八邻域像素平均值替换原有像素信息达到的高光去除的效果,效果良好但实现过程有简化的空间。对于雷达传感器 Liu 等[11]依据雷达方程和 Phong 模型提出多光谱激光雷达反射模型,将多光谱点云颜色信息分成漫反射与镜面反射进行高光检测、高光去除。在光场相机成像的应用中,Feng 等[12]基于二色反射模型对光场图像中的目标点反射光进行多视图拟合分析,结合全变分优化策略去除高光。但受拟合策略的影响,方法对高光区域占比大的图像有一定的挑战性。文献[13]使用聚类算法在光场图像解码后的子孔径图像中分离出高光像素,再引入优先级自适应方向的方法对高光成分去除。对于不同材质的高光去除研究,文献[14]使用多波段偏振成像仪对鲜果进行质量检测,结合最大最小多波段偏振差分方法来实现鲜果表面光斑的高精度图像高光去除。Zhu 等[15]针对金属材料提出一种三分量的偏振双向反射分布函数模型,实现对金属表面偏振反射特性更准确的描述。Liu 等[16]认为热涂层表面多次反射与体散射在半球空间中的分布是不同的,构建三分量模型提高了热涂层表面的建模精度。对于图像统计策略,结合多视图分析[17],文献[18]在非负约束下设计轻量级的优化方法实现多视角的高光去除。文献[19]使用一种鲁棒性主成分统计分析的方法,从高光图像分离出稀疏矩阵实现高光去除与图像重建。文献[20]基于 Retinex 图像理论结合统计策略识别全局图像中的高光区域,再对局部区域进行梯度融合获得良好的无高光图。文献[21]结合矩阵迭代设计一种全局优化算法用于图像高光去除,但优化过程的正则化参数对场景光照条件敏感,难以自适应地确定。综合上述讨论,图像统计策略较为复杂多变,场景应用鲁棒性有需提升。

对不透明材质物体表面的高光去除,双色反射模型已经展现出可靠且显著的成效。而对透明材质物体表面的高光去除效果还有待商榷。由于双色反射模型虽能描述不透明、不均匀材质表面的反射特性。但当光线照射至透明材质物体表面时,不仅会发生反射还会产生透射,其中透射光线经透明物体自身内部作用会重新从表面散出。故使用只含有漫反射与镜面反射两个分量的双色反射模型,描述透明材质表面反射特性的准确性有待改进。因此,本研究以透明聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate,PET)瓶为例,提出透明材质物体表面的高光去除方法,研究光照射下透明 PET 瓶的反射机理,建立 L2 归一化三分量双色反射模型,描述透明 PET 瓶图像色度信息。基于 L2 归一化三分量双色反射模型,对指数变换-L2 归一化色度图,使用 Kmeans++算法进行聚类分析,实现高光区域检测及 PET 材质固有 L2 色度提取。基于 L2 归一化双色反射模型,对全局像素计算 L2 色度强度比以进行 PET 瓶高光区域的像素信息恢复,进而实现高光去除及镜面反射量的提取。

1　三分量 L2 归一化双色反射模型的构建

综合微表面理论[22]分析,物体表面对照射光的反射强度分布由照射光强度、照射光入射角度、物体表面法向构造的反射分布函数 f 表述。该反射分布函数(reflectance distribution function)具体描述三维空间中物体表面对任一方向入射光线的光度分布。依据反射分布函数可建立出反射模型以描述物体表面反射量,如

式(1)所示。

$$\boldsymbol{L}_o(p,\omega_o)=\int_{\Omega} f_r(p,\omega_i\rightarrow\omega_o)\boldsymbol{L}_i(p,\omega_i)\cos\theta_i \mathrm{d}\omega_i \quad (1)$$

式中：$f_r(p,\omega_i\rightarrow\omega_o)$ 表示物体对于入射光方向 $\omega_i\in\Omega$ 在表面点 p 处对 ω_o 方向光的反射分布函数；$\boldsymbol{L}_i(p,\omega_i)$ 表示 ω_i 方向入射光强度；θ 为入射光与入射表面法线夹角。

对于理想漫反射表面，朗伯模型假设物体表面粗糙，为具有规则的物理模型。表面任意一点的反射光在所有方向上分布均匀，即反射分布函数 f_r 为常量。然而在透明 PET 瓶图像的成像中，PET 瓶材质具有透明特性，PET 材质表面对光的反射分布并不满足朗伯漫反射模型。为了描述非朗伯表面的反射特性，双色反射模型用漫反射分量与高光分量的组合表示反射量 $\boldsymbol{L}(p)$，如式(2)所示。

$$\boldsymbol{L}(p)=\boldsymbol{L}_d(p)+\boldsymbol{L}_s(p) \quad (2)$$

式中：$\boldsymbol{L}_d(p)$、$\boldsymbol{L}_s(p)$ 分别表示双色反射模型中的漫反射分量与高光分量，其物理模型如图 1 所示。

