

基于漫反射光偏振特性的三维成像技术研究进展

刘飞^{1,2}, 闫明宇^{1,4}, 李轩¹, 韩平丽^{1,2,3}, 刘严严⁴, 邵晓鹏^{1,2*}

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

²西安市计算成像重点实验室, 陕西 西安 710071;

³中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610000;

⁴光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308

摘要 在光电探测领域, 偏振特性能够有效反演物体表面材料特性、物体表面三维形貌信息, 因此备受关注。而利用漫反射偏振特性求解三维形貌时, 物体表面法线的天顶角信息与偏振度一一对应, 使得其在复杂光照场景中应用广泛。结合物体表面反射光波的类型及其偏振特性模型, 系统分析了漫反射偏振三维成像技术的原理, 并对漫反射偏振三维成像技术现有的研究进展以及对该技术现有基础与未来发展方向进行了详细阐述。

关键词 成像系统; 偏振特性; 漫反射; 三维成像; 法线多值性校正

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811015

Advances in Diffused Polarization-Based Three-Dimensional Imaging Technology

Liu Fei^{1,2}, Yan Mingyu^{1,4}, Li Xuan¹, Han Pingli^{1,2,3}, Liu Yanyan⁴, Shao Xiaopeng^{1,2*}

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

³Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610000, China;

⁴Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China

Abstract Polarization property has attracted much attention because it can be used for the inversion of the material characteristics and the three-dimensional morphology information of the object surface in the field of photoelectric detection. However, when using the diffuse reflection polarization property to solve the three-dimensional morphology, the zenith angle information of the surface normal and the degree of polarization have the one-to-one correspondence, which makes it widely applicable in complex lighting scenes. In this paper, we systematically analyzed the principle of diffuse reflection polarization three-dimensional imaging technology via the type of reflected light wave and its polarization characteristic model. Meanwhile, we described in detail about the current research progress of diffuse reflection polarization three-dimensional imaging technology, the existing foundation of the technology, and the future development direction.

Key words imaging systems; polarization characteristic; diffuse reflection; three-dimensional imaging; normal multi-value correction

OCIS codes 110.5405; 260.5430

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-07-16; 录用日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(62075175, 62005203)、中央高校基本科研业务费(XJS190502, XJS200505, RW200145)、中国科学院光束控制重点实验室基金项目(QC20191097)、光电信息控制和安全技术重点实验室基金项目(61421070203)

通信作者: *xpshao@xidian.edu.cn

1 引言

随着现代光电成像和探测技术的飞速发展,以捕捉光强信息为特点的传统成像技术无法继续满足人类探索世界的需求,三维成像技术应运而生^[1-4]。在计算机视觉领域中,三维成像技术是指利用单视觉或者多视觉的二维图像恢复空间物体三维形状特征的技术^[5-9]。三维成像技术成像速度快、精度高,已广泛应用于军事、深空探测、无人驾驶、虚拟现实、医疗检测、信息安全和手机支付等领域^[10-12]。

按照成像原理区分,三维成像技术可以分为主动式三维成像技术和被动式三维成像技术两种类型^[13-14]。其中,主动式三维成像技术主要是利用成像系统自带光源照明下采集的光场图像进行三维重建,被动式三维成像技术主要利用自然光照明下采集的光场图像进行三维重建^[15]。典型的主动式三维成像技术包括激光雷达三维成像、时间飞行法(TOF)、结构光三维成像等。其中,激光雷达三维成像技术采用雷达对目标表面进行激光测距,该方法因具有抗干扰能力强的优势被广泛用于机载、星载等不同的领域,但该方法仍存在受大视场场景的限制^[16-18]、成像精度与成像距离成反比的问题;时间飞行法通过计算物体表面各点接收到光信号的飞行时间来获取其形貌特征,但测量精确度较低^[19];结构光三维成像技术通过分析相机显示屏上带有形变的结构光图样来提取待测物体表面的三维形貌,该方法具有测量速度极大、成像精度高的特点,在三维打印、虚拟现实等领域发挥重要作用,然而,该方法易受环境光干扰,且受成像距离限制严重^[20];典型的被动式三维成像技术有立体视觉、偏振三维成像技术等。其中,立体视觉成像技术结合物体不同视角的图片,通过分析同一物体在不同角度图片中的相关信息解析其三维形状,该技术的成像范围较大,并以其非接触、实时性强、信息量丰富的特点在智能机器人和无人驾驶领域中得到广泛应用,但是该方法受系统参数影响严重,在远距离检测中精度较低^[21-22];偏振三维成像技术通过分析光波的偏振特性与空间物体表面的三维形貌特征之间的映射关系,利用光波的偏振信息,实现了对空间物体三维形貌特征的高精度恢复。在该方法中,重建物体表面的深度分辨率仅与其在二维空间中的空间分辨率有关。在保持二维空间分辨率不变的情况下,物体的重建精度可以保持不变。因此,该方法能恢复丰富的细节纹理信息、成像设备简单、性价比高、可实现

远距离下的高精度成像,在计算机视觉领域得到蓬勃发展^[23-25]。

根据反射光组成成分的不同^[26],偏振三维成像技术又可分为基于镜面反射的偏振三维成像(SFSP)技术和基于漫反射的偏振三维成像(SFDP)技术。基于镜面反射的偏振三维成像技术利用物体表面反射光中镜面反射成分的强偏振特性来对物体的三维形貌进行恢复,但该方法仅适用于金属、透明玻璃等光滑物体表面,且镜面反射光对光源的方向具有强依赖性,在实验中不易捕捉到全局的镜面反射光^[27-29];此外,基于镜面反射的偏振三维成像技术存在对天顶角求解的不确定性问题,导致重建物体表面时出现误差。基于漫反射的偏振三维成像技术则利用物体表面反射光中漫反射成分的弱偏振特性来实现三维形状测量,该技术对光源条件的要求较低,且漫反射光的偏振度与天顶角是一一对应的,该技术有力地解决了天顶角的不确定性问题^[30-31]。然而,基于漫反射的偏振三维成像技术在对方位角的解译过程中存在多值性模糊问题^[32-33],因此,多年来国内外研究人员致力于解决漫反射偏振三维成像技术中的方位角模糊问题。

本文从 Fresnel 公式出发,详细阐释了基于漫反射的偏振三维成像技术的基本原理,对漫反射偏振三维成像模型和成像过程中方位角多值性等问题进行了综述分析,最后对漫反射偏振三维成像技术现存的问题和发展方向进行总结和展望。

2 漫反射偏振三维成像原理

2.1 光波的偏振反射模型

根据 Wolff 等^[26]所提出的多种不同物体表面反射光成分分析模型,物体表面的漫反射光是入射光经过物体表面进入物体内部并由内部微粒散射后再次折射到空气中的光成分,如图 1 所示^[34]。由麦克斯韦电磁场理论可以得到光在不同折射率的界面传播时入射光、反射光和折射光的振幅和相位之间的关系。对于任意平面光波,其光矢量可以被分解为两个相互正交的分量,即垂直于入射平面振动的 s 分量和平行于入射平面的 p 分量^[35],如图 2 所示。当一束光中的 s 分量和 p 分量分配不均时,就会产生光的偏振现象。

图 2 中,s 分量和 p 分量的反射系数 r_s 、 r_p 和透射系数 t_s 、 t_p 分别表示为

$$r_s(n_i, n_t, \theta_i) = \frac{E_{ors}}{E_{ois}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}, \quad (1)$$

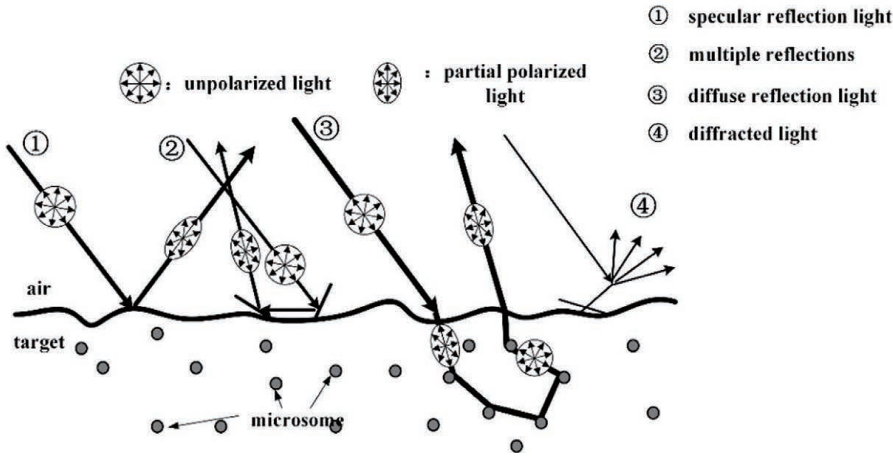


图 1 物体表面反射光成分分析模型^[34]

