

基于法向量估计的透明物体表面反射光分离

张景华, 张焱*, 石志广, 李彪, 张宇, 刘荻, 索玉昌

国防科技大学电子科学学院 ATR 重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 首先, 利用透明物体表面反射光和透射光在垂直和平行方向上的光强分布关系, 基于偏振正交分解原理, 推导出反射光成分、透射光成分、反射光偏振度、透射光偏振度之间的函数关系。然后, 根据相机成像原理, 利用表面法向量求解得到透明物体表面不同位置处入射光线和法向量的夹角及入射面方位角, 进而归纳出图像中各个像素点的反射光偏振度和透射光偏振度的分布规律。最后, 基于反射和透射的偏振特性和相关特性, 利用梯度下降算法计算得到反射分量和透射分量之间归一化的互相关最小值, 最终实现反射光和透射光的分离, 进而抑制了透明物体表面反射光的干扰, 这为复杂反射光场景下的目标检测识别及图像匹配等提供了支持。

关键词 物理光学; 法向量; 透明物体; 偏振特征; 相关特征; 反射光分离

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1526001

Reflected Light Separation on Transparent Object Surface Based on Normal Vector Estimation

Zhang Jinghua, Zhang Yan*, Shi Zhiguang, Li Biao, Zhang Yu, Liu Di, Suo Yuchang
National Key Laboratory of Science and Technology on Automatic Target Recognition, College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Firstly, according to intensity distributions of reflected light and transmitted light in perpendicular and parallel directions on surface of transparent objects, the functional relation between the components of reflected light and transmitted light and that between the polarization degrees of reflected light and transmitted light are derived with the principle of polarization orthogonal decomposition in this paper. Then, based on the imaging principle of camera, the angles between incident lights and normal vectors and the azimuth angles of the incident planes at different positions of transparent object surface are obtained by using surface normal vector to summary the distribution rules of the polarization degrees of reflected light and transmitted light at each pixel in the image. Finally, according to the polarization characteristics and correlation features between reflection and transmission, the minimum of normalized cross-correlation between reflection component and transmission component is calculated by gradient descent algorithm to realize the separation of reflected light and transmitted light, which suppresses the interference of reflected light on the surface of transparent objects, and it plays an important role in information processing and applications such as target detection and image matching in environment with complex reflected light.

Key words physical optics; normal vector; transparent object; polarization characteristic; correlation feature; reflected light separation

OCIS codes 260.5430; 290.1990; 100.2980

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-02-05; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(62075239, 61302145)、武器装备预研项目(9140C800302KG01)

通信作者: *atrthreefire@sina.com

1 引言

透明材质的物体具有表面光滑、透光高、漫反射低的特点,在利用相机对其背后的景物成像时,获取的图像由两部分组成:反射光成分和透射光成分^[1-2]。由于反射和透射过程同时发生^[3],故反射光和透射光混合在一起,彼此重叠、相互影响。一方面,反射光会在物体表面呈现虚像^[4],造成反射区域光照不均,当反射光较强时,还会在物体表面形成高亮区域,掩盖透明物体背后景物的颜色细节等特征,给图像分割、目标识别、立体匹配等信息处理过程带来较大干扰;另一方面,对反射光进行分析,能够获取反射光源强度、位置等信息,为目标探测和侦察提供帮助。因此,透明物体表面反射光和透射光的分离极具挑战性,其对图像分割、目标识别、立体匹配等应用具有重要的意义^[5-6]。

物体表面的反射光和透射光都属于偏振光,且两者之间的偏振状态存在较大差异,因此,偏振特征的提取与分析能够为透明物体表面反射光的分离提供有效的先验信息。Wolff 等^[7-9]基于菲涅耳反射定律研究了物体表面反射光的偏振特征,并探索了偏振特征在物体材质分类、光滑物体表面反射光去除、物体表面形状检测等方面的应用。Ohnishi 等^[2]利用不同起偏角下反射光强不同的原理,提出一种基于旋转偏振片的反射光分离方法,实现了玻璃表面反射光的抑制。Schechner 等^[10]利用偏振信息对反射光观测角进行了估计,实现了玻璃表面反射光和透射光的分离。Farid 等^[11]提出一种结合独立成分分析法的反射光分离方法,该方法利用偏振片分别获取反射光最强时和最弱时的两幅偏振光图像,通过计算其独立成分,实现了反射光的分离。

以上研究成果表明,利用偏振特征能够实现反射光的分离。然而现有的大多数基于偏振特征的反射光分离算法都是假定偏振度大小与像素点坐标位

置无关,没有充分考虑透明物体表面反射光偏振度和透射光偏振度空域变化的影响,因此反射光分离效果并不理想。根据相机成像原理可知,图像中每个像素点的入射方向都是不同的,故每点处的入射光线和物体表面法向量的夹角是不同的。偏振度的大小与入射光线的观测角有关,因此物体表面每点的偏振度实际是不同的,偏振度本质上是空域变化量。

为了解决偏振度空域变化引起的反射光分离效果不佳问题,本文利用相机成像原理,结合物体表面法向量,推导出反射光偏振度和透射光偏振度在像素坐标上的变化规律,并提出一种基于反射光成分和透射光成分归一化互相关(NCC)最小化的反射光分离算法。首先利用偏振角图像中心区域像素点的平均值确定物体表面法向量方位角,然后通过初始化天顶角得到物体表面法向量初始值,利用法向量和入射光的夹角得到图像上各个像素点的反射光偏振度和透射光偏振度,结合垂直方向和平行方向的光强值,分离得到初始反射光成分和初始透射光成分,并通过梯度下降法求解反射光成分和透射光成分 NCC 最小值,最终实现透明物体表面反射光和透射光的有效分离。

2 透明物体表面偏振态模型的构建

2.1 物体表面反射光的组成

探测器接收到的透明表面总光强 I 主要由反射光 I_R 和透射光 I_T 构成^[12-13],如图 1 所示,其表达式为

$$I = I_R + I_T. \quad (1)$$

其中透明物体表面反射光 I_R 是透明物体表面直接反射外部光源产生的。根据菲涅耳反射定律,光波发生镜面反射后由自然光变为偏振光,偏振方向垂直于入射面;透明物体表面透射光 I_T 由光波穿透材质并经过透明物体表面折射产生。光波发生折射

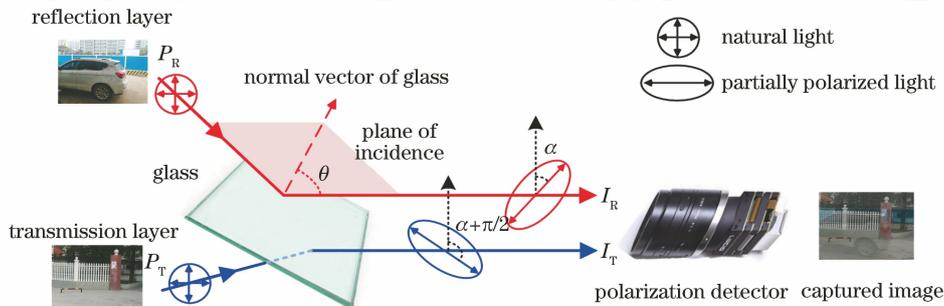


图 1 透明物体表面光的组成

Fig. 1 Components of light on transparent object's surface

之后,也会产生偏振效应,其偏振方向平行于入射面。图 1 中 P_R 表示反射光源, P_T 表示透射光源, θ 表示观测角, α 表征偏振方向。

2.2 基于偏振正交分解的反射光成分和透射光成分求解

根据偏振正交分解原理,探测器接收到的垂直方向光强分量 I^\perp 和平行方向光强分量 I^\parallel 分别为

$$\begin{cases} I^\perp(i,j) = I_R^\perp(i,j) + I_T^\perp(i,j) \\ I^\parallel(i,j) = I_R^\parallel(i,j) + I_T^\parallel(i,j) \end{cases}, \quad (2)$$

式中, I_R^\perp 和 I_R^\parallel 分别表示反射光垂直方向光强分量和平行方向光强分量, I_T^\perp 和 I_T^\parallel 分别表示透射光垂直方向光强分量和平行方向光强分量, (i,j) 表示像素点的坐标位置。这里垂直方向和平行方向是指相对于入射面的方向。