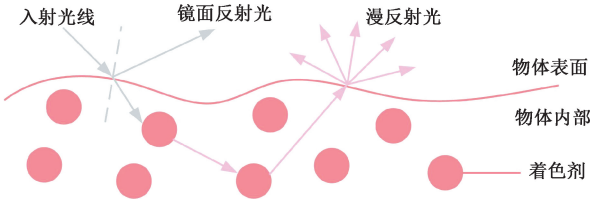

图 1 双色反射模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dichromatic reflection model

对于表面不均匀、不透明材质物体，双色反射模型提出如下假设：入射光与物体表面及物体内部介质相互作用[11]，从而产生镜面反射光及漫反射光。

光照射到透明材料介质时，光的反射特性遵循斯涅耳折射定律，透明度不同的材料对光的反射程度不同。当光线照射至透明 PET 材质表面发生斯涅耳折射时，部分能量的光线发生镜面反射及漫反射，其余光线则透射至透明 PET 瓶内部发生多次斯涅耳折射再传播至观察表面，如图 2 所示。针对以上非朗伯反射现象，提出三分量双色反射模型，将相机捕捉的透明 PET 材质色度分为朗伯漫反射量、体散射量以及镜面反射量，如式(3)所示。

$$\boldsymbol{L}(p)=\boldsymbol{L}_d(p)+\boldsymbol{L}_v(p)+\boldsymbol{L}_s(p) \quad (3)$$

自然光照射下三分量双色反射模型中，朗伯漫反射分量与物体材质自身的固有颜色相关度最高，高光区域的产生是物体表面对自然光反射程度强烈的结果，其面积分布与物体表面的形状相关。而体散射光与材质透明度、光源照射角度及物体表面形状皆有一定的相关性。L2 色度[8]属于物体颜色固有属性，与几何表面无关，有助于构造三分量双色反射模型以描述透明 PET 瓶表面的反射光。

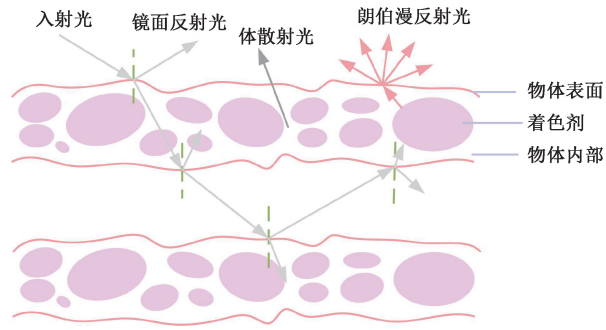

图 2 透明 PET 瓶三分量反射机理

Fig. 2 Three component reflection mechanism of transparent PET bottles

为描述透明 PET 瓶图像信息，首先对图像构造 L2 归一化三分量双色反射模型，利用谱范数对 RGB 图像中像素强度信息归一化处理，生成 L2 归一化图 $\tilde{\boldsymbol{L}}(p)$，如式(4)所示。L2 归一化处理将图像信息分布到 L2 归一化三分量双色反射模型中，模型中每个像素具有相同的色度强度，将图片像素信息转换至色度强度单位球表面，如图 3 所示。

$$\tilde{\boldsymbol{L}}(p)=\frac{\boldsymbol{L}(p)}{\|\boldsymbol{L}(p)\|_2} \quad (4)$$

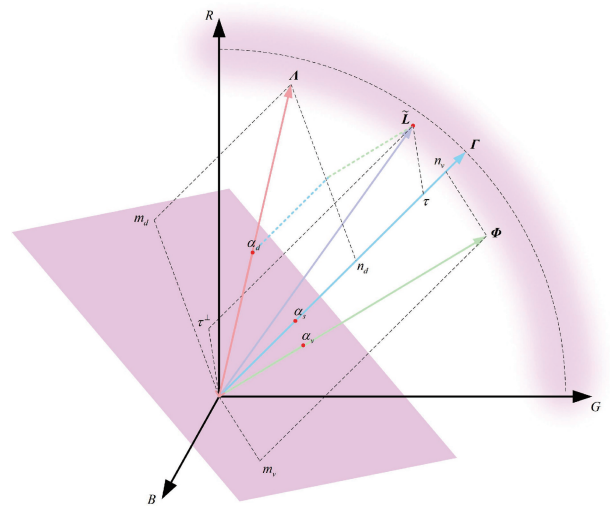

图 3 L2 归一化三分量双色反射模型

Fig. 3 L2 normalized dichromatic reflection model of three component

依据 L2 归一化三分量双色反射模型(图 3)，像素 L2 归一化色度由归一化朗伯漫反射量 $\boldsymbol{\Lambda}(p)$，归一化体散射分量 $\boldsymbol{\Phi}(p)$ 及归一化镜面反射分量 $\boldsymbol{\Gamma}(p)$ 组成，归一化后的物体表面色度如式(5)所示。

$$\tilde{\boldsymbol{L}}(p)=\alpha_d(p)\boldsymbol{\Lambda}(p)+\alpha_v(p)\boldsymbol{\Phi}(p)+\alpha_s(p)\boldsymbol{\Gamma}(p) \tag{5}$$