Fig. 1 Analytical model of reflected light composition on surface of object^[34]

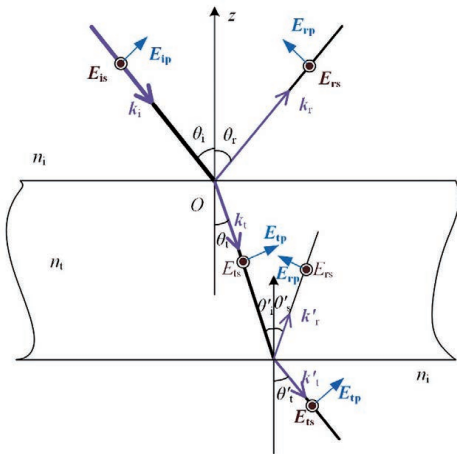


图 2 无偏光从空气中入射到介质表面形成反射光和折射光的 s 分量和 p 分量示意图以及内部散射光经粒子透射回空气中形成漫反射偏振光的示意图

Fig. 2 s and p components of reflected and refracted light formed by unpolarized light incident from air to medium surface and diffuse polarized light formed by internal scattered light transmitted back into air by particles

$$r_p(n_i, n_t, \theta_i) = \frac{E_{0rp}}{E_{0ip}} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}, \quad (2)$$

$$t_s(n_i, n_t, \theta_i) = \frac{E_{0ts}}{E_{0is}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}, \quad (3)$$

$$t_p(n_i, n_t, \theta_i) = \frac{E_{0tp}}{E_{0ip}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}, \quad (4)$$

式中: E_{0lm} ($l=i, r, t; m=s, p$) 为光波的振幅, 下标 i, r, t 分别表示入射光、反射光和折射光; 下标 s, p 分别代表光波的 s 分量和 p 分量; n_i, n_t 为不同表面材料介质的折射率; θ_i, θ_t 分别表示反射角和透射角。 θ_t 可由折射定律求得:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t. \quad (5)$$

由于探测器接收到的是光波的强度, 令 $R_s = r_s^2, R_p = r_p^2, T_s = t_s^2, T_p = t_p^2$ 。根据 Malus 定律, 通过观察放置在线偏振片之后的探测器所获取的光强值, 能够获得光的偏振状态^[36]。如图 3^[32] 所示, 探测器的光强值随着线偏振片旋转角度的变化而变化, 其变化关系为正弦曲线:

$$I(\theta_{pol}, \phi) = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} + \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \times \cos(2\theta_{pol} - 2\phi), \quad (6)$$

式中: I_{max} 和 I_{min} 分别为偏振片旋转一周过程中探测到的光强最大值和最小值; θ_{pol} 为偏振片的旋转角度; ϕ 为相位角, 也称为反射光的偏振角。当偏振片与偏振角的方向一致时, 探测器接收到的光强最大, 即 $I(\theta_{pol} = \phi) = I_{max}$; 当偏振片与偏振角的方向相差 90° 时, 探测器接收到的光强信息最小, 即 $I(\theta_{pol} = \phi \pm 90^\circ) = I_{min}$ 。

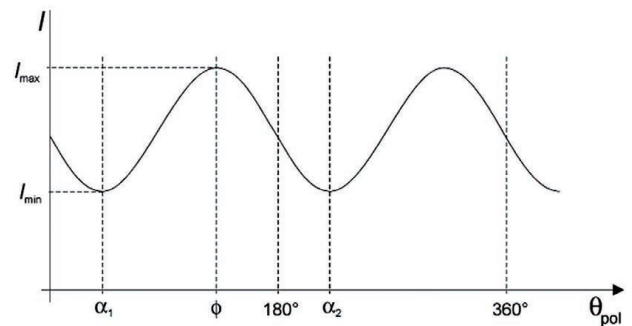


图 3 探测器光强值随偏振片旋转角度的变化图^[32]

Fig. 3 Variation of light intensity of detector with rotation angle of polarizer^[32]

物体的表面法线在空间坐标系中可以由偏振坐标 (θ, α) 来表示, 其几何表达式为^[32]

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \alpha \\ \sin \theta \sin \alpha \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan \theta \cos \alpha \\ \tan \theta \sin \alpha \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

图 4^[37]中: θ 为天顶角, 表征观测方向与法线方向之间的夹角; α 为方位角, 表征表面法线在像平面上的投影与坐标轴的夹角 ($0^\circ \leq \theta < 90^\circ$, $0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$)。当探测器观察到光强最大值时, 偏振片的旋转角度即方位角。然而线偏振片无法区分两个相差 180° 的角, 因此在求解方位角的过程中, 存在一个 180° 的模糊, 即 $\alpha = \phi$ 或 $\alpha = \phi \pm 180^\circ$ 。天顶角 θ

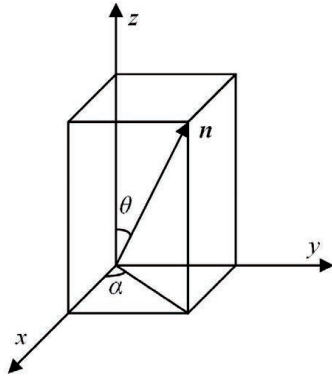


图 4 物体表面微面元的法线偏振坐标表示^[37]

Fig. 4 Polarization coordinate representation of the normal of object surface microelement^[37]

与物体表面反射光的偏振度满足一一对应的关系^[38], 故天顶角 θ 可以由偏振度 ρ ($0 \leq \rho \leq 1$) 来决定。

2.2 漫反射偏振三维成像原理

如图 2 所示, 一束无偏光入射到物体表面发生反射和透射时, 垂直于入射面的 s 分量和平行于入射面的 p 分量数量将发生变化, 导致无偏光变为部分偏振光。而由内部介质粒子所引起的随机散射会对这些折射光产生退偏作用, 可以将这部分折射光近似地看作无偏光。因此, 这部分折射光再次折射回空气中时, 又将重新变为部分偏振光。

由 Malus 定律^[36]得出偏振度定义式为

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

根据 Fresnel 公式, 漫反射光的偏振度 ρ_d 为

$$\rho_d = \frac{T_p(1/n, \theta'_i) - T_s(1/n, \theta'_i)}{T_p(1/n, \theta'_i) + T_s(1/n, \theta'_i)} = \frac{R_s(1/n, \theta'_i) - R_p(1/n, \theta'_i)}{2 - R_s(1/n, \theta'_i) - R_p(1/n, \theta'_i)} \quad (9)$$

根据(5)式, 将 θ'_i 转换成 θ'_r , 即漫反射的天顶角, 后续将其表示为 θ 。将(1)、(2)式代入(9)式得到漫反射光的偏振度 ρ_d 与表面折射率 n 、表面法线天顶角 θ 之间的关系:

$$\rho_d = \frac{(n - 1/n)^2 \sin^2 \theta}{2 + 2n^2 - (n + 1/n)^2 \sin^2 \theta + 4 \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (10)$$

如图 5 所示, 当表面折射率 n 一定时, 漫反射光的偏振度 ρ_d 与天顶角 θ 一一对应^[38]。

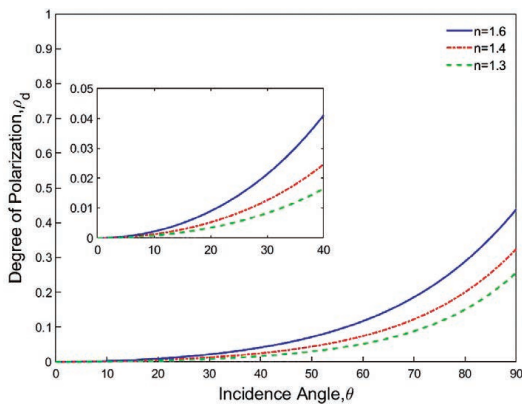


图 5 漫反射光的偏振度随天顶角的变化曲线^[38]

Fig. 5 Variation of polarization degree of diffuse light with zenith angle^[38]