物体表面反射光和透射光都属于偏振光,令反射光偏振度为 γ ,透射光偏振度为 χ ,根据偏振光的定义,有

$$\gamma(i,j) = \frac{I_R^\perp(i,j) - I_R^\parallel(i,j)}{I_R^\perp(i,j) + I_R^\parallel(i,j)}, \quad (3)$$

$$\chi(i,j) = \frac{I_T^\parallel(i,j) - I_T^\perp(i,j)}{I_T^\parallel(i,j) + I_T^\perp(i,j)}, \quad (4)$$

则

$$I_R^\perp(i,j) = \frac{1 + \gamma(i,j)}{1 - \gamma(i,j)} \cdot I_R^\parallel(i,j), \quad (5)$$

$$I_T^\perp(i,j) = \frac{1 - \chi(i,j)}{1 + \chi(i,j)} \cdot I_T^\parallel(i,j). \quad (6)$$

将(5)式和(6)式代入(2)式可得到透射光在垂直方向上和平行方向上的光强分量:

$$\begin{cases} I_T^\perp(i,j) = \frac{[1 - \chi(i,j)] \cdot \{[1 + \gamma(i,j)] \cdot I^\parallel(i,j) - [1 - \gamma(i,j)] \cdot I^\perp(i,j)\}}{2[\gamma(i,j) + \chi(i,j)]} \\ I_T^\parallel(i,j) = \frac{[1 + \chi(i,j)] \cdot \{[1 + \gamma(i,j)] \cdot I^\parallel(i,j) - [1 - \gamma(i,j)] \cdot I^\perp(i,j)\}}{2[\gamma(i,j) + \chi(i,j)]} \end{cases}, \quad (7)$$

同时,确定反射光在垂直方向上和平行方向上的光强分量为

$$\begin{cases} I_R^\perp(i,j) = \frac{[1 + \gamma(i,j)] \cdot \{[1 + \chi(i,j)] \cdot I^\perp(i,j) - [1 - \chi(i,j)] \cdot I^\parallel(i,j)\}}{2[\gamma(i,j) + \chi(i,j)]} \\ I_R^\parallel(i,j) = \frac{[1 - \gamma(i,j)] \cdot \{[1 + \chi(i,j)] \cdot I^\perp(i,j) - [1 - \chi(i,j)] \cdot I^\parallel(i,j)\}}{2[\gamma(i,j) + \chi(i,j)]} \end{cases}, \quad (8)$$

总光强等于垂直方向和平行方向的光强之和,从而确定物体表面反射光和透射光成分为

$$\begin{cases} I_T(i,j) = I_T^\perp(i,j) + I_T^\parallel(i,j) = \frac{[1 + \gamma(i,j)] \cdot I^\parallel(i,j) - [1 - \gamma(i,j)] \cdot I^\perp(i,j)}{\gamma(i,j) + \chi(i,j)} \\ I_R(i,j) = I_R^\perp(i,j) + I_R^\parallel(i,j) = \frac{[1 + \chi(i,j)] \cdot I^\perp(i,j) - [1 - \chi(i,j)] \cdot I^\parallel(i,j)}{\gamma(i,j) + \chi(i,j)} \end{cases}. \quad (9)$$

从(9)式可以看出,分离后透射成分 I_T 和反射偏振度 γ 、透射偏振度 χ 有关,但是 γ 和 χ 对 I_T 的作用不同。由于 χ 仅处于分母位置,因此 χ 只会影响分离后透射成分 I_T 的强弱,不会改变透射成分局部区域的纹理和细节。而 γ 既位于分母位置,又位于分子位置,所以当 γ 不同时,分离得到的透射成分 I_T 不仅强度大小不同,局部纹理和细节也会不同。同理,分离后反射成分 I_R 也和反射偏振度 γ 、透射偏振度 χ 有关,但是 γ 只影响 I_R 的强弱,而 χ 不仅影响 I_R 的强弱,还会影响分离后反射图像局部区域的纹理和细节。

3 透明物体表面偏振信息的求解

通过第 2 节的分析可知,图像中各个像素点的

反射光成分和透射光成分由该点的反射光偏振度、透射光偏振度、垂直方向光强和平行方向光强共同决定。本节将利用不同起偏角下得到的偏振度图像对垂直方向光强和平行方向光强进行求解,然后结合物体表面法向量信息,得出各个像素点反射光偏振度和透射光偏振度的分布规律,从而为不同像素点处反射光和透射光的分离提供依据。

3.1 垂直方向和平行方向光强分量的求解

根据偏振光的表示形式^[14],偏振光在不同起偏角下的光强计算公式为

$$I_M(i,j) = \frac{I^\perp(i,j) + I^\parallel(i,j)}{2} + \frac{I^\perp(i,j) - I^\parallel(i,j)}{2} \cdot \cos 2[\phi_M(i,j) - \phi_\perp(i,j)], \quad (10)$$

式中, ϕ_M 为起偏角 ($M=0, 45, 90$), ϕ_{\perp} 为垂直入射面方向所对应的起偏角。

令初始起偏角 $\phi_0 = 0^\circ$, 将起偏角 ϕ_M 分别设置为 $\phi_0 = \phi_0, \phi_{45} = \phi_0 + 45^\circ, \phi_{90} = \phi_0 + 90^\circ$ 时, 获取相应的三通道偏振度图像 I_0, I_{45}, I_{90} , 将其分别代入 (10) 式^[15-16], 可求得

$$\phi_0 - \phi_{\perp}(i, j) = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{I_0(i, j) + I_{90}(i, j) - 2I_{45}(i, j)}{I_0(i, j) - I_{90}(i, j)} \right], \quad (11)$$

从而得到垂直方向光强 I^{\perp} 和平行方向光强 I^{\parallel} 分别为

$$I^{\perp}(i, j) = \frac{I_0(i, j) + I_{90}(i, j)}{2} + \frac{I_0(i, j) - I_{90}(i, j)}{2 \cos 2[\phi_0 - \phi_{\perp}(i, j)]}, \quad (12)$$

$$I^{\parallel}(i, j) = \frac{I_0(i, j) + I_{90}(i, j)}{2} - \frac{I_0(i, j) - I_{90}(i, j)}{2 \cos 2[\phi_0 - \phi_{\perp}(i, j)]}. \quad (13)$$

3.2 基于物体表面法向量的反射光偏振度和透射光偏振度的求解

由于透明物体表面反射光和透射光是同时存在且相互叠加的, 因此无法直接利用探测器分别获取反射光偏振度和透射光偏振度。本小节将基于相机

成像原理, 根据表面法向量信息, 通过求解图像中各个像素点处入射光线的观测角, 确定反射光偏振度和透射光偏振度的分布规律。

菲涅耳反射定律表明, 反射光偏振度和透射光偏振度的大小与物体表面观测角有关, 反射光偏振度^[17-18]为

$$\gamma = \left| \frac{R_{\perp}(\theta) - R_{\parallel}(\theta)}{R_{\perp}(\theta) + R_{\parallel}(\theta)} \right| = \frac{2 \sin \theta \cdot \tan \theta \cdot \sqrt{\sigma^2 - \sin^2 \theta}}{\sigma^2 - \sin^2 \theta + \sin^2 \theta \cdot \tan^2 \theta}, \quad (14)$$

式中, R_{\perp} 表示垂直方向上反射率, R_{\parallel} 表示平行方向上反射率。

透射光偏振度为

$$\chi = \left| \frac{R_{\perp}(\theta) - R_{\parallel}(\theta)}{2 - R_{\perp}(\theta) - R_{\parallel}(\theta)} \right| = \frac{(\sigma - 1/\sigma)^2 \sin^2 \theta}{2 + 2\sigma^2 - (\sigma + 1/\sigma)^2 \sin^2 \theta + 4 \cos \theta \cdot \sqrt{\sigma^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (15)$$