式中：α_d 为朗伯漫反射分量归一化系数；α_v 为体散射归一化系数；α_s 为镜面反射分量归一化系数。α_d、α_v 和 α_s 3 个参数的计算如式(6)所示。

$$\begin{cases}\boldsymbol{\Lambda}_d(p)=\dfrac{\boldsymbol{L}_d(p)}{\|\boldsymbol{L}_d(p)\|_2}\\ \boldsymbol{\Phi}_v(p)=\dfrac{\boldsymbol{L}_v(p)}{\|\boldsymbol{L}_v(p)\|_2}\\ \boldsymbol{\Gamma}_s(p)=\dfrac{\boldsymbol{L}_s(p)}{\|\boldsymbol{L}_s(p)\|_2}\end{cases} \tag{6}$$

将归一化朗伯漫反射分量 $\boldsymbol{\Lambda}(p)$ 以及归一化体散射分量沿着光源色度方向 $\boldsymbol{\Gamma}$ 及与光源色度方向正交的正交平面 $\boldsymbol{\Gamma}^{\perp}$ 分解，分解计算过程如式(7)所示。

$$\begin{cases}\boldsymbol{\Lambda}(p)=m_d(p)\boldsymbol{\Gamma}^{\perp}(p)+n_d(p)\boldsymbol{\Gamma}(p)\\ \boldsymbol{\Phi}(p)=m_v(p)\boldsymbol{\Gamma}^{\perp}(p)+n_v(p)\boldsymbol{\Gamma}(p)\end{cases} \tag{7}$$

式中：$m(p)$、$n(p)$ 分别为 L2 归一化双色反射模型中光源色度正交子空间投影系数及光源色度方向投影系数，且满足式(8)关系。

$$\begin{cases}m_d(p)^2+n_d(p)^2=1\\ m_v(p)^2+n_v(p)^2=1\end{cases} \tag{8}$$

$\boldsymbol{\Gamma}^{\perp}(p)$ 与 $\boldsymbol{\Gamma}$ 正交。于是，归一化处理后的图像双色反射模型如式(9)所示。

$$\begin{aligned}\tilde{\boldsymbol{L}}(p)&=(\alpha_d(p)m_d(p)+\alpha_v(p)m_v(p)\boldsymbol{\Gamma}^{\perp}(p)+\\&(\alpha_d(p)n_d(p)+\alpha_v(p)n_v(p)+\alpha_s(p))\boldsymbol{\Gamma}(p)=\\&\boldsymbol{\tau}^{\perp}(p)\boldsymbol{\Gamma}^{\perp}(p)+\boldsymbol{\tau}(p)\boldsymbol{\Gamma}(p)\end{aligned} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{\tau}(p)$ 和 $\boldsymbol{\tau}^{\perp}(p)$ 分别为光源色度方向及光源色度正交子空间的投影系数，且满足式(10)关系。

$$\boldsymbol{\tau}^{\perp}(p)^2+\boldsymbol{\tau}(p)^2=1 \tag{10}$$

为消除透明 PET 瓶表面高光，需先识别并区分材质自身的固有色度，然后依据 PET 瓶固有色度恢复目标高光区域的像素值。原始像素中的色度信息含有不同程度的高光分量，直接利用原始像素色度信息难以获取、区分不同材料的固有色度。在三分量归一化三分量双色反射模型中，光源色度正交子空间 $\boldsymbol{\Gamma}^{\perp}$ 与光源色度 $\boldsymbol{\Gamma}(p)$ 方向正交。像素色度映射至光源色度正交子空间内的信息 $\boldsymbol{\tau}^{\perp}(p)$ 只与材料自身固有色度信息相关，与光源色度信息无关，如图 4 所示。

2　L2 色度强度比计算及高光区域像素信息恢复

L2 归一化数据无法进行反归一化，不能直接使用光

图 4　光源色度正交子空间投影

Fig. 4　Projection of light source chromaticity in orthogonal subspace

度正交子空间信息进行图像恢复。本研究基于三分量 L2 归一化双色反射模型提出一种 L2 归一化强度比(Rto)以恢复高光区域像素信息。依据三分量 L2 归一化双色反射模型所属同一材料区域的像素，其 L2 色度一致。为了描述这一特征，本研究提出像素的 L2 色度强度比为光度正交子空间内 RGB 通道的最大值与 RGB 通道范围值(最大值与最小值的差)之比，该比值是与几何表面无关的标量，如式(11)所示。

$$Rto(p)=\frac{l_{\max}(p)}{l_{\mathrm{ran}}(p)}=\frac{\tilde{l}_{\max}(p)}{\tilde{l}_{\mathrm{ran}}(p)} \tag{11}$$