在实际测量过程中, Wolff 采用了三张偏振子图像 I_0, I_{45}, I_{90} 来计算相位角和偏振度。通过分别

比较 I_0 和 I_{45}, I_{90} 的大小, 确定相位角的值。该过程可表示为^[39]

$$\phi = \begin{cases} \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{I_0 + I_{90} - 2I_{45}}{I_{90} - I_0} \right) & \text{if } I_{90} < I_0 \\ \phi + 90^\circ & \text{if } I_{45} < I_0 \\ \phi - 90^\circ & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{I_{90} - I_0}{(I_{90} + I_0) \cos 2\phi} \quad (12)$$

式中: I_0, I_{45}, I_{90} 分别对应线偏振片旋转 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时探测器接收到的光强图像。

3 漫反射偏振三维成像技术

如图 5 所示, 由于漫反射光的偏振度与天顶角信息是一一对应的, 在利用漫反射光对空间物体三维形貌进行三维重建时, 不存在天顶角的多值性模糊问题。因此, 解决方位角模糊问题是漫反射偏振

三维成像技术的关键。多年来,国内外研究人员一直致力于基于漫反射光偏振成像过程中方位角去歧义方法的研究,本文将对此类研究进行介绍。

3.1 基于光度立体视觉的物体表面偏振三维重建

2007 年,Atkinson 等^[40-41]提出将光度立体视觉和偏振信息相结合来进行表面形状恢复的方法。该方法假定物体表面的反射光是漫反射光,首先利用 Fresnel 公式估计准确的天顶角值和模糊的方位角值,之后利用三个不同位置的光源分别照射物体,分

别获得三组灰度图像、相位角图像和偏振度图像,通过比较目标每个像素点的光强值确定每个像素点处的相位角。最后利用光强信息确定方位角的值,实现方位角去模糊。

该方法所利用的实验装置如图 6^[40]所示,其中,假定相机的观测方向与光源方向之间的夹角 θ_L 、光源与物体之间的距离 D_L 均保持不变。图 7 展示了从相机视角观察到的被测物体(球体)和三个光源的位置示意图。具体方位角去模糊的过程如下:

$$\begin{cases} \text{if } \phi_k < 45^\circ & \text{then } \alpha_k = \begin{cases} \phi_k & \text{if } I_k^{(2)} > I_k^{(1)} \\ \phi_k + 180^\circ & \text{otherwise} \end{cases} \\ \text{if } 45^\circ \leq \phi_k < 135^\circ & \text{then } \alpha_k = \begin{cases} \phi_k & \text{if } I_k^{(3)} > I_k^{(1)} \\ \phi_k + 180^\circ & \text{otherwise} \end{cases} \\ \text{if } 135^\circ \geq \phi_k & \text{then } \alpha_k = \begin{cases} \phi_k & \text{if } I_k^{(3)} > I_k^{(1)} \\ \phi_k + 180^\circ & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: ϕ_k 是第 k 个像素点处的相位角值; α_k 是去模糊之后的方位角; $I_k^{(1)}$ 、 $I_k^{(2)}$ 、 $I_k^{(3)}$ 分别表示在第 1, 2, 3 个光源下所拍摄的图像的光强信息。

该方法分别对较为平滑的陶瓷物体、轻微粗糙的塑料物体、苹果以及橘子等不同材质的物体进行了实验,实验的重建结果如图 8^[40]所示。由图可见,方位角模糊已经得到了有效的去除,但是受到粗糙表面的镜面反射光的影响,物体表面的重建结果仍存在误差。此外,由于粗糙度、内部反射和折射率未知等因素的影响,重建目标表面较真实目标表面更为平坦。

2015 年,日本九州大学 Ngo 团队也做了类似的工作^[42]。该团队建立的误差函数 E 将偏振信息(固定光源方向、改变偏振片旋转角度)和光度立体视觉约束(固定偏振片旋转角度、改变光源方向)进行融合,并分别采用两个算法对光滑的介质物体表面法线进行估计。其中,在光源方向已知的情况下,算法 1 可实现对物体表面的法线方向和表面折射系数的估计;在光源方向未知的情况下,算法 2 不仅可以实现对物体表面法线方向和表面折射系数的估计,还可以估计光源方向。该方法的实验结果如图 9 所示^[42]。

2017 年,加拿大 Simon Fraser University 的 Cui 团队^[43]利用偏振多目立体视觉法实现了室外自由光照环境下物体的三维感知与形状恢复。该方法结合光度立体视觉技术,利用深度传播和优化算法绕过了偏振方

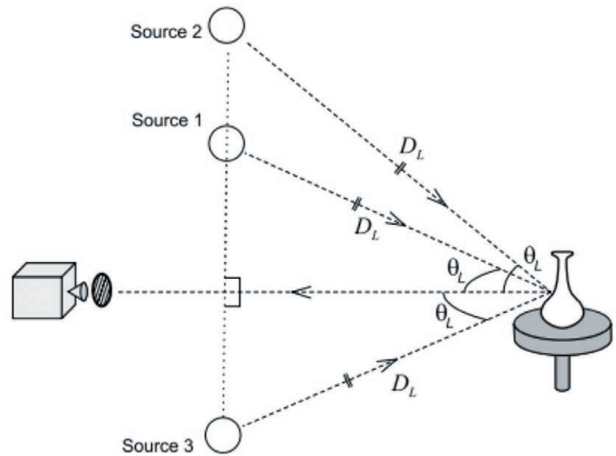


图 6 基于光度立体视觉技术的方位角去模糊实验装置图^[40]
Fig. 6 Experimental setup for azimuth deblurring based on photometric stereo vision technology^[40]

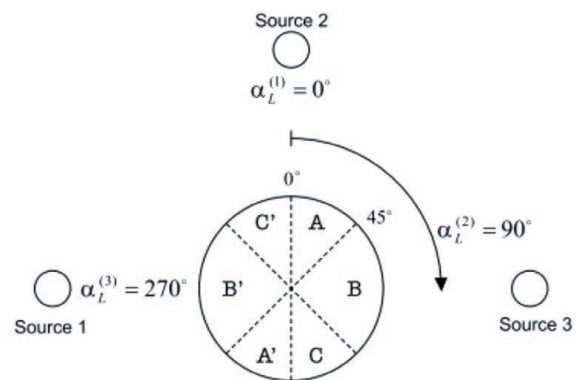


图 7 从相机视角观测球体目标和三个光源的示意图^[40]
Fig. 7 Location of sphere object and three light sources observed from camera's perspective^[40]

位角的多值性问题,实现了物体表面纹理区域到无纹理区域的高精度恢复;不仅如此,偏振多目立体视觉法

适用于物体表面反射光同时包含镜面反射光和漫反射光的混合偏振模型中,实验结果如图 10^[43]所示。

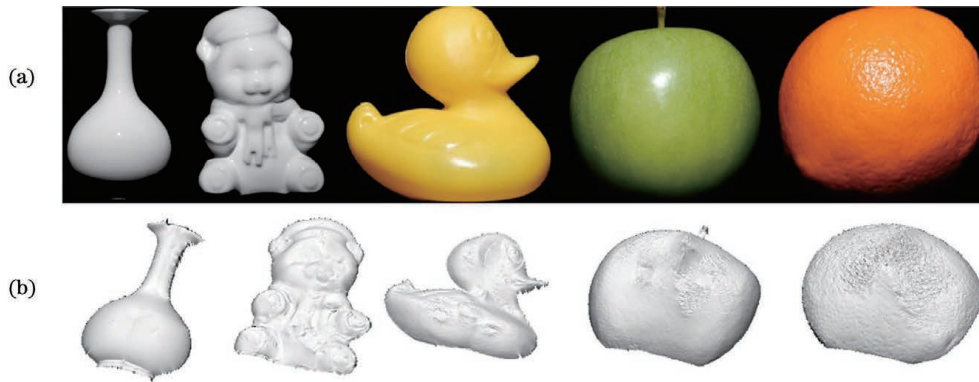


图 8 基于光度立体视觉技术的真实目标与物体表面重建结果^[40]。(a)真实目标强度图像;(b)物体表面重建结果
Fig. 8 Intensity images of real objects and surface reconstruction results of objects based on photometric stereo vision technology^[40]. (a) Intensity images of real objects; (b) surface reconstruction results of objects

