

基于红外辐射偏振成像的目标三维重建方法

李磊磊^{1,2}, 黄海霞^{3*}, 郭阳^{1,2}, 姚乃夫^{1,2}, 赵永强^{1,2}

(1. 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057;

2. 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072;

3. 中国工程院, 北京 100088)

摘要: 三维重建技术已在工业自动化领域得到了广泛的应用,但对于工业生产线中玻璃、锻造件等表面结构单一、高反光、无纹理的高温产品,利用传统的三维重建方法得到的三维重建结果往往不准确。这些高温物体会产生红外偏振自发辐射,提出了基于红外辐射偏振成像的目标三维重建方法。首先建立红外偏振辐射模型,分析目标表面红外辐射偏振态与目标表面法向量之间的关系,最后通过对法向量积分得到目标表面的三维形态。该方法不依赖于物体表面的纹理特征信息,对光照条件无要求且采集一次数据即可重构出目标表面的三维形态,易于实现,具有广阔的应用前景。

关键词: 红外偏振成像; 三维重建; 表面法向量; 图像处理

中图分类号: TP391

文献标识码: A

3D reconstruction method of target based on infrared radiation polarization imaging

LI Lei-Lei^{1,2}, HUANG Hai-Xia^{3*}, GUO Yang^{1,2}, YAO Nai-Fu^{1,2}, ZHAO Yong-Qiang^{1,2}

(1. Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518057, China;

2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: Three-dimensional reconstruction technology has been widely used in the field of industrial automation. However, traditional 3D reconstruction methods are difficult to obtain accurate results from high-temperature products of industrial production lines such as glass and forgings that are characterized by a single surface structure, high reflectivity and no texture, because these high temperature products generate infrared polarized radiation. We propose a three-dimensional reconstruction method of the target based on infrared radiation polarization imaging. First, we establish an infrared polarization radiation model, and analyze the relationship between the infrared radiation polarization state and the normal vector of the target surface. Finally, we obtain the three-dimensional morphology of the target surface by integrating the normal vectors. The method does not rely on the structure and texture information about the target surface, has low lighting requirements, and can reconstruct the 3D morphology of the target surface with only one data acquisition. Therefore, it is easy to implement and has a wide range of applications.

Key words: Infrared polarization imaging, Three-dimensional reconstruction, Surface normal vector, Image processing

收稿日期: 2020-07-13, 修回日期: 2021-03-04

Received date: 2020-07-13, Revised date: 2021-03-04

基金项目: 深圳市科技创新委员会基础研究(自由探索)项目(JCYJ20180306171146740), 深圳市科技创新委员会基础研究(学科布局)项目(JCYJ20170815162956949), 国家自然科学基金(61771391), 陕西省重点研发计划(2020ZDLGY07-11)

Foundation items: Supported by Shenzhen Science and Technology Innovation Committee Basic Research (Free Exploration) Project (JCYJ20180306171146740), Shenzhen Science and Technology Innovation Committee Basic Research (Discipline Layout) Project (JCYJ20170815162956949), National Natural Science Foundation of China (61771391), Shaanxi Provincial Key R&D Program (2020ZDLGY07-11)

作者简介(Biography): 李磊磊(1991-), 男, 陕西富平人, 硕士, 主要从事红外偏振三维重建方面的研究工作. Email: 1162433886@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: hhx@cae.cn

引言

目标表面三维重建技术^[1-3]近年来在工业、医疗、计算机虚拟现实以及航天等领域得到了广泛的应用。然而一些新的三维重建应用需求给现有的重建技术提出了全新的挑战,例如玻璃、铸件等工业流水线要求对表面结构单一、高反光且无纹理的高温产品进行三维重建。基于可见光成像的三维重建方法主要利用物体反射的环境光获取表面的纹理细节等信息,难以满足以上的新需求、新挑战。与上述方法相比,基于可见光偏振成像的三维重建技术^[4-5]不依赖于目标表面纹理特征,其利用目标表面法向量与偏振信息之间的关联建立偏振三维重建模型,可有效解决目标表面的数据空洞问题。

文献[6]通过从不同方向拍摄绝缘体表面的偏振图像,将偏振信息加入到目标三维重建中,从反射光的偏振态变化来获得物体表面的法向量。但要求入射光为圆偏振光。文献[7]将阴影和偏振作为约束条件,将它们应用于优化方案中,通过改变光源的方向获取相应的偏振图像,最后恢复出表面光滑目标的三维形态。文献[8]通过多角度观测目标,分析各个角度观测到的反射光在对应点处的偏振态,然后利用偏振信息和空间信息来估计黑色高光物体的表面法向量和三维坐标。文献[9]提出了一种基于红外多视角三维重建的方法,该方法通过标定获得了每台红外探测器的内部参数和外部参数,然后获取不同角度的红外自发辐射图像,对其进行特征点检测与匹配。最后,基于计算空间坐标的点云来重建物体表面轮廓信息,但是重建结果较差。文献[10]提出了一种可见光与红外辐射组合的三维重建方案,通过融合可见光图像和红外图像重建场景的三维形状。尽管基于可见光偏振图像三维重建的方法已取得了诸多研究成果,但目前相关方法的重建性能对光源的依赖性较强,其中一些方法还需获取目标的两个或以上视图,在上述条件无法满足的情况下很难获得预期的三维重建结果。红外图像进行三维重建时往往依赖于物体的纹理细节信息,在边缘轮廓不清晰且纹理信息较少时,难以获得准确的三维形状。