式中, σ 为折射率。

根据 (14) 式和 (15) 式对典型透明物体 (玻璃) 表面偏振度进行仿真实验, 结果如图 2 所示, 其中 S 为垂直方向, P 为平行方向。可以看出, 透射偏振度和反射偏振度的大小均随观测角的变化而变化。

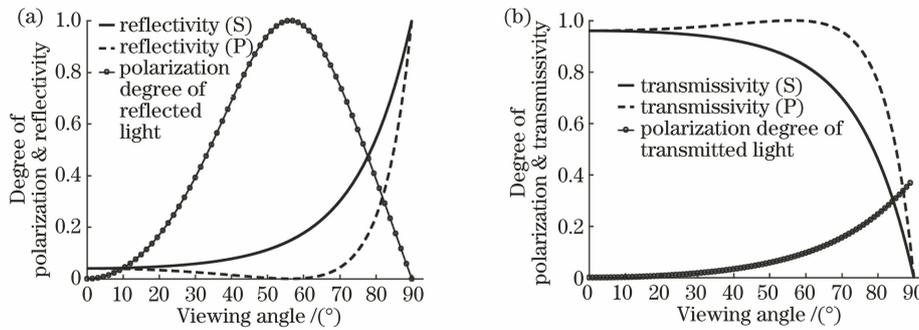


图 2 仿真结果。(a) 反射率及反射偏振度; (b) 透射率及透射偏振度

Fig. 2 Simulation results. (a) Reflectivity and polarization degree of reflected light; (b) transmissivity and polarization degree of transmitted light

在相机成像过程中, 由于图像中每个像素点处的入射方向是不同的, 因此透明物体表面上每一点处的入射光线与表面法向量的夹角是不同的, 即不同点处的观测角不同, 故不同像素点处的偏振度不同。

偏振度的大小不仅和表面法向量方向有关, 还与该点在成像平面上的坐标位置有关。为了求解图像中各个像素点处的偏振度, 假设物体表面为平面, 以相机光心为原点 o 、相机主光轴为 z 轴、像平面水平方向为 y 轴、像平面垂直方向为 x 轴建立三维坐

标系, 如图 3 所示。其中, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 分别表示玻璃表面上不同位置点的方位角, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别表示玻璃表面上不同位置点的观测角。

根据相机成像原理, 三维空间坐标系下物体表面任意一点 $c(x_c, y_c, z_c)$ 在像平面上对应的点为 $p(i, j)$, 两者之间的关系为

$$z_c \begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (16)$$

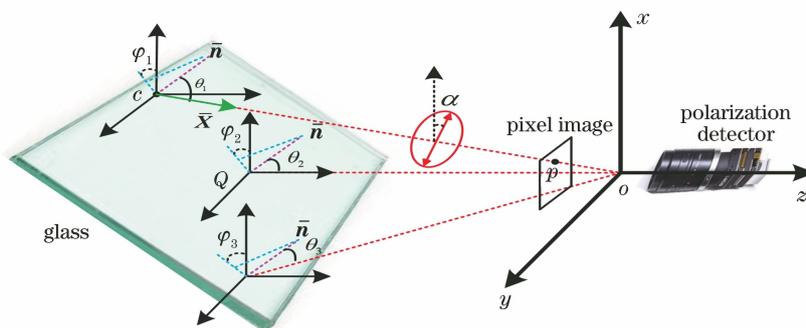


图 3 透明物体表面光波偏振状态的传输示意图

Fig. 3 Diagram of transmission of polarization state of light waves on surface of transparent object

式中, c_x, c_y 为相机主点坐标, f_x, f_y 为相机尺度因子。

因此, 可求得该点对应的入射光线向量为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = z_c \begin{bmatrix} (i - c_x)/f_x \\ (j - c_y)/f_y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由(17)式可以看出, 物体表面任意一点处的入射光线在三维空间坐标下的向量方向与深度信息无关。将 \mathbf{X} 转化为单位向量 $\bar{\mathbf{X}}$, 则 $\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{X} / \|\mathbf{X}\|$ 。

令物体表面法向量 $\bar{\mathbf{n}}$ 为

$$\bar{\mathbf{n}} = \begin{bmatrix} \sin \delta \cdot \cos \varphi \\ \sin \delta \cdot \sin \varphi \\ \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中, δ 为物体表面法向量天顶角, φ 为法向量方位角。则物体表面 c 点处的入射光线单位向量 $\bar{\mathbf{X}}$ 与表面法向量 $\bar{\mathbf{n}}$ 的夹角即该点的观测角 θ 为

$$\theta(i, j) = \arccos(\bar{\mathbf{n}} \cdot \bar{\mathbf{X}}). \quad (19)$$

从(19)式可以看出, 物体表面每点观测角 θ 的大小与该点的深度信息 z 无关, 只与玻璃表面法向量 $\bar{\mathbf{n}}$ 、相机内参 c_x, c_y, f_x, f_y 及像素坐标位置有关。根据(14)、(15)式可知, 物体表面每点处的反射偏振度

γ 和透射偏振度 χ 由 θ 和折射率共同决定, 由于折射率、相机内参、像素坐标位置都是已知量, 如果求出物体表面天顶角 δ 和方位角 φ , 便可求得图像中任意像素点处的偏振度大小。

4 基于归一化互相关最小化的反射光分离

物体表面法向量由方位角 φ 和天顶角 δ 决定, 本文主要关注的是玻璃等光滑且高透光的物体, 无法利用常规手段测量其表面法向量。因此, 本节将利用偏振信息对透明物体表面法向量进行求解, 并利用反射图像和透射图像之间的相关性, 实现反射光和透射光的分离。

4.1 物体表面法向量求解

4.1.1 方位角求解

根据偏振成像原理可知, 物体表面反射光偏振角(AoP)等于入射面方位角^[19-20], 表面中心点的方位角等于入射面方位角, 中心点如图 4 中 Q 点所示。因此, 可利用图像中心像素点的偏振角求解物体表面法向量方位角 φ 。单个像素点计算的偏振角不具有鲁棒性, 因此计算图像中心 $200 \text{ pixel} \times$

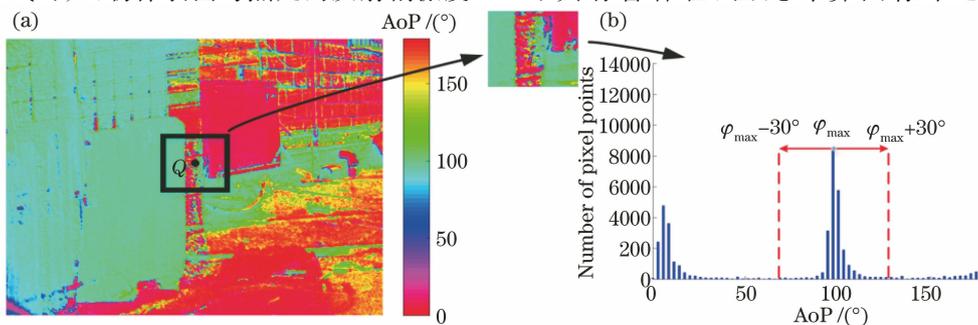


图 4 中心点处入射面方位角的求解过程。(a) 偏振角图像; (b) 偏振角图像中中心像素块的直方图

Fig. 4 Process of solving azimuth angle of incident plane at central point. (a) Image of polarization angles; (b) Histogram of central pixel block in image of polarization angles

200 pixel(偏振图像大小为 1024 pixel×1224 pixel)窗口内所有像素点的偏振角平均值并将其作为中心像素点的偏振角。由于偏振角存在二义性,当反射光强度和透射光强度不同时,偏振角可能存在 90°的变化。如果直接求取中心方框内像素点均值,可能会引起计算误差。此处采用直方图统计法,得到图像中心方框内灰度直方图最大值对应的偏振角 φ_{\max} ,并计算偏振角位于 $(\varphi_{\max} - 30^\circ) \sim (\varphi_{\max} + 30^\circ)$ 范围内偏振角的平均值 φ_{mean} ,然后将 φ_{mean} 转化到 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,从而确定物体表面法向量方位角 φ 为