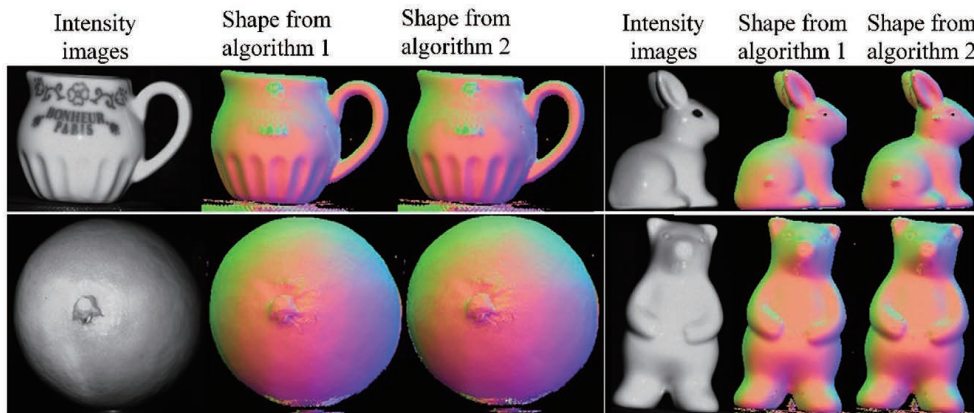


图 9 结合光度立体视觉的重建结果^[42]

Fig. 9 Reconstruction results combined with photometric stereo vision^[42]

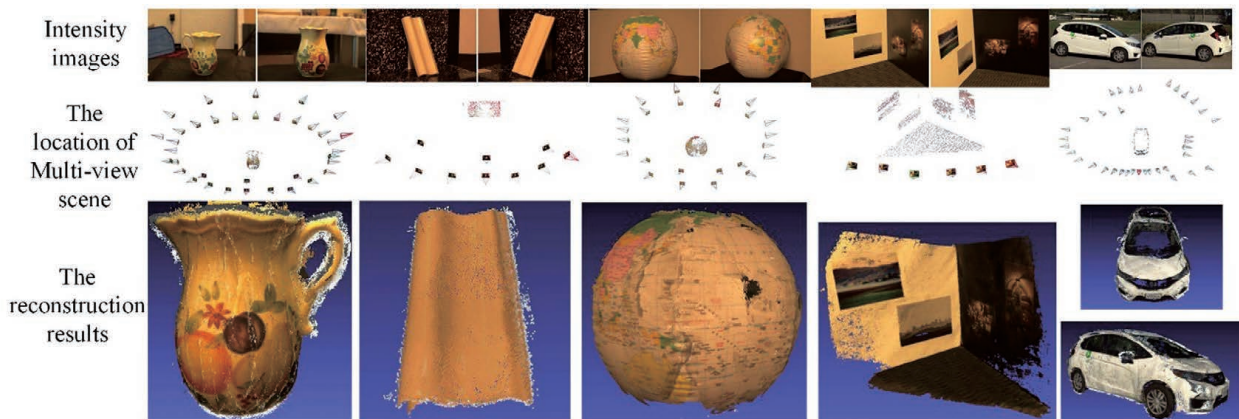


图 10 偏振多目立体视觉法重建结果图^[43]

Fig. 10 Reconstructed shapes from polarimetric multi-view stereo vision^[43]

3.2 结合阴影恢复法的方位角去歧义

为解决偏振恢复形状法中的凹/凸模糊问题,2012年,美国路易威尔大学的 Mahmoud 等^[44]利用阴影信息作为辅助手段来对目标的表面形状进行恢

复,利用阴影信息和偏振信息分别计算出两组模糊的方位角值,通过寻找最小线性值法找到最优解,实验结果如图 11 所示^[44]。该方法有以下几个优点: 1)仅依赖于单张视图和单一频谱波段,成本低、易操

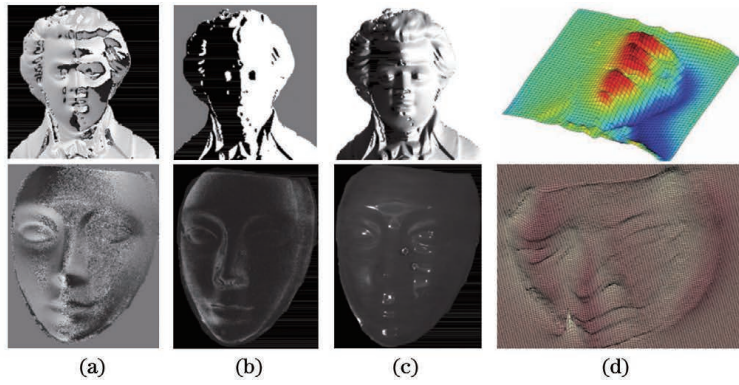


图 11 结合偏振阴影恢复法的重建结果^[44]。(a)偏振相位角图;(b)漫反射光偏振度图;(c)光强图;(d)重建结果图

Fig. 11 Reconstructed results from polarization and shading recovery method^[44]. (a) Polarization phase angles; (b) degree of diffuse polarization; (c) intensity; (d) reconstructed surfaces

作;2)在对方位角进行去歧义的过程中并未涉及非线性优化问题,解译速度快;3)无需受给定初始值等条件的限制,适用性强。然而,该方法结合了阴影恢复法,其重建物体的应用范围被限定在了表面只发生漫反射的朗伯体反射模型上,对于处理含有镜面反射的区域仍有局限性。其具体实现过程如下:

$$\sum_{m=1}^2 d(r, R_m) = \sum_{m=1}^2 \min_{j=1, \dots, n_m} |r - r_{mj}|, \quad (14)$$

式中: R_m 为相位角, $m = 1, 2$; r_{mj} 为该过程利用阴影恢复法和偏振恢复形状法所获得的相位角 R_1, R_2 中的第 j 个像素点处相位角的值, $m = 1, 2$ 。将 r_{mj} 与任意给定的 r 值一一进行比较,选择使差距 $\sum_{m=1}^2 d(r, R_m)$ 最小的值作为真实的方位角值,实现对偏振方位角的多值性问题的校正。

3.3 基于稀疏线性方程组的表面线性深度估计法解决方位角模糊

2016年,美国纽约大学的 Smith^[45-46] 提出了一种从单张偏振图像恢复表面高度的方法。在该方法中,当表面高度重建结果达到最优时,物体表面法线的方向性准确性较高,因此法线方位角的多值性问题也随之解决。不同于以往利用偏振恢复形状法^[47] 来恢复表面法线的思路,该技术对表面梯度进行有限差分近似,将法线梯度的偏振约束表示成未知深度的稀疏线性方程组的形式,利用最小二乘法对表面高度进行优化。在给定光源方向和均匀的物体表面反射率的情况下,假定光源和观测方向不同、目标物体是理想朗伯体,其表面反射光为漫反射光。此外,为了提高该技术的鲁棒性,Smith 分别加入了两个先验条件:1)利用拉普拉斯算子对表面高度进行平滑处理,该先验使得一个像素点的高度信息与周围临近像素点处的高度信息值的平均数相近,在

表面高度上具有线性的优势;2)假定物体表面形状为凸起的。该技术涉及的方程如下。

法线梯度的偏振约束线性方程为

$$-p(\mathbf{u})\cos[\phi(\mathbf{u})] + q(\mathbf{u})\sin[\phi(\mathbf{u})] = 0, \quad (15)$$

$$\frac{i_{\text{un}}(\mathbf{u})}{f[\rho(\mathbf{u}), \eta]} = -p(\mathbf{u})s_x - q(\mathbf{u})s_y + s_z, \quad (16)$$

式中: \mathbf{u} 代表图像的像素点; $i_{\text{un}}(\mathbf{u})$ 代表非偏图像的光强; $p(\mathbf{u}), q(\mathbf{u})$ 分别代表像素点 \mathbf{u} 沿 x, y 方向的梯度变化; $\phi(\mathbf{u})$ 表示像素点 \mathbf{u} 处的相位角值; η 为反射系数,假定 η 的值为 1.5; $f[\rho(\mathbf{u}), \eta]$ 为表面法线 \mathbf{n} 沿着 z 轴方向的分量; s_x, s_y, s_z 代表光源 \mathbf{s} 在 x, y, z 方向的分量。

基于偏振约束的最小二乘优化函数为

$$\epsilon_{\text{data}}(z) = \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{AD} \\ \mathbf{1}_K \end{bmatrix} z - \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2, \quad (17)$$

式中: \mathbf{D} 为有限差分梯度矩阵; \mathbf{A} 是一个 $(2K + 1) \times K$ 阶的稀疏矩阵(其每行的非零元素不超过 8 个); b 是关于法线梯度的函数; z 是物体表面高度。