传统的使用旋转偏振片的方法需要采集至少三个角度的偏振图像,这种采集方式实时性差,且采集过程中偏振片的微小位移会使其准确度下降^[11-12]。本文提出的红外辐射偏振三维重建方法使用分焦平面长波红外偏振相机,在其红外成像探测

器的焦平面上集成了微纳光栅阵列,由周期排列的 2×2 偏振单元组成,其上分别设计有 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个偏振角度的微纳光栅。利用此相机的成像特性采集得到一幅图像,即可通过本文方法恢复出物体的表面形状。

1 红外辐射偏振成像模型

图1表示为光滑物体表面红外自发辐射光矢量的示意图。当红外自发辐射光从光滑的介质表面出射时,两个相互垂直的分量 p 分量和 s 分量对应的发射率存在明显的差异,从而会引起红外自发辐射光矢量中垂直分量 E_{os} 和平行分量 E_{op} 强度存在明显的差异,因此产生红外自发辐射偏振效应。

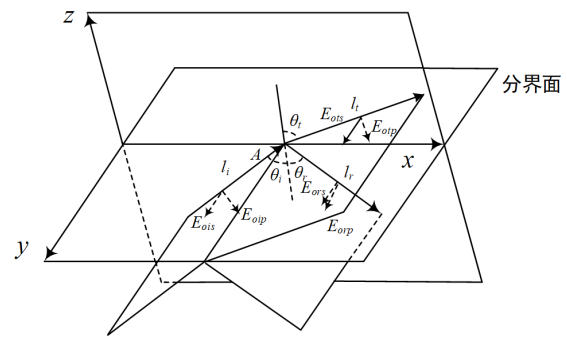


图1 光滑物体表面红外自发辐射光矢量

Fig. 1 Vector of infrared spontaneous radiation on a smooth medium surface

依据偏振度的定义可以得到^[13],红外自发辐射的偏振度可以用公式表示为:

$$DoLP = \frac{\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi) - \varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)}{\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi) + \varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)} \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)$ 代表 s 分量对应的发射率, $\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi)$ 代表 p 分量对应的发射率, T 代表物体表面的温度, λ 代表波长, φ 代表天顶角。

由基尔霍夫定律推导可知,在某一温度下物体的吸收率 $\alpha(T, \lambda, \varphi)$ 等于其光谱发射率,并且垂直分量和水平分量分别对应不同的吸收率和发射率,如下所示:

$$\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi) = \alpha_p(T, \lambda, \varphi) \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(T, \lambda, \varphi) = \alpha_s(T, \lambda, \varphi) \quad (3)$$

由能量守恒定律可以得到,对于表面光滑的不透明物体,其相应方向上的发射率和反射率之和为1,用公式表示如下:

$$\alpha_p(T, \lambda, \varphi) = (1 - \rho_p(\varphi, n, k)) \quad (4)$$

$$\alpha_s(T, \lambda, \varphi) = (1 - \rho_s(\varphi, n, k)) \quad (5)$$

物体的折射率不仅与波长有关,而且还与温度有关^[14]。式中, n 表示折射率的实部, k 表示折射率的虚部, $\rho_s(\varphi, n, k)$ 、 $\rho_p(\varphi, n, k)$ 分别代表 s 方向和 p 方向的菲涅耳反射系数。

将公式(4)和(5)带入公式(1)中,可得红外辐射偏振度公式表示如下:

$$DoLP = \frac{\rho_s(\varphi, n, k) - \rho_p(\varphi, n, k)}{2 - \rho_s(\varphi, n, k) - \rho_p(\varphi, n, k)} \quad (6)$$

由菲涅尔公式推导可以得到,菲涅耳反射系数的计算可由下列公式表示:

$$\rho_s(\varphi, n, k) = \frac{s^2 + t^2 - 2s \cos \varphi + \cos^2 \varphi}{s^2 + t^2 + 2s \cos \varphi + \cos^2 \varphi} \quad (7)$$

$$\rho_p(\varphi, n, k) = \frac{s^2 + t^2 - 2s \sin \varphi \tan \varphi + \sin^2 \varphi \tan^2 \varphi}{s^2 + t^2 + 2s \sin \varphi \tan \varphi + \sin^2 \varphi \tan^2 \varphi} \rho_s(\varphi, n, k) \quad (8)$$

$$s^2 = \frac{\sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi) + 4n^2 k^2} + n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi}{2} \quad (9)$$

$$t^2 = \frac{\sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi) + 4n^2 k^2} - (n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi)}{2} \quad (10)$$