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_{\text{mean}}, & 0^\circ < \varphi_{\text{mean}} \leq 45^\circ \\ \varphi_{\text{mean}} - 90^\circ, & 45^\circ < \varphi_{\text{mean}} \leq 135^\circ \\ \varphi_{\text{mean}} - 180^\circ, & 135^\circ < \varphi_{\text{mean}} \leq 180^\circ \end{cases} \quad (20)$$

4.1.2 天顶角求解

透明物体表面的反射和透射过程是同时发生的,因此不能直接利用偏振度求解透明物体表面法向量的天顶角 δ 。由于反射光和透射光包含不同的信息内容,在理想分离情况下得到的反射成分和透射成分具有最小的相关性。根据(9)式可知,利用反射光偏振度和透射光偏振度可以确定反射光分量和透射光分量,并且图像中每个像素点的反射光偏振度和透射光偏振度由表面法向量决定。在已知方位角的前提下,分离得到的反射光成分和透射光成分

只与天顶角 δ 有关。因此,尽管 δ 无法直接测量,但可以通过求解不同 δ 下分离得到的反射光成分和透射光成分的相关值,得到最小相关值对应的 δ ,从而实现反射光分离。

4.2 反射图像和透射图像的归一化互相关最小值计算

为了定量表示反射成分和透射成分之间的相关性,Schechner 等^[10]提出一种基于图像互信息的相关值计算方法。但是互信息体现的是图像全局信息,难以有效反映不同图像中对应像素点之间的相关性及局部纹理细节之间的关联。同时,图像中不同像素点的相关性随偏振度的变化规律是不同的,这会导致利用图像中所有点的相关值求解得到的偏振度和真实偏振度之间存在较大误差。为了更精确地表征反射图像和透射图像之间的相关性,提出一种基于 NCC 的反射成分和透射成分相关值的定量表示方法,并通过梯度下降法计算 NCC 最小值及其对应的物体表面法向量天顶角。

4.2.1 单个像素点的归一化互相关

NCC 通过对局部滑窗内的像素点进行归一化处理,消除反射光和透射光图像中强度信息的影响,具有较强的鲁棒性和抗干扰能力,能够准确反映两幅图像之间局部像素点之间的相关性。反射光和透射光图像中任意一像素点的 NCC 为 $R^{\delta,\varphi}(i,j)$:

$$R^{\delta,\varphi}(i,j) = \frac{\sum_{u=0}^U \sum_{v=0}^V |I_R^{\delta,\varphi}(i+u,j+v) - \bar{I}_R^{\delta,\varphi}(i,j)| \cdot |I_T^{\delta,\varphi}(i+u,j+v) - \bar{I}_T^{\delta,\varphi}(i,j)|}{\sqrt{\sum_{u=0}^U \sum_{v=0}^V |I_R^{\delta,\varphi}(i+u,j+v) - \bar{I}_R^{\delta,\varphi}(i,j)|^2 \cdot \sum_{u=0}^U \sum_{v=0}^V |I_T^{\delta,\varphi}(i+u,j+v) - \bar{I}_T^{\delta,\varphi}(i,j)|^2}} \quad (21)$$

式中, U 、 V 表示滑窗大小, u 、 v 表示像素点在窗口内的位置坐标, $I_R^{\delta,\varphi}$ 和 $I_T^{\delta,\varphi}$ 分别表示表面法向量方位角为 φ 、天顶角为 δ 时分离得到的反射光图像和透射光图像, $\bar{I}_R^{\delta,\varphi}$ 和 $\bar{I}_T^{\delta,\varphi}$ 分别表示分离后反射光图像和透射光图像在 $U \times V$ 窗口内的像素平均值。

4.2.2 相关曲线过零点像素点的提取

在相机获取的反射图像中,不同像素点分离得到的反射光成分和透射光成分之间的相关性随反射偏振度的变化规律是不同的。当透射偏振度恒定时,根据 NCC 值随反射偏振度变化的不同范围,可以将混合图像中的像素点大致分为两类:一类是 NCC 曲线过零点的像素点,另一类是 NCC 曲线不

过零点的像素点。

图 5(a)和图 5(b)分别是真实世界中获取的可见光图像,图 5(c)和图 5(d)是按照文献[10]中的方法仿真得到的垂直方向和平行方向的偏振图像。图 6(a)~(c)分别是当透射偏振度 χ 为 0.2,反射偏振度 γ 分别为 0.2、0.4、0.8 时,分离得到的透射光图像和反射光图像。图 6 中 P_1 点分离后透射光成分和反射光成分的 NCC 值随反射偏振度变化的曲线如图 7(a)所示,可以看出,当反射偏振度在 0~1 范围内变化时,分离后透射光成分和反射光成分之间的 NCC 值的变化幅度较小,相关曲线未过零点。图 6 中 P_2 点 NCC 值随反射偏振度变化的曲

线如图 7(b) 所示,可以看出,当反射偏振度在 0~1 范围内变化时,分离后透射光成分和反射光成分之间的 NCC 值的变化幅度较大。这是由于当偏振度较小时,该点会发生反射光的过分离,光强被过多地分离到反射光图像上,分离后透射光成分和反射光成分之间呈现负相关,相关值接近 -1;当偏振度较大时,该点发生反射光的欠分离,此时

分离得到的反射光成分小于实际反射光成分,分离后的透射光成分中依旧含有较多反射光成分,因此两者之间呈现较强的相关性,相关值接近 1。由于 NCC 在反射光从过分离到欠分离的过程中从负值变为正值,因此相关曲线经过零点,且零点处对应的透射光成分和反射光成分的最佳分离效果最佳。



图 5 反射光场景。(a)透射光图像;(b)反射光图像;(c)垂直方向偏振图像;(d)平行方向偏振图像
Fig. 5 Reflected light scenes. (a) Transmitted light image; (b) reflected light image; (c) polarization image in vertical direction; (d) polarization image in parallel direction

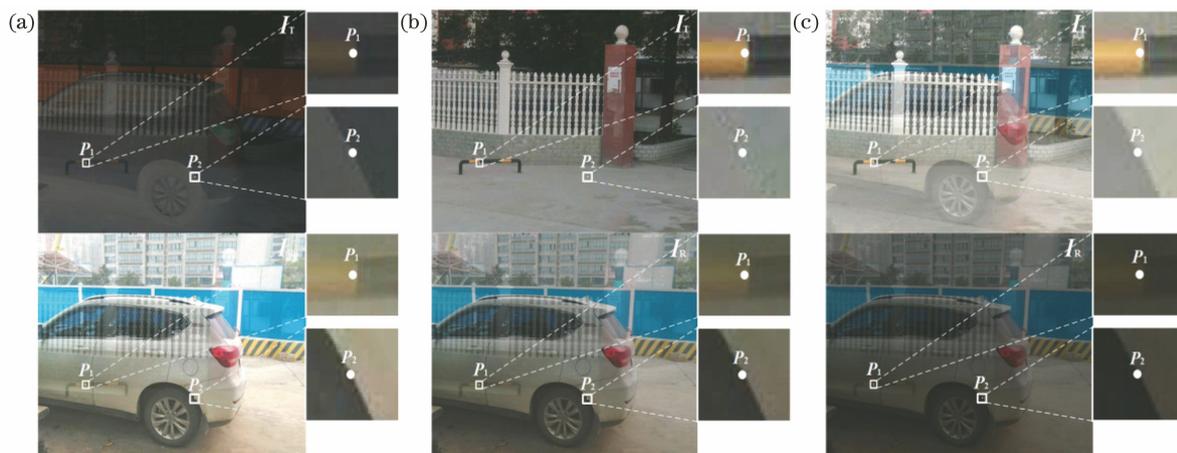


图 6 $\chi=0.2, \gamma=0.2, 0.4, 0.8$ 时的反射光分离结果。(a) $\gamma=0.2$; (b) $\gamma=0.4$; (c) $\gamma=0.8$
Fig. 6 Reflected light separation results when $\chi=0.2$ and $\gamma=0.2, 0.4, 0.8$. (a) $\gamma=0.2$; (b) $\gamma=0.4$; (c) $\gamma=0.8$