加入先验条件,重新组合后的线性最小二乘方程组为

$$\epsilon(z) = \epsilon_{\text{data}}(z) + \epsilon_{\text{sm}}(z) + \epsilon_{\text{con}}(z) = \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{A} & & & & \\ & \mathbf{D} & & & \\ & & \mathbf{B} & & \\ & & & \omega_{\text{sm}} \mathbf{L} & \\ & & & & \mathbf{1}_K \end{bmatrix} z - \begin{bmatrix} b \\ c \\ \mathbf{0}_C \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2, \quad (18)$$

式中: \mathbf{B}, c 均为关于天顶角 θ 的矩阵; ω_{sm} 是先验条件所占的权重; \mathbf{L} 是拉普拉斯算子的矩阵; $\mathbf{0}_C$ 为长度为 C 的零向量; $\epsilon_{\text{sm}}(z)$ 为拉普拉斯平滑项优化先验函数; $\epsilon_{\text{con}}(z)$ 为表面凸性先验优化函数。最优的表面高度信息 z^* 为

$$z^* = \underset{z \in \mathbb{R}^K}{\text{argmin}} \epsilon(z). \quad (19)$$

为了减小偏振图像和光源矢量对高度恢复产生的影响,利用最小二乘法对由法线梯度的偏振约束转化成的线性方程组 $ADz=b$ 进行优化,之后加入两个先验条件 $\epsilon_{sm}(z)$ 和 $\epsilon_{con}(z)$ 的优化函数,形成线性最小二乘方程组,最后通过对该方程组进行优化得到最优的表面高度信息 z^* 。

该技术对多种不同材质的物体表面进行了较高

质量的高度恢复,其恢复结果如图 12^[45] 所示,可以看出表面细节信息获得了高精度恢复。同时,该技术不仅适用于物体图像中的漫反射像素点,对于镜面反射像素点也适用。此外,对于未知光照的情况,Smith 等^[45] 实现了通过偏振图像对光照的估计,成功地将此方法推广到室外等未知光照下物体被动深度估计场景中,其表面高度恢复结果如图 13 所示。

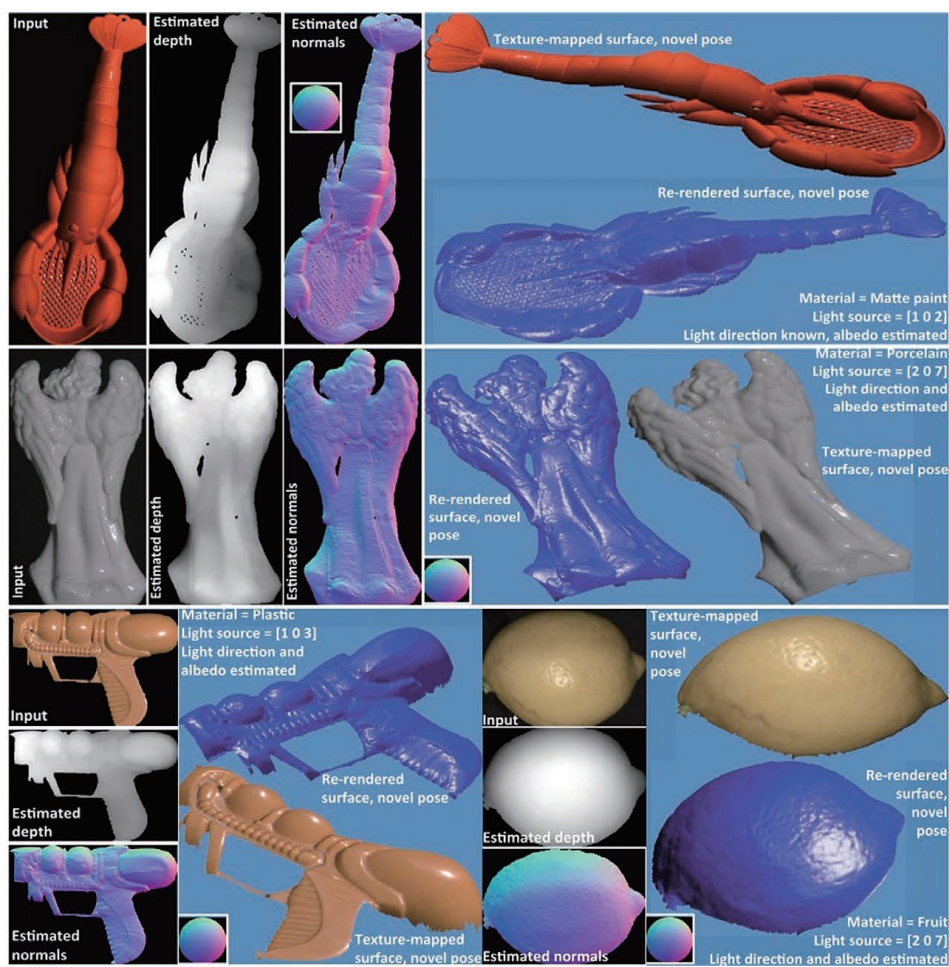


图 12 光源已知条件下不同材质的物体表面高度恢复图^[45]

Fig. 12 Height recovery results of objects of different material types for known light source^[45]

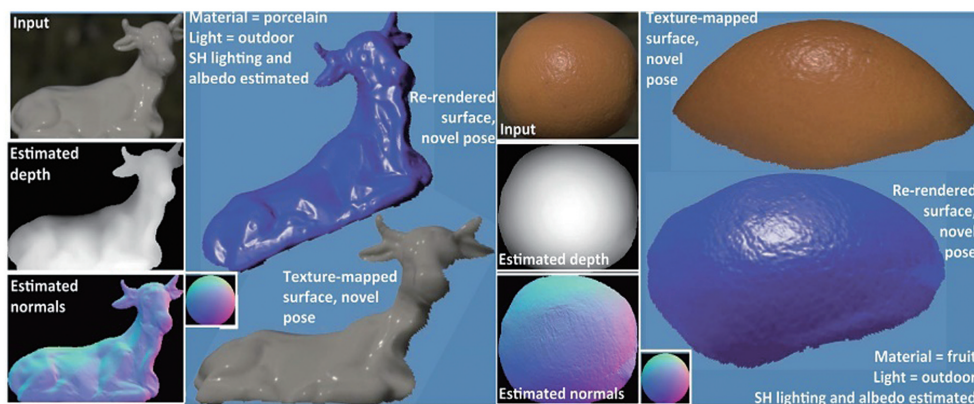


图 13 室外环境下不同材质物体表面的高度恢复图^[45]

Fig. 13 Height recovery results of objects of different material types for outdoor environment^[45]

3.4 基于偏振+RGB 相机立体视觉三维重建技术的方位角去模糊

在 Smith 等的基础之上, 2019 年该团队 Zhu 等^[48] 搭建了包含 RGB 相机和偏振相机的混合成像系统, 在光照方向和物体表面反射系数已知的前提下, 利用 RGB 相机准确估计出光滑物体的反照率, 同时利用两相机所形成的多目立体视觉获取几何约束, 去除方位角模糊, 成功实现漫反射物体表面的密集三维重建, 其重建结果如图 14 所示^[48]。

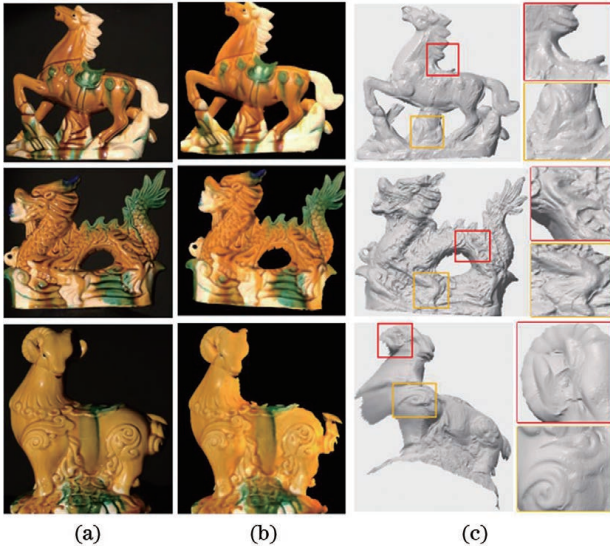


图 14 偏振+RGB 相机立体视觉的三维重建结果^[48]。
(a) 真实物体光强图; (b) 估计的物体反照率; (c) 估计的深度图

Fig. 14 3D reconstructed results from polarization + RGB camera stereo vision^[48]. (a) Intensity images of real objects; (b) estimated albedo maps; (c) estimated depth maps