式中：$\tilde{l}_{\max}(p)=\max\{\tilde{l}_r,\tilde{l}_g,\tilde{l}_b\}$，$\tilde{l}_{\min}(p)=\min\{\tilde{l}_r,\tilde{l}_g,\tilde{l}_b\}$ 分别表示像素 p 在 L2 色度 RGB 通道中的最大值与最小值。其中 $\tilde{l}_r$、$\tilde{l}_g$、$\tilde{l}_b$ 分别表示像素 p 在 L2 色度 RGB 3 个通道中的值，统一由 $\tilde{l}_{\varepsilon}(p)$ 表示。$\tilde{l}_{\varepsilon}(p)$ 和 $\tilde{l}_{\mathrm{ran}}(p)$ 分别如式(12)和(13)所示。

$$\tilde{l}_{\varepsilon}(p)=\boldsymbol{\tau}_{\varepsilon}^{\perp}(p)+\boldsymbol{\tau}_{\varepsilon}(p)\ ,\ \varepsilon\in(r,g,b) \tag{12}$$

$$\tilde{l}_{\mathrm{ran}}(p)=\tilde{l}_{\max}(p)-\tilde{l}_{\min}(p) \tag{13}$$

对于郎伯漫反射区域的像素，$\boldsymbol{\tau}_{\max}(p)=\boldsymbol{\tau}_{\min}(p)$。因此，强度比 Rto 可依据朗伯漫反射信息计算，强度比如式(14)所示。

$$Rto_d(p)=\frac{\Lambda_{\max}}{\Lambda_{\max}-\Lambda_{\min}}=\frac{\boldsymbol{\tau}_{\max}^{\perp}(p)}{\boldsymbol{\tau}_{\max}^{\perp}(p)-\boldsymbol{\tau}_{\min}^{\perp}(p)} \tag{14}$$

L2 强度比具有与物体表面几何信息无关，而与表面颜色有着紧密联系的特性。该特性保证 L2 强度比实现像素信息的恢复。对于图像的高光区域，像素信息中存在镜面反射分量，强度比计算有所变化，其计算如式(15)所示。

$$Rto_s(p)=\frac{\boldsymbol{\tau}_{\max}^{\perp}(p)}{\boldsymbol{\tau}_{\max}^{\perp}(p)-\boldsymbol{\tau}_{\min}^{\perp}(p)}+\frac{\|\boldsymbol{\tau}(p)\|}{\|\boldsymbol{\tau}^{\perp}(p)\|(\boldsymbol{\tau}_{\max}^{\perp}(p)-\boldsymbol{\tau}_{\min}^{\perp}(p))} \tag{15}$$

三分量 L2 归一化双色反射模型聚类结果能够获取 PET 材质固有色度方向分量 $\widetilde{\boldsymbol{L}}_{color}$，以用于优化高光区域的像素信息。恢复后的像素信息由材料固有色度区域像素在 RGB 空间中的平均值 Ave $\| \boldsymbol{L}_{color} \|$ 与像素无高光量 $\boldsymbol{L}_{sf}(p)$ 的加和计算求出，如式(16)所示。

$$\boldsymbol{L}_r(p) = 0.5 \times \text{Ave} \| \boldsymbol{L}_{color} \| \cdot \widetilde{\boldsymbol{L}}_{color} + 0.5 \times \boldsymbol{L}_{sf}(p) \tag{16}$$

式中：$\boldsymbol{L}_r(p)$ 为恢复后的像素信息，像素无高光量 $\boldsymbol{L}_{sf}(p)$ 以及像素高光量 $l_s(p)$ 的计算如式(17)和(18)所示。

$$\boldsymbol{L}_{sf}(p) = [l_r(p) - l_s(p), l_g(p) - l_s(p), l_b(p) - l_s(p)] \tag{17}$$

$$l_s(p) = l_{\max}(p) - Rto(p) \cdot l_{\text{ran}}(p) \tag{18}$$

3 实 验

本研究使用手机相机对室内场景自然光照射条件下的透明 PET 瓶，从不同角度进行拍摄，建立数据集。数据集中所有图像尺寸横纵比均为 3∶4，像素为 612×816 pixels。选取数据集中多组不同的透明 PET 瓶图像进行高光去除任务实验，具体流程如图 5 所示。

首先在 RGB 空间中构造图像 L2 归一化三分量双色反射模型，并基于图片的模型信息获取 PET 材质固有色度、检测透明 PET 瓶图像高光区域。创建图像 L2 归一化三分量双色反射模型过程中，指数变换 L2 归一化色度图反映全局像素 L2 归一化后的变化结果，如图 6 所示。变化后的图像像素信息表示 L2 归一化色度。