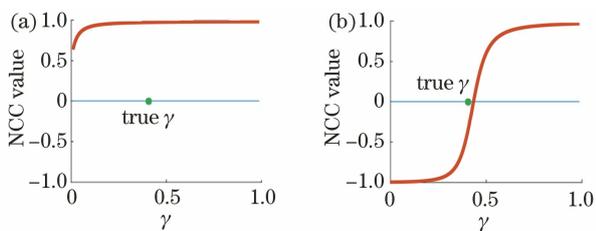


图 7 不同 γ 下的 NCC 曲线。(a) P_1 点 NCC 曲线;
(b) P_2 点 NCC 曲线
Fig. 7 NCC curves in different γ . (a) NCC curve of point P_1 ; (b) NCC curve of point P_2

当反射偏振度在 0~1 之间变化时,相关曲线上未过零点的像素点的 NCC 绝对值的最小值并没有减小到 0,这意味着该类点分离后的反射光成分和透射光成分一直存在较强的相关性,因此该类像素点最小互相关值所对应的偏振度值和实际偏振度值

之间的差别较大,不能利用该类像素点的 NCC 最小值求解透明物体表面观测角。而相关性曲线过零点的像素点在 NCC 值为零处实现了反射光和透射光的最佳分离,因此通过提取图像中过零点的像素点,并计算其 NCC 绝对值最小值及其对应的反射偏振度,能够实现观测角的有效求解。

由(9)式可知,当透射偏振度恒定,反射偏振度为 0~1 时,分离得到的反射光图像只存在强度变化,其纹理和细节是不变的。在过分离和欠分离过程中,反射光成分和透射光成分的 NCC 值发生了正负变化,这是由于过分离得到的透射光成分和欠分离得到的透射光成分之间的相关性小于 0。为了快速提取图像中过零点的像素点,先计算过分离和欠分离得到的透射光图像之间的 NCC 值,然后根据互相关值的大小对过零点的像素点进行提取。具

体步骤如下。首先,设置反射偏振度 $\gamma=0$,透射偏振度 $\chi=0.2$,对混合图像进行过分离,得到过分离后的透射光图像 $I_{\text{over-t}}$ 。对于透射偏振度 χ ,从图 2(b)中仿真结果可以看出,其变化范围为 $0\sim 0.4$,选取中值 0.2 作为 χ 的值进行欠分离和过分离求解;由(9)式可知, χ 只会影响分离后透射光图像的强弱,并不会改变分离后透射光图像的纹理和细节,无论 χ 选取 0.1 还是 0.4 ,对欠分离和过分离得到的透射光图像之间的相关性影响并不大,因此设置 χ 为 0.2 是合理的。然后,选取 $\gamma=1, \chi=0.2$,对混合图像进行欠分离,得到欠分离后的透射光图像 $I_{\text{under-t}}$,进而求取 $I_{\text{over-t}}$ 和 $I_{\text{under-t}}$ 之间的 NCC 值,得到相关图像 R_t 。 R_t 中每点的取值范围是 $-1\sim 1$, $R_t(i, j) > 0$ 表明该点在反射偏振度较小时分离得到的透射光成分和反射偏振度较大时分离得到的透射光成分之间的相关性差异不大,不属于相关曲线过零点的像素点; $R_t(i, j) < 0$ 表明该点在反射偏振度较小时分离得到的透射光成分和反射偏振度较大时分离得到的透射光成分之间的相关性差异较大,属于相关曲线过零点的像素点。 $R_t(i, j)$ 的值越接近 1 ,表明该点在反射偏振度为 $0\sim 1$ 时,分离得到的反射光成分和透射光成分之间的 NCC 值的变化范围越小;反之, $R_t(i, j)$ 的值越接近 -1 ,表明分离得到的反射光成分和透射光成分之间的 NCC 值的变化范围越大,该点的相关性更能反映反射偏振度的变化规律。考虑到部分噪点也存在过零点现象,为了增强反射光分离的鲁棒性,通过设置一个小于 0 的阈值 m_{thred} ,对相关性图像 R_t 进行二值化处理,从而实现相关过零点的像素点的提取, R_t 二值化后的结果 M_t 的表达式为

$$M_t(i, j) = \begin{cases} 0, & R_t(i, j) \geq m_{\text{thred}} \\ 1, & R_t(i, j) < m_{\text{thred}} \end{cases} \quad (22)$$

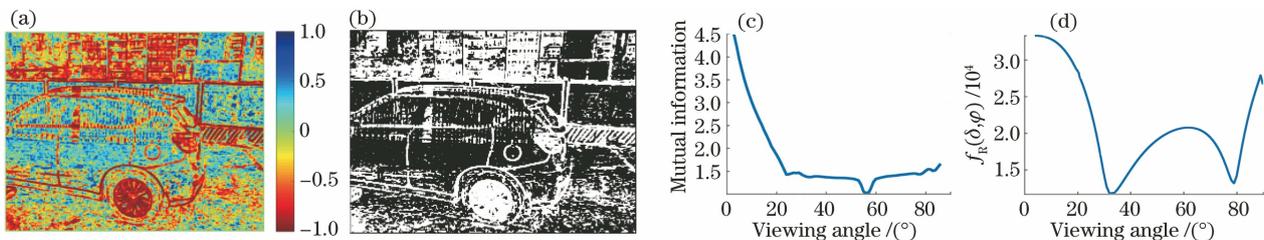


图 8 过零点的像素点的提取及相关值随观测角变化的曲线。(a)过分离和欠分离透射光图像间的 NCC 值所对应的相关图像; (b)过零点的像素点提取结果;(c)互信息随观测角变化的曲线;(d) $f_R(\delta, \varphi)$ 随观测角变化的曲线

Fig. 8 Extraction of zero-crossing pixels and variation curves of correlation value with viewing angle. (a) NCC between over-separated transmitted light image and under-separated transmitted light image; (b) extraction result of zero-crossing pixels; (c) variation curve of mutual information with viewing angle; (d) $f_R(\delta, \varphi)$ versus viewing angle

图 8(a)是过分离透射光图像($\gamma=0, \chi=0.2$)和欠分离透射光图像($\gamma=1, \chi=0.2$)之间 NCC 值所对应的相关图像 R_t 。图 8(b)是设置阈值 $m_{\text{thred}} = -0.3$ 时,对 R_t 进行二值化处理得到的过零点的像素点 M_t ,可以看出,过零点的像素点主要分布在反射景物的边缘、轮廓等区域。这是因为这些区域内的像素点反射成分变化较大,不同像素点之间的反射偏振度差异较大,在反射偏振度为 $0\sim 1$ 时,易发生过分离和欠分离现象,所以 NCC 变化范围较大,相关曲线经过零点。利用过零点的像素点求取反射光图像和透射光图像 NCC 值之和 $f_R(\delta, \varphi)$:

$$f_R(\delta, \varphi) = \sum_{i=0}^h \sum_{j=0}^w |R^{\delta, \varphi}(i, j) \cdot M_t(i, j)|, \quad (23)$$

式中, h, w 分别表示图像的行数和列数。

采用上述提取相关曲线过零点的像素点的方法,能够有效抑制噪声,显著提升反射偏振度的判断精度,从而准确得到透明物体表面反射光观测角的真实值。

图 8(c)是利用文献[10]中方法计算得到的反射光图像和透射光图像的全局互信息随观测角变化的曲线。互信息利用的是图像中所有像素点的相关值,但是图像中大多数像素点的相关曲线并不过零点,因此这会对反射偏振度的判断造成干扰,导致互信息最小值处得到的观测角(56.7°)和真实值(30°)之间的差别较大。图 8(d)是提取得到的所有过零点像素点的 NCC 值之和随观测角的变化规律,可以看出,图像中过零点像素点的 NCC 值之和能够真实反映分离后透射光图像和反射光图像之间的相关性随反射偏振度的变化规律,其最小值对应的观测角(31.9°)十分接近真实值。