3.5 结合粗糙深度图的偏振方位角模糊校正

2017 年, 美国麻省理工学院的 Kadambi 等^[49-50] 提出了一种融合粗糙深度图的偏振恢复形状法, 首次利用由偏振获得的法线信息提升粗糙深度图的成像分辨率。该技术的实验装置由单反相机、线偏振片和 Kinect 深度传感器组成, 如图 15 所示^[49]。Kadambi 等首先利用微软公司研制的 Kinect 深度传感器^[51] 获取物体表面粗糙深度图, 再结合由深度图获得的表面法线信息对偏振获得的表面法线信息进行校正, 实现方位角的唯一化处理。由于使用 Kinect 获取的目标粗糙深度图只体现了物体的大致轮廓, 在仅使用粗糙深度图对物体的三维形状进行恢复的过程中无法高精度地复原物体表面的细节信息; 与之相反, 物体表面光波的偏振信息中包含大量的高频纹理信息。因此, 将两种方法进

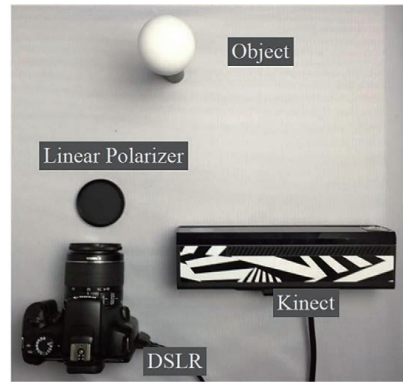


图 15 结合 Kinect 的粗糙深度图的实验装置^[49]

Fig. 15 Experimental setup of method combined with coarse depth map captured by Kinect^[49]

行融合可以同时物体表面轮廓、细节等信息进行高精度恢复。方位角去模糊的具体方法如下。

求解校正法线方位角信息的二元操作数集合 \hat{A} :

$$\hat{A} = \underset{A}{\operatorname{argmin}} \| \mathbf{N}^{\text{depth}} - A \mathbf{N}^{\text{polar}} \|_2^2, A \in \{-1, 1\}, \quad (20)$$

式中: $\mathbf{N}^{\text{depth}}$ 和 $\mathbf{N}^{\text{polar}}$ 分别为由粗糙深度图获得的法向量和由偏振图像获得的法向量。

对目标表面法线场的先验信息进行校正:

$$\mathbf{N}^{\text{corr}} = \hat{A} \mathbf{N}^{\text{polar}}, \quad (21)$$

式中: \mathbf{N}^{corr} 为校正后的法向量。Kadambi 等在室内、室外等多种不同光照条件下也进行了实验, 实验结果如图 16 所示^[49]。实验证明, 该技术不仅适用于漫反射表面, 对于同时包含镜面反射和漫反射的物体表面也有良好的重建效果; 此外, 该技术使用 3 张图片获得的偏振信息扩展了目标表面材料复杂性和光照条件的适用范围, 同时具有较高的鲁棒性。

2019 年, 北京大学的杨锦发等^[52] 融合了由 Astra 3D 相机获取的粗糙深度信息对低纹理物体进行偏振三维重建, 该团队首先利用边缘传播算法对方位角模糊进行粗纠正, 再通过比较粗糙深度图的方位角误差对由偏振信息获得的方位角进行进一步的校正, 其重建结果如图 17 所示^[52]。由图 17^[52] 中的三维形状和误差值比较可以看出, 该技术所获得的物体三维表面和真值较为接近。

3.6 基于单目近红外偏振三维成像的方位角校正法

2021 年, 西安电子科技大学 Li 等^[53] 发现物体表面不同颜色区域在近红外波段的反射光谱具有稳定的辐射特性。基于此发现, 提出了多色区域的近红外偏振三维成像模型, 从不同颜色像素点的光强

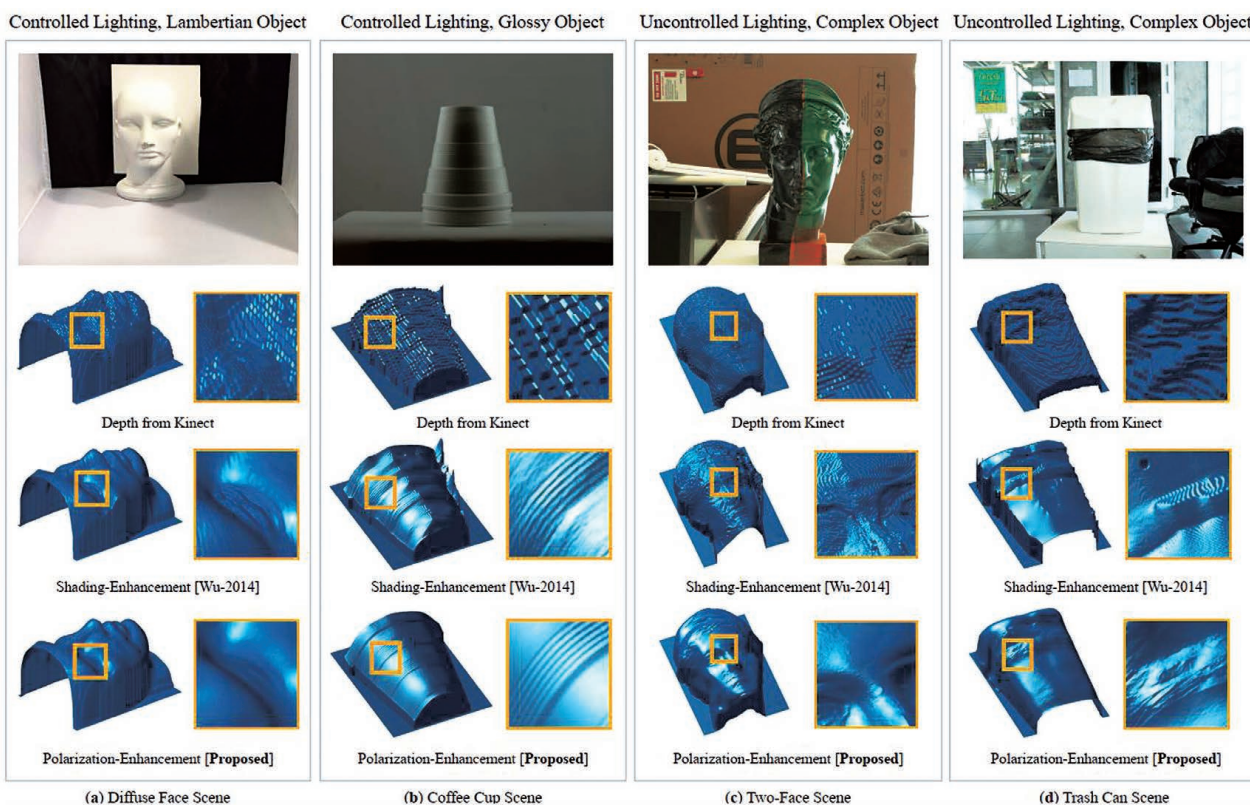


图 16 结合 Kinect 的粗糙深度图的三维成像结果^[49]

Fig. 16 3D imaging results of coarse depth maps captured by Kinect^[49]

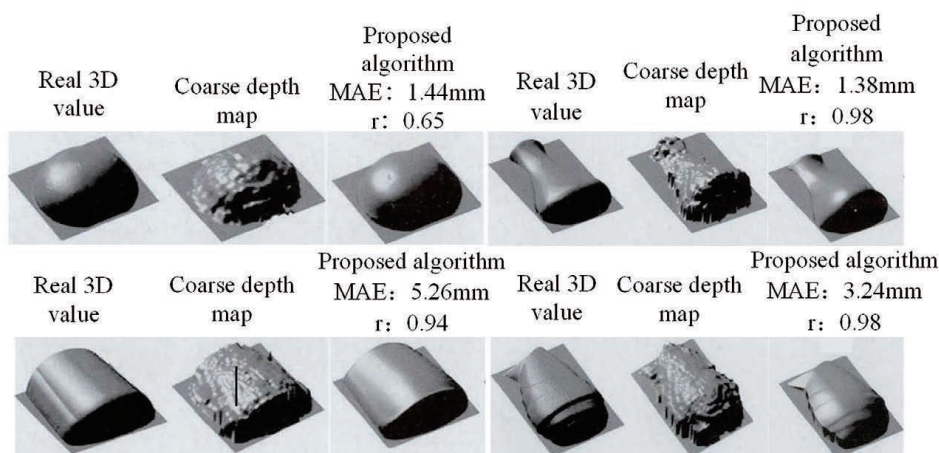


图 17 结合 Astra 3D 相机的弱纹理物体三维重建结果图^[52]