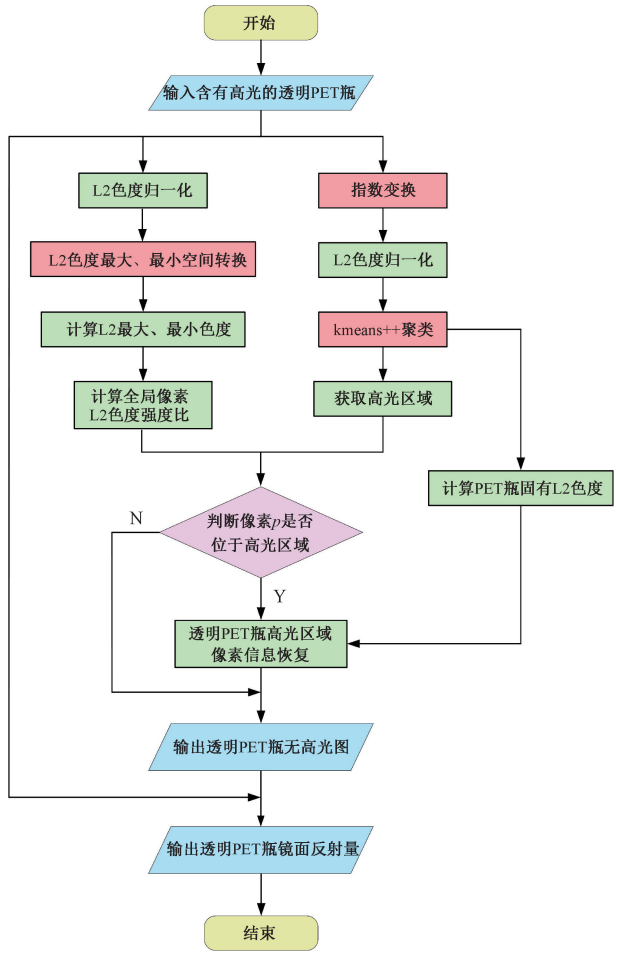

图 5 透明 PET 瓶高光去除流程

Fig. 5 Process diagram of transparent PET bottle highlight removal

(a) 图像1 (a) Inage 1　(b) 图像3 (b) Inage 3　(c) 图像5 (c) Inage 5　(d) 图像7 (d) Inage 7　(e) 图像9 (e) Inage 9　(f) 图像11 (f) Inage 11

图 6 指数变换 L2 归一化色度图

Fig. 6 L2 normalized chromaticity diagram of exponential transformation

为检测高光区域以及获取 PET 材质固有色度信息，选用 Kmeans++聚类方法在三分量 L2 归一化双色反射模型中对图像进行聚类分析，其中聚类数目依据非监督式评估指标簇内平方和（inertias）确定，计算不同聚类数目对应的 inertias 值，选取指标变化程度剧烈的后一点对应的数值作为最终图像聚类数目，结果图 7 所示。为了验证三分量 L2 归一化双色反射模型的优越性，对不同处理方法的图像进行聚类分析实验。

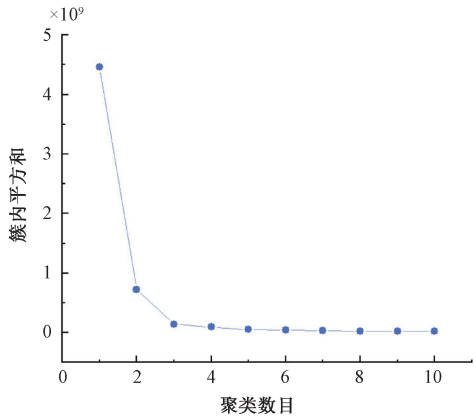

图 7　inertias 计算

Fig. 7　Inertias calculation

对经不同处理方式后的图像 Kmeans++聚类结果进行比较，如图 8 所示。聚类结果表面在原始图像或直接将原始图像映射至 L2 归一化三分量双色反射模型中聚类，聚类结果混乱，无法获取 PET 瓶固有色度信息，如图 8（b）、（c）所示。将导致部分透明 PET 瓶高光区域未被检测出，进而影响高光去除的效果。而结合图像指数变换能够改善 L2 归一化三分量双色反射模型中的图像聚类结果，如图 8（d）所示。

对测试图像进行高光去除测试，不同方法提取的透明 PET 瓶图像镜面反射分量及透明 PET 瓶图像高光去除结果不同，如图 9~14 所示。依据 L2 归一化色度[8]计算漫反射区域像素的镜面反射分量与漫反射分量的比值，用该值估计高光区域像素的镜面反射量实现高光区域的镜面反射量的提取。但提取的镜面反射量中包含一定量的透明 PET 瓶色度信息，高光区域恢复效果不佳，如图 9（b）~14（b）所示。基于双色反射模型[6]建立镜面反射至漫反射的转换机制，利用像素在最大色度强度空间的分布估计漫反射像素色度，再以此计算镜面反射在双色反射模型中的权重实现镜面反射分量的提取与去除，去除效果如图 9（c）~14（c）所示。本研究结合所提出的 L2 归一化三分量双色反射模型，依据强度比构造出像素 L2 色度强度比，用以分离透明 PET 瓶高光区域像素的镜面反射分量实现透明 PET 瓶高光区域的图像信息恢复。与上述方法相比，本研究提出的三分量双色反射模型驱动的高光去除方法更加有效地实现透明 PET 瓶图像的高光去除及高光区域信息恢复，如图 9（d）~14（d）所示。