4.2.3 梯度下降算法求解互相关最小值

通过(19)式可知,物体表面每点处的观测角与天顶角 δ 、法向量方位角 φ 有关。由于法向量方位角 φ 是已知量, $f_R(\delta, \varphi)$ 只和天顶角 δ 有关。从图 2(a)可以看出,反射偏振度随观测角的增大呈现先增大后减小的趋势。因此天顶角 δ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时, $f_R(\delta, \varphi)$ 可能存在局部极小值。如果直接使用梯度下降算法求解 $f_R(\delta, \varphi)$ 最小值, $f_R(\delta, \varphi)$ 可能收敛到局部极小值。为了使 $f_R(\delta, \varphi)$ 收敛到全局最小值,采用等间隔全局搜索的方法,将 δ 的初始点设置在全局最小值附近,然后再利用梯度下降算法求解全局最小值。首先设置初始天顶角 $\delta^0 = 0^\circ$, 然后在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内每间隔 2° 选取第 n 个天顶角 δ^n , 即 $\delta^n = \delta^0 + n \cdot \Delta\delta$, $\Delta\delta = 2^\circ$, 利用 δ^n 和 φ 求出各个像素点的反射光偏振度和透射光偏振度,并

利用(9)式分离得到透射光图像和反射光图像,计算两者之间的 $f_R(\delta^n, \varphi)$ 。通过比较不同天顶角下获取的 $f_R(\delta^n, \varphi)$, 可得到距离全局最小值最近的天顶角 $\hat{\delta}_{\min}$ 。获取全局最小值附近的天顶角 $\hat{\delta}_{\min}$ 之后,以 $\hat{\delta}_{\min}$ 为起始点,对 $f_R(\delta, \varphi)$ 进行求导,使其沿着梯度的方向下降,从而获取 $f_R(\delta, \varphi)$ 的全局最小值,即

$$\delta^{m+1} = \delta^m - \eta \cdot \frac{\partial f_R(\delta^m)}{\partial \delta}, \quad (24)$$

式中, η 是学习率, m 是当前迭代次数。当满足收敛条件[达到最大迭代次数 M 或者 $f_R(\delta^{m+1}, \varphi)$ 和 $f_R(\delta^m, \varphi)$ 的差值小于一定阈值]时,迭代结束,得到最小值 $f_R(\delta_{\min}, \varphi)$ 以及该点对应的天顶角 δ_{\min} , 从而实现反射光和透射光的最优分离,其流程图如图 9 所示。

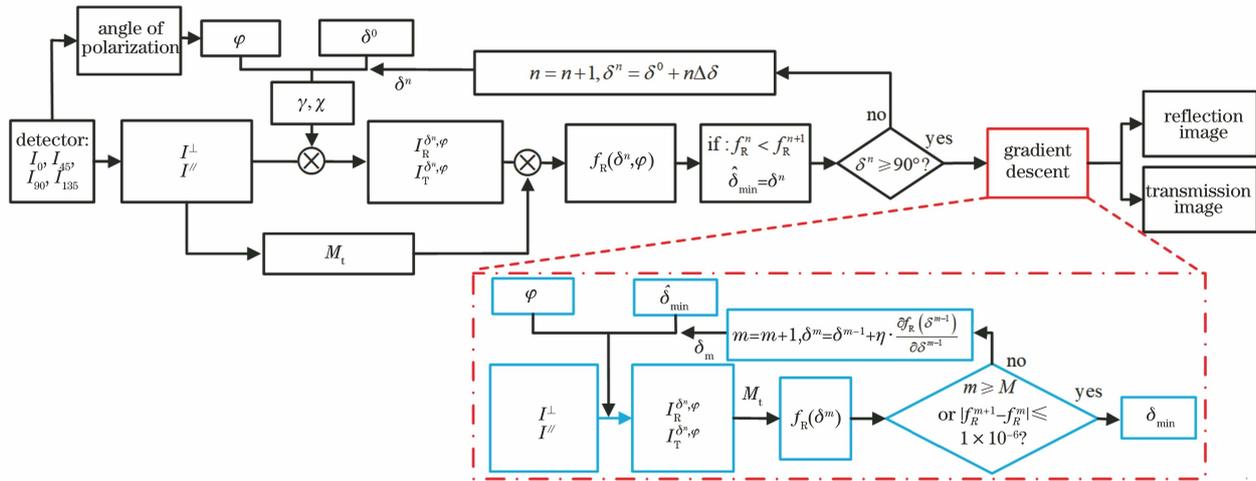


图 9 所提算法的流程图

Fig. 9 Flow diagram of proposed algorithm

5 实验结果与分析

5.1 数据获取

为了测试所提算法的反射光分离效果,利用偏振探测器、玻璃等器材获取了室内和室外真实世界中的反射光图像。数据获取方式如图 10 所示。首先,利用玻璃和偏振探测器获取真实世界中反射光和透射光的混合图像。然后,取走玻璃,获取背景图像,即真实透射光图像,并将其作为去除反射后的真实值,用于对比、评价所提算法的分离效果。

5.2 反射光分离结果分析

图 11 和图 12 是利用探测器分别获取的真实世界中室内及室外的玻璃表面反射图像。其中,图 11(a)和图 12(a)是未放置玻璃时获取的背景图

像,图 11(b)~(e)和图 12(b)~(e)分别是在分焦平面偏振探测器前放置玻璃后获取的 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四通道反射光偏振图像^[21-22]。从分焦平面偏振图像中可以看出,受观测角的影响,不同像素点具有不同的偏振特征。对于图 11(b)~(e)中虚线方框内像素点,该区域入射光观测角处于布儒斯特角附近,反射光在入射面平行方向上的强度近似为 0;而对于图 11(b)~(e)中实线方框内像素点,该区域入射光观测角远离布儒斯特角,反射光在不同起偏角下的变化并不明显。图 11(f)、图 12(f)和图 11(g)、图 12(g)分别是计算得到的入射面平行方向光强图像和垂直方向光强图像,可以看出,在平行方向上反射分量最弱,在垂直方向上反射分量最强。

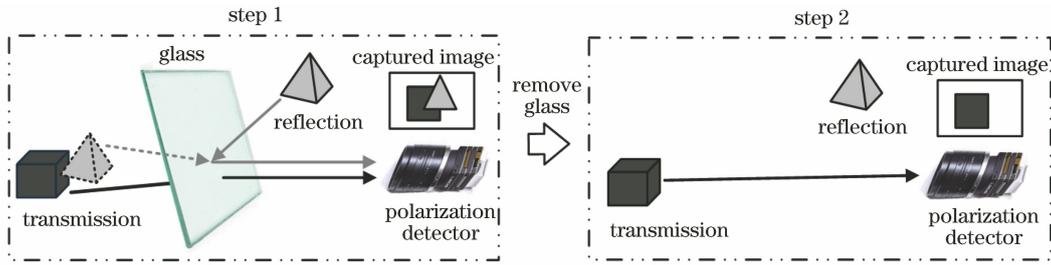


图 10 反射光数据采集示意图

Fig. 10 Schematic diagram of reflected light data collection

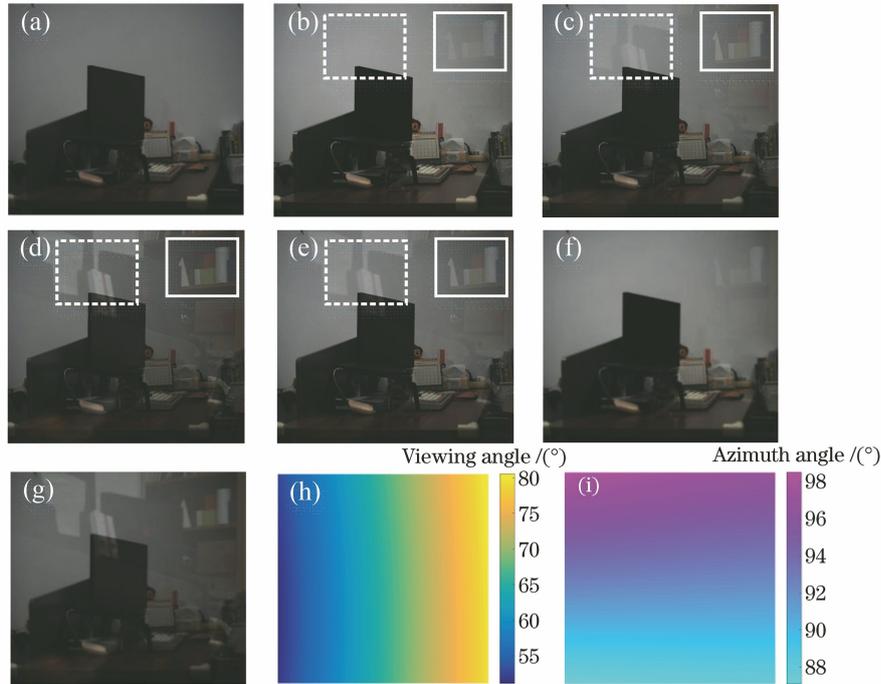


图 11 室内场景偏振图像。(a)真实透射光图像;(b) 0°偏振图像;(c) 45°偏振图像;(d) 90°偏振图像;(e) 135°偏振图像;(f)平行方向偏振图像;(g)垂直方向偏振图像;(h)观测角图像;(i)方位角图像