Fig. 17 3D reconstruction maps of weak-texture objects using Astra 3D camera^[52]

入手,通过分析各像素点的反射率引入权重因子 ω 对反射率进行校正,后将校正后的光强图像代入法线梯度场中,对方位角进行全局校正,从而获得真实的方位角信息。该方法的三维成像模型如图 18 所示^[53],成像结果如图 19^[53]、图 20^[53]所示。

由实验结果可知,该成像模型有效地解决了偏振三维成像技术在非均匀反照率(由颜色变化引起的)物体表面的畸变。此外,该成像模型不仅适用于近景目标,也同样适用于远景目标,具有良好的鲁

棒性。

4 总结与展望

偏振三维成像技术利用物体表面反射光的偏振信息与表面空间几何结构之间的映射关系来重建物体的三维形貌信息。相比于传统成像技术,偏振三维成像技术以其成像设备简单、体积小、成本低等优势,已广泛应用于医疗检测、安防监控、空间探测等多个领域。从 Fresnel 公式出发,介绍了目标表面

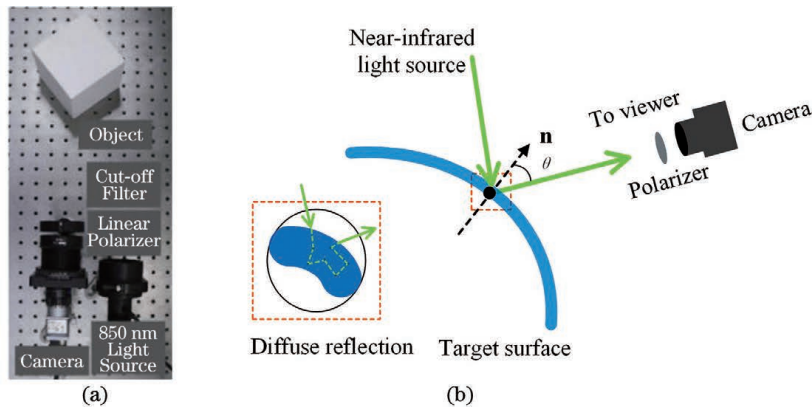


图 18 近红外(NIR)偏振三维成像模型^[53]。(a)近红外偏振三维成像装置图;(b)三维模型图

Fig. 18 NIR 3D polarization imaging model^[53]. (a) NIR 3D polarization imaging system; (b) 3D model

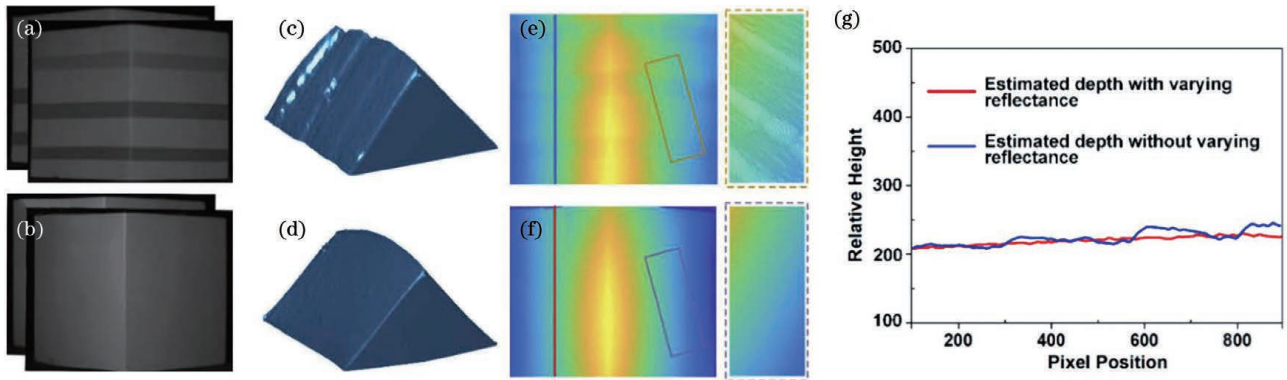


图 19 未校正反射率和校正反射率的三维结果^[53]。(a)拍摄的强度图像;(b)反射率经校正后的光强图像;
(c)(d)图 19(a)、(b)的三维重建结果;(e)(f)相对高度值;(g)图 19(e)、(f)第 350 列像素值等高线

Fig. 19 3D results for target before correcting reflectance and after correcting reflectance^[53]. (a) Input intensity information; (b) intensity image after correcting reflectance; (c) (d) 3D shapes of Figs. 19(a) and 19(b); (e) (f) relative height values; (g) contours of 350th column shown in Figs. 19(e) and 19(f)

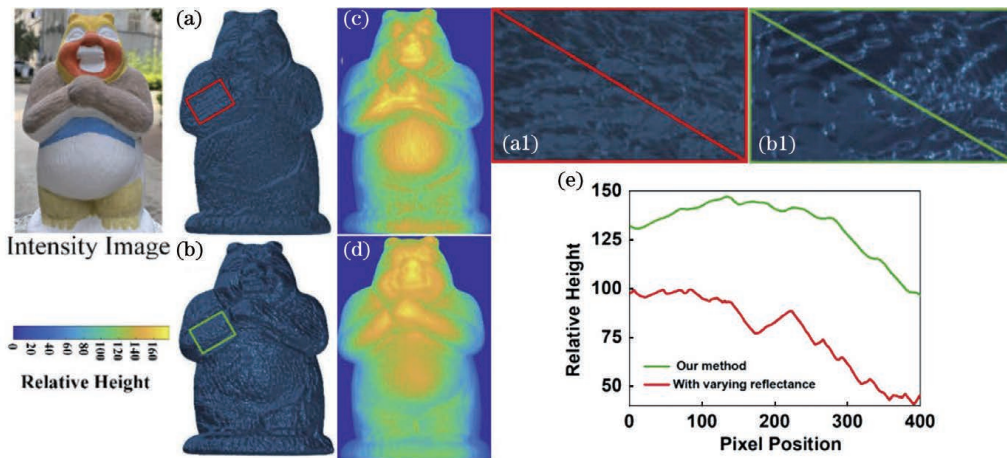


图 20 彩色卡通石膏目标的三维结果^[53]。(a)未校正反射率的三维重建结果;(b)采用近红外偏振三维方法的三维重建结果;
(c)(d)分别为图 20(a)、(b)的相对高度值;(a1)(b1)目标手臂区域三维形状放大约 10 倍的结果图;
(e)图 20(a1)、(b1)像素的高度变化

Fig. 20 Three-dimensional results for colored cartoon plaster target^[53]. (a) 3D-recovered result without correcting for reflectance; (b) 3D-recovered result using 3D NIR polarization method; (c) (d) relative height values of Figs. 20(a) and 20(b); (a1) (b1) approximately $10 \times$ magnification of 3D shape in region of target arm; (e) height variations in pixels of Figs. 20(a1) and 20(b1)

反射光波的偏振反射模型,并详细分析了漫反射偏振三维成像技术的原理,同时指出了在该技术中存在的法线方位角模糊问题。而对于漫反射偏振三维成像技术中法线方位角模糊问题,目前多数解决方法都需要额外的先验信息作为辅助条件对其进行约束,本文对于目前具有代表性的漫反射偏振三维成像技术进行了综述。