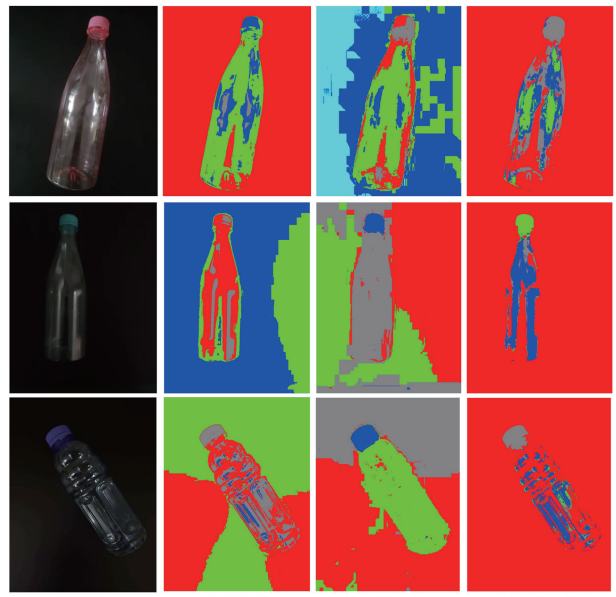

图 8　Kmeans++聚类结果

Fig. 8　Kmeans++ Cluster results

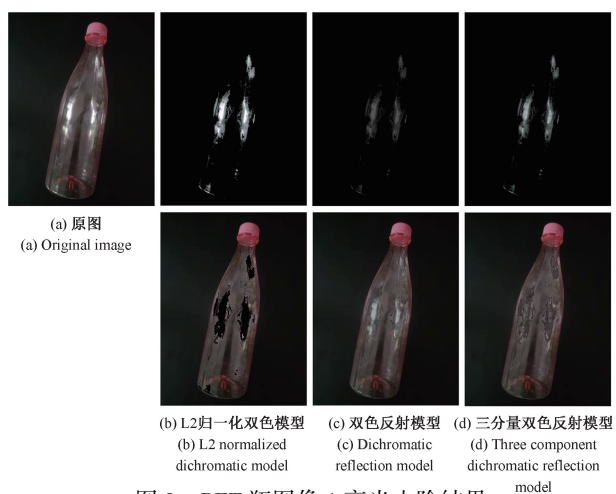

图 9　PET 瓶图像 1 高光去除结果

Fig. 9　Highlight removal result of PET bottle image 1

为量化分析不同方法对透明 PET 瓶图像的高光去除结果，选用均方误差（mean squared error，MSE）、峰值信噪比（peak signal-to-noise ratio，PSNR）及结构相似性（structure similarity index measure，SSIM）评价参数对测试数据集评估，测试数据集的图像如图 15（a）~（k）所示。其中，均方误差直观地反映高光去除前后图像间的像素平均差异；峰值信噪比反映高光去除前后图像质量的变化程度；结构相似性基于人类视觉系统衡量高光去