Fig. 11 Polarization images of indoor scene. (a) True transmitted light image; (b) 0° polarization image; (c) 45° polarization image; (d) 90° polarization image; (e) 135° polarization image; (f) polarization image in parallel direction; (g) polarization image in vertical direction; (h) viewing angle image; (i) azimuth angle image

图 11(h)和图 12(h)是求解得到的反射光图像和透射光图像相关最小时各像素点入射光线与玻璃表面法向量的夹角图像,图 11(i)和图 12(i)是入射面方位角图像。结果表明,不同像素点处反射光观测角及入射面方位角不同是导致图像中不同位置处反射光偏振度和透射光偏振度不同的根本原因。

图 13 和图 14 是利用不同算法得到的反射光分离结果。图 13(a)和图 14(b)是所提算法的分离结果。该算法利用反射光和透射光在平行方向和垂直方向的分布特征,结合反射光偏振度和透射光偏振度,实现了不同场景下反射光的有效分离。从视觉效果上看,所提算法分离后的透射光图像和真实背景图像十分接近,无论是强光反射

区域还是弱光反射区域,反射光都得到了有效分离和去除;同时从所提算法分离得到的反射光图像中可以看出,分离后反射光图像的细节、纹理都得到了较好提取和保存。为了综合评估所提算法的分离效果,将所提算法与现有反射光分离算法进行了对比。图 13(b)和图 14(b)是文献[2]中算法的分离结果,该算法将光强最小值作为透射光成分,将最大值和最小值之差作为反射光成分。最小光强值并非完全是透射光成分,还含有部分反射光成分,因此该方法难以实现反射光的完全分离。图 13(c)和图 14(c)是文献[10]提出的基于观测角估计的反射光分离算法的分离结果,图 13(d)和图 14(d)是文献[11]提出的结合独立成分分

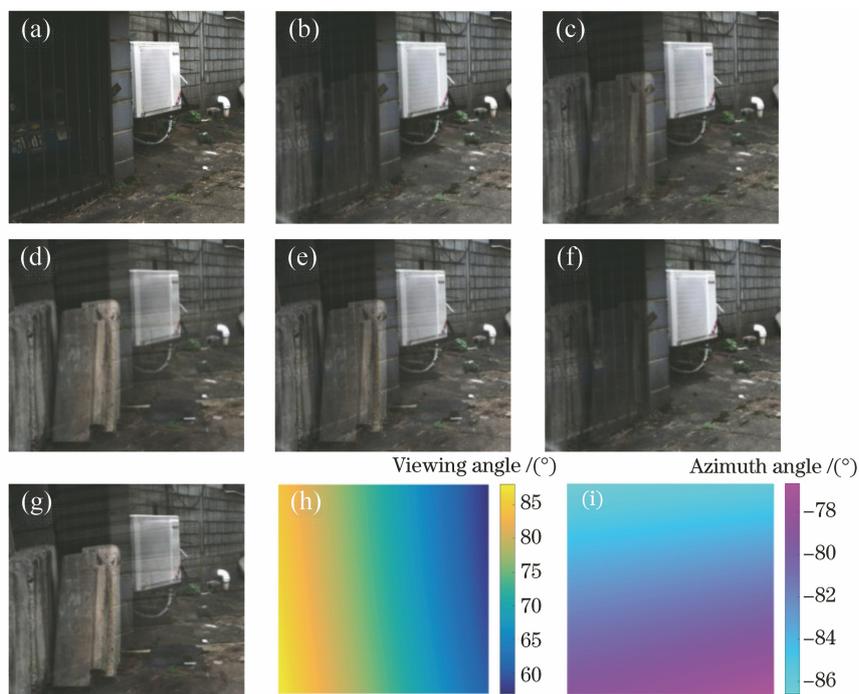


图 12 室外场景偏振图像。(a)真实透射光图像;(b) 0°偏振图像;(c) 45°偏振图像;(d) 90°偏振图像;(e) 135°偏振图像;(f)平行方向偏振图像;(g)垂直方向偏振图像;(h)观测角图像;(i)方位角图像

Fig. 12 Polarization images of outdoor scene. (a) True transmitted light image; (b) 0° polarization image; (c) 45° polarization image; (d) 90° polarization image; (e) 135° polarization image; (f) polarization image in parallel direction; (g) polarization image in vertical direction; (h) viewing angle image; (i) azimuth angle image

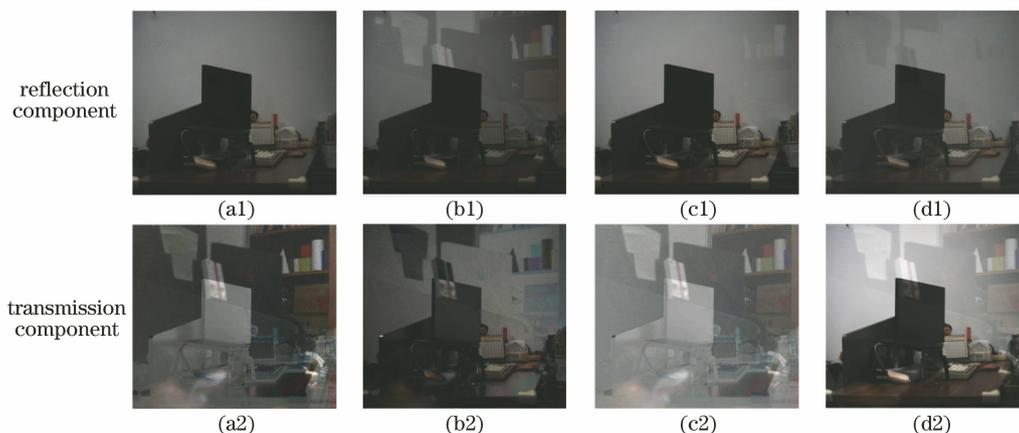


图 13 室内场景反射光分离结果。(a1)(a2)提出的算法;(b1)(b2)文献[2]中的算法;(c1)(c2)文献[10]中的算法;(d1)(d2)文献[11]中的算法

Fig. 13 Reflected light separation results of indoor scene. (a1)(a2) Proposed algorithm; (b1)(b2) algorithm in Ref. [2]; (c1)(c2) algorithm in Ref. [10]; (d1)(d2) algorithm in Ref. [11]

析和偏振特征的反射光分离算法的分离结果,可以看出,由于文献[10]和文献[11]这两种方法都没有考虑入射光和玻璃表面法向量之间夹角的空域变化特征,因此不能同时实现图像中不同位置处反射光和透射光的有效分离。

通过对比上述分离结果可以看出,由于所提算

法基于反射光和透射光的相互作用,利用反射光和透射光在垂直方向和平行方向上的光强分布关系,并结合表面法向量,充分利用反射光偏振度和透射光偏振度在不同像素点上的空域变化特征来实现图像中所有像素点处反射成分和透射成分的分离,分离效果优于目前现有算法。