漫反射偏振三维成像是依赖表面反射光中的漫反射分量来恢复物体表面形状,与基于镜面反射的偏振三维成像技术相比,该技术在不同材质表面的适用性更强。然而,漫反射偏振三维成像技术大多要求空间物体的反射遵从理想朗伯体模型,但现实场景中目标表面的反射光成分较为复杂,通常存在镜面反射分量干扰,使得目标表面的局部三维成像结果有误差。因此,开展对于镜面反射——漫反射分离技术的研究,提高漫反射偏振三维成像技术的应用范围迫在眉睫。此外,漫反射偏振三维成像技术对自然场景内单个目标可实现高精度的形貌恢复,但是对于场景内存在多个不连续目标的情况,受表面间断点的影响,其表面的高精度恢复尚且受限。所以针对场景内多个不连续目标的三维重建问题,研究人员仍需要开展进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 020001.
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 020001.
- [2] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. *Image processing, analysis and machine vision* [M]. Boston: Springer, 1993.
- [3] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [4] Li X, Liu F, Chen F Y, et al. A depth information acquisition method through 3D polarization imaging technology [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: JTU2A.14.
- [5] Durou J D, Falcone M, Quéau Y, et al. A comprehensive introduction to photometric 3D-reconstruction [M] // *Advances in photometric 3D-reconstruction*. *Advances in computer vision and pattern recognition*. Cham: Springer, 2020: 1-29.
- [6] Li X, Liu F, Shao X P. Research progress on polarization 3D imaging technology [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(2): 248-262.
李轩, 刘飞, 邵晓鹏. 偏振三维成像技术的原理和研究进展 [J]. *红外与毫米波学报*, 2021, 40(2): 248-262.
- [7] Roberts L G. *Machine perception of three-dimensional solids* [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1963: 3-5.
- [8] Ebrahimnezhad H, Ghassemian H. Robust motion from space curves and 3D reconstruction from multiviews using perpendicular double stereo rigs [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(10): 1397-1420.
- [9] Richard H, Andrew Z. *Multiple view geometry in computer vision* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 25-27.
- [10] Wu T, Fu Z L. 3D reconstruction technology and military application [J]. *National Defense Science & Technology*, 2015, 36(1): 31-34.
吴彤, 傅中力. 三维重建技术及其军事应用 [J]. *国防科技*, 2015, 36(1): 31-34.
- [11] Gao Y. Study on the key technologies of polarization 3D imaging using diffuse reflection [D]. Xi'an: Xidian University, 2017: 5-7.
高鹰. 漫反射偏振三维成像关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017: 5-7.
- [12] Huang S Z. Research on monocular polarization 3D imaging technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2019: 4-6.
黄盛志. 单目偏振三维成像技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 4-6.
- [13] Várady T, Martin R R, Cox J. Reverse engineering of geometric models: an introduction [J]. *Computer-Aided Design*, 1997, 29(4): 255-268.
- [14] Wei S P. Research of 3D imaging based on the fusion of depth camera and stereo vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 1-3.
魏少鹏. 基于深度相机与双目视觉复合的三维成像技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 1-3.
- [15] Yin Y K, Yu K, Yu C Z, et al. 3D imaging using geometric light field: a review [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1209001.
殷永凯, 于锴, 于春展, 等. 几何光场三维成像综述 [J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1209001.
- [16] Schwarz B. Mapping the world in 3D [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 429-430.
- [17] Hu Y W, Wang J J, Fan Y Y, et al. LiDAR-based three-dimensional modeling and volume calculation for space objects [J]. *Chinese Journal of Lasers*,

- 2020, 47(5): 0510001.
- 胡燕威, 王建军, 范媛媛, 等. 基于激光雷达的空间物体三维建模与体积计算[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0510001.
- [18] Liu D Q, Zhang J, Jin J C. Adaptive grid representation method for unmanned surface vehicle obstacle based on three-dimensional lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0110002.
- 刘德庆, 张杰, 金久才. 基于三维激光雷达的无人船障碍物自适应栅格表达方法[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0110002.
- [19] Fang Y J, Wang X, Sun Z B, et al. Study of the depth accuracy and entropy characteristics of a ToF camera with coupled noise[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 128: 106001.
- [20] Yang P B, Deng L J, Chen Y, et al. Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204004.
- 杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204004.
- [21] Sankowski W, Włodarczyk M, Kacperski D, et al. Estimation of measurement uncertainty in stereo vision system [J]. Image and Vision Computing, 2017, 61: 70-81.
- [22] Tippetts B, Lee D J, Lillywhite K, et al. Review of stereo vision algorithms and their suitability for resource-limited systems [J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2016, 11(1): 5-25.
- [23] Koshikawa K. A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects [M] // Wolff L B, Shafer S A, Glenn E. Physics-based vision: principles and practice. New York: CRC Press, 1992.
- [24] Saito M, Sato Y, Ikeuchi K, et al. Measurement of surface orientations of transparent objects using polarization in highlight[C]//Proceedings 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149), June 23-25, 1999, Fort Collins, CO, USA. New York: IEEE Press, 1999, 1: 381-386.
- [25] Fisher R B. From surfaces to objects: computer vision and three dimensional scene analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1989: 10-15.
- [26] Wolff L B, Boult T E. Constraining object features using a polarization reflectance model [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(7): 635-657.
- [27] Miyazaki D, Kagesawa M, Ikeuchi K. Transparent surface modeling from a pair of polarization images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(1): 73-82.
- [28] Gu G Z. 3D-reconstruction of transparent object based on polarization analysis [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008: 15-20.
- 顾国璋. 基于偏振分析的透明物体的三维重建[D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 15-20.
- [29] Li X, Liu F, Cai Y D, et al. Polarization 3D imaging having highlighted areas [C] // Frontiers in Optics, September 15-19, 2019, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2019: JTU3A.108.
- [30] Wolff L B. Surface orientation from polarization images[J]. Proceedings of SPIE, 1988, 0850: 110-121.
- [31] Huang S Z, Liu F, Han P L, et al. Surface normals correction by removing specular reflection for 3D polarization imaging [C] // Frontiers in Optics, September 16-20, 2018, Washington, DC, United States. Washington, D.C.: OSA. 2018: JTU2A.135.
- [32] Atkinson G A, Hancock E R. Recovery of surface orientation from diffuse polarization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1653-1664.
- [33] Huynh C P, Robles-Kelly A, Hancock E. Shape and refractive index recovery from single-view polarisation images[C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 13-18, 2010, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1229-1236.
- [34] Cai Y D, Han P L, Liu F, et al. Polarization-based extracting diffuse reflection from light-field of object surface [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(23): 234201.
- 蔡玉栋, 韩平丽, 刘飞, 等. 基于光场偏振特性的目标表面漫反射分量获取技术[J]. 物理学报, 2020, 69(23): 234201.
- [35] Born M, Wolff E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light [M]. Amsterdam: Elsevier, 2013: 15-29.
- [36] Zhu H F, Li D L, Song L K, et al. Precise analysis of formation and suppression of intensity transmittance fluctuations of glan-taylor prisms[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 052302.
- 朱化凤, 李代林, 宋连科, 等. 格兰-泰勒棱镜光强透射比波动的成因及抑制方法精确分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 052302.
- [37] Miyazaki D, Shigetomi T, Baba M, et al. Surface normal estimation of black specular objects from

- multiview polarization images[J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(4): 041303.
- [38] Atkinson G A, Hancock E R. Shape estimation using polarization and shading from two views [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(11): 2001-2017.
- [39] Wolff L B. Polarization vision: a new sensory approach to image understanding [J]. *Image and Vision Computing*, 1997, 15(2): 81-93.
- [40] Atkinson G A, Hancock E R. Surface reconstruction using polarization and photometric stereo [M] // Kropatsch W G, Kampel M, Hanbury A. *Computer analysis of images and patterns. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2007, 4673: 466-473.
- [41] Atkinson G A. Surface shape and reflectance analysis using polarisation [M]. York: University of York, 2007: 10-14.
- [42] Ngo T T, Nagahara H, Taniguchi R I. Shape and light directions from shading and polarization [C] // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 2310-2318.
- [43] 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.
- [44] Mahmoud A H, El-Melegy M T, Farag A A. Direct method for shape recovery from polarization and shading [C] // 2012 19th IEEE International Conference on Image Processing, September 30-October 3, 2012, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1769-1772.
- [45] Smith W A P, Ramamoorthi R, Tozza S. Linear depth estimation from an uncalibrated, monocular polarisation image [M] // Leibe B, Matas J, Sebe N, et al. *Computer vision-ECCV 2016. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2016, 9912: 109-125.
- [46] Smith W A P, Ramamoorthi R, Tozza S. Height-from-polarisation with unknown lighting or albedo [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, 41(12): 2875-2888.
- [47] Miyazaki D, Saito M, Sato Y, et al. Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(4): 687-694.
- [48] Zhu D Z, Smith W A P. Depth from a polarisation + RGB stereo pair [C] // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 7578-7587.
- [49] Kadambi A, Taamazyan V, Shi B X, et al. Depth sensing using geometrically constrained polarization normals [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2017, 125(1/2/3): 34-51.
- [50] 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.
- [51] Han J G, Shao L, Xu D, et al. Enhanced computer vision with microsoft kinect sensor: a review [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, 43(5): 1318-1334.
- [52] Yang J F, Yan L, Zhao H Y, et al. Shape from polarization of low-texture objects with rough depth information [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(6): 819-827.
- 杨锦发, 晏磊, 赵红颖, 等. 融合粗糙深度信息的低纹理物体偏振三维重建 [J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(6): 819-827.
- [53] Li X, Liu F, Han P L, et al. Near-infrared monocular 3D computational polarization imaging of surfaces exhibiting nonuniform reflectance [J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15616-15630.