图 10 PET 瓶图像 3 高光去除结果

Fig. 10 Highlight removal result of PET bottle image 3

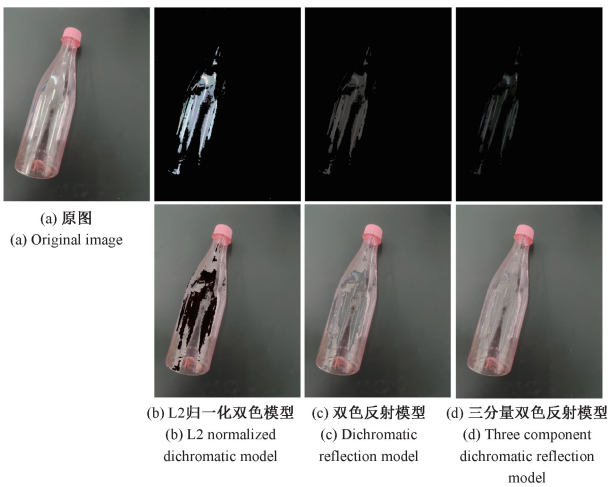

图 11 PET 瓶图像 5 高光去除结果

Fig. 11 Highlight removal result of PET bottle image 5

图 12 PET 瓶图像 7 高光去除结果

Fig. 12 Highlight removal result of PET bottle image 7

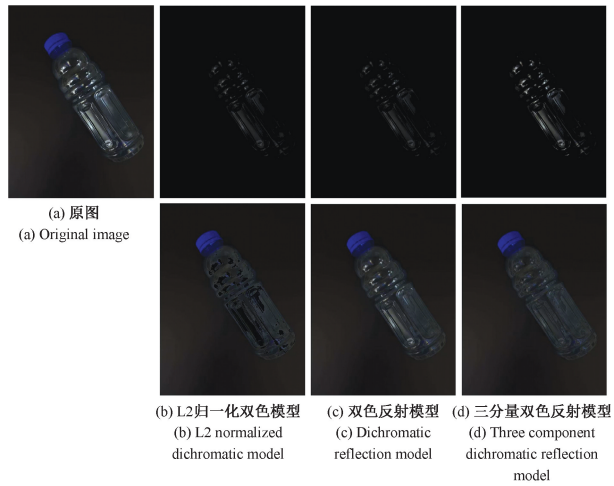

图 13 PET 瓶图像 9 高光去除结果

Fig. 13 Highlight removal result of PET bottle image 9

图 14 PET 瓶图像 11 高光去除结果

Fig. 14 Highlight removal result of PET bottle image 11

除前后两张图像的相似性。表 1 数据表明,L2 归一化双色反射模型[8]驱动的方法获得的 PET 瓶无高光图与原图差异最大,高光区域被有效去除,但图像恢复效果不佳。双色反射模型[6]驱动的高光去除结果与原图像差异最小。结合图 9~14,在主观视觉感知上,提出的方法对透明 PET 瓶的高光去除的有效性更强,恢复后的高光区域像素与临近像素更加协调。综合上述分析,三分量双色反射模型驱动的方法对透明 PET 瓶图像的高光去除及图像恢复效果均有提升。使用表 1 中数据比较双色反射模型[6]驱动的方法与所提出方法对透明 PET 图像的像素恢复效果,结果表明所提出的方法在均方误差、峰值信噪比及结构相似性 3 个指标上分别提升了 12.4%、21.1%和 11.5%。

(a) 图像1 (a) Image 1　(b) 图像2 (b) Image 2　(c) 图像3 (c) Image 3　(d) 图像4 (d) Image 4　(e) 图像5 (e) Image 5　(f) 图像6 (f) Image 6　(g) 图像7 (g) Image 7　(h) 图像8 (h) Image 8　(i) 图像9 (i) Image 9　(j) 图像10 (j) Image 10　(k) 图像11 (k) Image 11

图 15　测试数据集

Fig. 15　Test dataset

表 1　透明 PET 瓶图像高光去除评价

Table 1　Evaluation of high light removal on transparent PET bottle image

评价指标	图像	L2 归一化双色反射模型[8]	双色反射模型[6]	三分量双色反射模型
MSE	Image1	779. 56	88. 77	275. 86
	Image2	1 163. 27	132. 57	247. 70
	Image3	191. 67	22. 42	59. 79
	Image4	189. 63	22. 13	44. 78
	Image5	1 909. 10	215. 85	81. 14
	Image6	1 346. 54	152. 32	56. 31
	Image7	456. 64	52. 79	134. 05
	Image8	504. 88	57. 83	123. 64
	Image9	266. 32	30. 70	93. 09
	Image10	216. 70	25. 53	53. 50
	Image11	1 776. 23	191. 47	188. 28
PSNR/dB	Image1	19. 21	28. 65	23. 72
	Image2	17. 47	26. 91	24. 19
	Image3	25. 31	34. 62	30. 36
	Image4	25. 35	34. 68	31. 62
	Image5	15. 32	24. 79	29. 04
	Image6	16. 84	26. 30	30. 62
	Image7	21. 54	30. 91	26. 86
	Image8	21. 10	30. 51	27. 21
	Image9	23. 88	33. 26	28. 44
	Image10	24. 77	34. 06	30. 85
	Image11	15. 64	25. 31	25. 38
SSIM/%	Image1	92. 63	96. 62	94. 38
	Image2	88. 40	94. 75	93. 06
	Image3	91. 71	98. 07	96. 10
	Image4	92. 15	98. 16	97. 15
	Image5	90. 71	94. 80	96. 53
	Image6	93. 17	95. 65	97. 18
	Image7	88. 51	97. 23	95. 47
	Image8	91. 12	97. 44	96. 39
	Image9	89. 40	97. 56	94. 45
	Image10	86. 65	96. 45	94. 27
	Image11	80. 93	93. 43	93. 11

4　结　论

为了去除光照射条件下透明 PET 瓶表面产生的高光,提出了一种 L2 归一化三分量双色反射模型的高光去除方法,创建结合像素 L2 色度强度比及材质固有色度的高光区域像素信息恢复机制。将原始图像全局像素信息转换为 L2 色度,对像素强度信息进行 L2 归一化提高了材质色度获取的准确性。再对经指数变换的 L2 归一化色度图聚类分析,检测出高光区域并对其进行恢复。最终实现透明 PET 瓶图像中高光的有效去除以及良好的图像修复效果。本文提出的策略依据 L2 归一化三分量

双色反射模型计算 L2 色度强度比,准确、充分地利用材质固有色度信息,对图像中强镜面反射区域像素恢复的有效性更强。但材质固有色度的提取对聚类分析的依赖度较高,未来可继续探索多目标、有遮挡场景的高光去除技术。

参考文献

[1] 李加定, 万若楠, 孙小广,等. 基于球面投影的激光点云目标检测[J]. 电子测量技术, 2024, 47(8): 93-99.
LI J D, WAN R N, SUN X G, et al. Point cloud data processing and target recognition based on spherical projection [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8): 93-99.

[2] 赵瑜, 孙宏海, 高文. 基于局部特征的无人机集群目标检测跟踪方法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(8): 183-189.
ZHAO Y, SUN H H, GAO W. Detecting and tracking method of UAV swarm based on local features [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(8): 183-189.