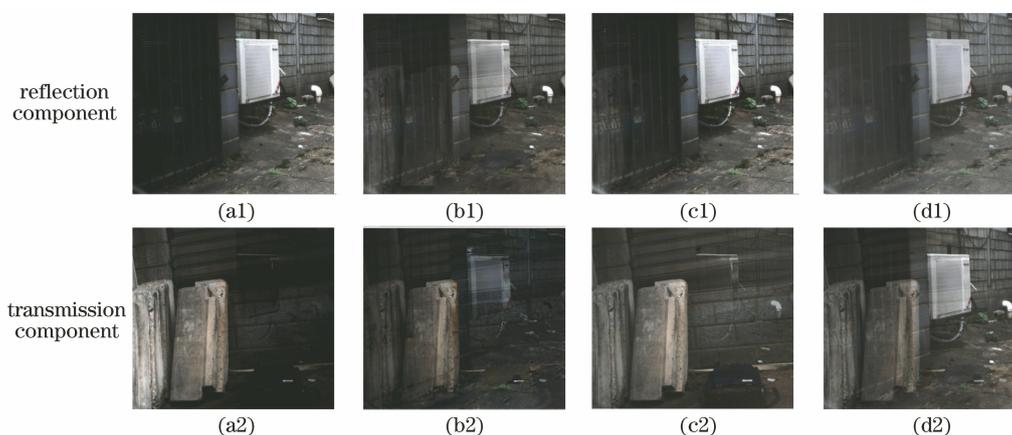


图 14 室外场景反射光分离结果。(a1)(a2)提出的算法;(b1)(b2)文献[2]中的算法;
(c1)(c2)文献[10]中的算法;(d1)(d2)文献[11]中的算法

Fig. 14 Reflected light separation results of outdoor scene. (a1)(a2) Proposed algorithm; (b1)(b2) algorithm in Ref. [2]; (c1)(c2) algorithm in Ref. [10]; (d1)(d2) algorithm in Ref. [11]

5.3 定量比较

为了定量比较上述各种算法的反射光分离效果,通过结构相似性(SSIM)、峰值信噪比(PSNR)这两个常用的图像相关性评价指标对上述三种方法下分离后的透射光图像和真实图像进行比较,对比结

果如表 1 所示。可以看出,相对于其他算法,所提算法的 SSIM、PSNR 都是最高的,表明所提算法下反射光分离后的图像与真实图像更为接近,反射光分离效果更好。

表 1 不同方法下反射光分离效果定量比较

Table 1 Quantitative comparison of separation effects of reflected light under different methods

Scene	Evaluation index	Ours	Algorithm in Ref. [2]	Algorithm in Ref. [10]	Algorithm in Ref. [11]
Indoor scene	SSIM	0.9033	0.8298	0.8976	0.8256
	PSNR	24.1595	17.7857	20.4899	20.7342
Outdoor scene	SSIM	0.7995	0.6865	0.7498	0.6168
	PSNR	21.3365	19.5287	18.9528	15.7089

6 结 论

物体表面反射光和透射光都属于偏振光,且两者之间的偏振特征存在明显差异。在对透明物体表面反射光和透射光偏振特征分析的基础上,基于反射光和透射光相互作用的特点,利用反射光和透射光在垂直方向和平行方向上的光强分布关系,采用偏振正交分解的方法,通过反射偏振度和透射偏振度求解得到反射光成分和透射光成分。由于图像中每个像素点的入射方向是不同的,因此图像中反射光偏振度和透射光偏振度具有空域变化的特点。根据相机成像原理,结合表面法向量,分析了物体表面不同位置上入射光线观测角的变化规律,并根据观测角得出图像中各个像素点的反射光偏振度和透射光偏振度。最后,利用物体表面法向量方位角和偏振角的关系,通过偏振角图像中心区域平均值确定了法向量方位角,并基于反

射光图像和透射光图像之间的相关性,利用梯度下降算法得到反射光图像和透射光图像的最小 NCC 值所对应的天顶角,最终实现反射光的分离。实验结果表明,所提算法能够实现不同场景、不同观测角度下透明物体表面反射光的分离,分离效果优于目前常用算法。

参 考 文 献

- [1] Ye K T, Ji' E M S, Zhai S J. Influence of particle shape on polarization characteristics of backscattering light in turbid media[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0105004.
叶坤涛, 吉俄木沙, 翟盛杰. 粒子形态对浑浊介质后向散射光偏振特性的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0105004.
- [2] Ohnishi N, Kumaki K, Yamamura T, et al. Separating real and virtual objects from their overlapping images [M] // Buxton B, Cipolla R. Computer vision-ECCV '96. Lecture notes in

- computer science. Heidelberg: Springer, 1996, 1065: 636-646.
- [3] Li Y, Brown M S. Single image layer separation using relative smoothness[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 2752-2759.
- [4] Shih Y C, Krishnan D, Durand F, et al. Reflection removal using ghosting cues [C] // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 3193-3201.
- [5] Liang J, Ju H J, Zhang W F, et al. Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0400001.
梁健, 巨海娟, 张文飞, 等. 偏振光学成像去雾技术综述[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0400001.
- [6] Chen W, Qiao Y L, Sun X B, et al. Method for water surface sun glint suppression based on polarized radiation image fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0529001.
陈卫, 乔延利, 孙晓兵, 等. 基于偏振辐射图融合的水面太阳耀光抑制方法[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0529001.
- [7] Wolff L B, Boulton T E. Constraining object features using a polarization reflectance model [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(7): 635-657.
- [8] Wolff L B. Polarization-based material classification from specular reflection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(11): 1059-1071.
- [9] Wolff L B. Using polarization to separate reflection components [C] // Proceedings CVPR '89: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 4-8, 1989, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 1989: 363-369.
- [10] Schechner Y Y, Shamir J, Kiryati N. Polarization and statistical analysis of scenes containing a semireflector[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2000, 17(2): 276-284.
- [11] Farid H, Adelson E H. Separating reflections and lighting using independent component analysis [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 1(9): 262-267.
- [12] Cui Z P, Gu J W, Shi B X, et al. Polarimetric multi-view stereo[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 369-378.
- [13] Kadambi A, Taamazyan V, Shi B X, et al. Polarized 3D: high-quality depth sensing with polarization cues [C] // 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), December 7-13, 2015, Santiago, Chile. New York: IEEE Press, 2015: 3370-3378.
- [14] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Long-wave infrared polarization feature extraction and image fusion based on the orthogonality difference method[J]. Journal of Electronic Imaging, 2018, 27(2): 023021.
- [15] Li N, Zhao Y Q, Pan Q, et al. Removal of reflections in LWIR image with polarization characteristics[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16488-16504.
- [16] Kong N, Tai Y W, Shin S Y. High-quality reflection separation using polarized images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(12): 3393-3405.
- [17] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Enhancement of dim targets in a sea background based on long-wave infrared polarisation features [J]. IET Image Processing, 2018, 12(11): 2042-2050.
- [18] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Study and modeling of infrared polarization characteristics based on sea scene in long wave band[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(5): 586-594.
张景华, 张焱, 石志广. 基于长波红外的海面场景偏振特性分析与建模[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(5): 586-594.
- [19] Yang J H, Di X, Yue C M, et al. Polarization analysis on reflected light and three-dimensional measurement of object shape[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2115-2119.
杨进华, 邸旭, 岳春敏, 等. 反射光偏振特性分析与物体形状的测量[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2115-2119.
- [20] Ping X X, Liu Y, Dong X M, et al. 3-D reconstruction of textureless and high-reflective target by polarization and binocular stereo vision [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(4): 432-438.
平茜茜, 刘勇, 董欣明, 等. 基于偏振双目视觉的无纹理高反光目标三维重构[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(4): 432-438.
- [21] Zhang W F, Ren L Y, Xing F, et al. Novel polarimetric dehazing method using discrete cosine transform based Laplacian pyramid [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 061102.
张文飞, 任立勇, 邢飞, 等. 基于离散余弦变换金字塔分解的新型偏振光学去雾技术[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 061102.
- [22] Zhao F, Cheng X M, Feng B, et al. Comparison research of interpolation algorithms for division of focal plane polarization image [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161014.
赵峰, 程喜萌, 冯斌, 等. 分焦平面偏振图像插值算法的比较研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161014.