[3] 庄苏锋, 屠大维, 张旭, 等. 水下双目立体视觉对应点匹配与三维重建方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 147-154.
ZHUANG S F, TU D W, ZHANG X, et al. Research on corresponding point matching and 3D reconstruction of underwater binocular stereo vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 147-154.

[4] TOMINAGA S, YONG R K F. Appearance estimation and reconstruction of glossy object surfaces based on the dichromatic reflection model [J]. Color Research & Application, 2022, 47(6): 1313-1329.

[5] REN W H, TIAN J D, TANG Y D. Specular reflection separation with color-lines constraint[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(5): 2327-2337.

[6] FU G, ZHANG Q, ZHU L, et al. Towards high-resolution specular highlight detection[J]. International Journal of Computer Vision, 2024, 132(1): 95-117.

[7] XU F H, ZHANG Y X, ZHANG L X. An effective framework for 3D shape measurement of specular surface based on the dichromatic reflection model[J]. Optics Communications, 2020, 475(1): 126210-126218.

[8] SUO J L, AN D S, JI X Y, et al. Fast and high quality highlight removal from a single image [J]. IEEE Transactions on Image Processing a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2016, 25(11): 5441-5454.

[9] WANG H Q, XU C X, WANG X Z, et al. Light field imaging based accurate image specular highlight removal[J]. Plos One, 2016, 11(6): 1-17.

[10] 叶婷, 赵立宏, 李明, 等. 光器件金线图像高光区域的检测与去除[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 146-152.
YE T, ZHAO L H, LI M, et al. Detection and removal of highlight area in metal wire image of optical device[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 146-152.

[11] LIU ZH ZH, SONG SH L, WANG B H, et al. Multispectral LiDAR point cloud highlight removal based on color information[J]. Optics Express, 2022, 30(16): 28614-28631.

[12] FENG W, LI X H, CHENG X H, et al. Specular highlight removal of light field based on dichromatic reflection and total variation optimizations [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151: 106939-106947.

[13] FENG W, CHENG X H, LI X G, et al. Specular highlight removal based on dichromatic reflection model and priority-based adaptive direction with light field camera[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 172: 107856-107873.

[14] HAO J L, ZHAO Y Q, PENG Q N. A specular highlight removal algorithm for quality inspection of fresh fruits[J]. Remote Sensing, 2022, 14(13): 3215-3215.

[15] ZHU J P, WANG K, LIU H, et al. Modified model of polarized bidirectional reflectance distribution function for metallic surfaces [J]. Optics and Laser Technology, 2018, 99: 160-166.

[16] LIU H, ZHU J P, WANG K, et al. Three-component model for bidirectional reflection distribution function of thermal coating surfaces[J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(6): 37-40.

[17] 温佩芝, 周迎, 苗渊渊, 等. 多视角图像特征匹配的高光去除方法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(23): 156-161.
WEN P ZH, ZHOU Y, MIAO Y Y, et al. High light removing method based on multi view feature matching[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(23): 156-161.

[18] SU T, ZHOU Y, YU Y, et al. Highlight removal of multi-view facial images[J]. Sensors, 2022, 22(17): 6656-6673.

[19] PAN J J, LI R Y, LIU H J, et al. Highlight removal for endoscopic images based on accelerated adaptive non-convex RPCA decomposition[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2023, 228: 107240.

[20] JIANG SH R, CHENG L, YUAN H W, et al. Highlight removal emphasizing detail restoration [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (6): 2469-2473.

[21] XIA W Y. Fast high quality highlight removal using a simplified matrix iteration method[J]. Signal Processing, 2025, 226: 109641.

[22] 汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 217-223.
WANG F B, YI L, WANG F, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surfaces based on diffuse reflection optimization[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 41(11): 217-223.

作者简介

乔景慧,2002 年于沈阳建筑大学获得学士学位,2005 年于东北大学获得硕士学位,2012 年于东北大学获得博士学位,现为沈阳工业大学教授,主要研究方向为复杂工业过程建模与智能控制、智能视觉与机器学习。

E-mail: qiaojh2002@163.com

Qiao Jinghui received his B. Sc. degree from Shenyang Jianzhu University in 2002, M. Sc. degrees from Northeastern University in 2005, and Ph. D. degree from Northeastern University in 2012, respectively. Now he is a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include modeling and intelligent control for complex industry systems, intelligent vision and machine learning.

苏冠赫(通信作者),2022 年于沈阳工业大学获得学士学位,现为沈阳工业大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉、图像处理和深度学习。

E-mail: 3119015545@qq.com

Su Guanhe (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests include machine vision, image processing and deep learning.

闫书源,2021 年于沈阳化工大学获得学士学位,现为沈阳工业大学硕士研究生,主要研究方向为图像处理和工业控制。

E-mail: 2416607153@qq.com

Yan Shuyuan received his B. Sc. degree from Shenyang University of Chemical Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests include image processing and industrial control.