2 红外辐射偏振三维重建方法

基于红外自发辐射偏振进行物体表面三维重建的关键是通过偏振成像技术获取物体自发辐射的偏振状态。通过推导红外自发辐射偏振态与物体表面法向量的几何关系,然后对物体表面法向量进行积分从而获取物体表面的三维信息。首先分析物体自发辐射的偏振态,根据偏振态和法向量的关系得到物体表面法向量的方向参数,法向量由天顶角和方位角组成,其中天顶角是指 z 轴与物体表面法向量的夹角,方位角是指 x 轴与物体表面法向量在 XY 平面的投影的夹角。如图2所示。其中天顶角 ϕ 是指 z 轴与物体表面法向量的夹角,方位角 θ 是指 x 轴与物体表面法向量在 XY 平面投影的夹角, AOP 为偏振相角。

由于物体红外自发辐射中垂直分量 s 和平行分量 p 振动能量的不相等,导致了红外热辐射的偏振效应。通过上述红外自发辐射偏振成像机理的分析,推导出红外自发辐射线偏振度与物体表面天顶角的关系表达式为:

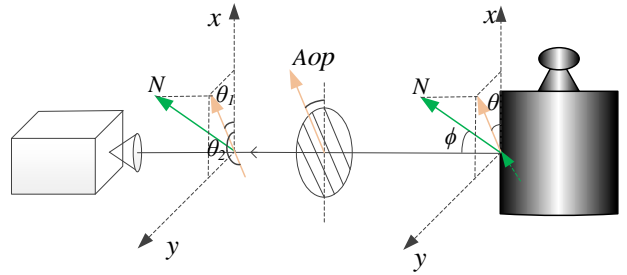


图2 光滑介质表面物体法向量示意图

Fig. 2 Normal vector diagram of smooth medium surface

$$DoLP = \frac{\sin \varphi \tan \varphi (s^2 + t^2 - 2s \cos \varphi + \cos^2 \varphi)}{2 \cos \varphi (s^2 + t^2 + \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi) + (s^2 + t^2 + \cos^2 \varphi) \sin \varphi \cos \varphi + 2s \sin^2 \varphi} \quad (11)$$

即天顶角可由物体的折射率和偏振度表示为:

$$\varphi = f(n, k, DoLP) \quad (12)$$

图3为典型材料铝、陶瓷、玻璃、铁的红外自发辐射偏振度与天顶角关系的仿真图,从图中仿真结果可以看出,不管是金属材质还是非金属材质,其天顶角与红外辐射偏振度是一一对应的关系,不存在歧义性。而在可见光波段,天顶角与偏振度之间在镜面反射模型中存在歧义性^[15]。

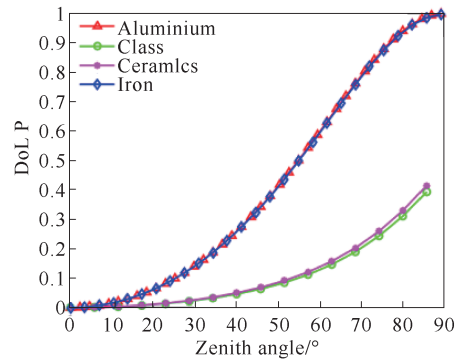


图3 不同材料天顶角与红外辐射偏度仿真图

Fig. 3 Simulation map of zenith angle and infrared radiation skewness of different materials

红外自发辐射偏振角与方位角的关系不是一一对应的,存在两种对应情况。 φ 表示天顶角, θ 表示方位角, AOP 表示偏振角。如图2所示,法向量的方位角 θ 取值有两种不同情况: AOP 和 $AOP - \pi$,其关系表达式为:

$$\theta = AOP - \begin{cases} \pi \\ 0 \end{cases} = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_2}{S_1} \right) - \begin{cases} \pi \\ 0 \end{cases} \quad (13)$$

由于 S_1 给出了方位角平面的方向^[16],因此可以

利用该性质消除偏振相角与方位角的歧义性,即:

$$\theta = AOP - \frac{\text{sgn}(S_1) + 1}{2} \cdot \pi \quad (14)$$

式中, $\text{sgn}()$ 为符号函数。

通过求取目标表面红外辐射的偏振度和偏振相角,可解算得到目标表面的方位角和天顶角,进而获取目标表面的法向量分布。目标表面由 $z = f(x, y)$ 表示,则物体表面上任一点的法向量可由下面公式表示为:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ -\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan\varphi \cos\theta \\ \tan\varphi \sin\theta \\ 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

目前从物体表面法向量进行目标表面三维重建主要有全局积分和局部积分两种算法。局部积分算法具有计算速度快和容易实现等优点,但是依赖于积分路径的选择和数据的准确性,容易对误差进行累积。而全局积分算法通过对重建结果进行约束以及对代价函数最小化来增加可积性,其对局部误差和噪声具有更好的鲁棒性,得到的表面更加准确。因此本文利用 Frankot-Chellappa 全局积分算法^[17]对目标表面法向量进行积分得到目标的表面三维形态。

Frankot-Chellappa 全局积分算法通过傅里叶变换来实现目标表面的三维重建。Frankot-Chellappa 算法要求物体表面重建满足可积分条件,即满足下面公式:

$$\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y \partial x} \quad (16)$$

然后将表面积分看作一个最优化问题来处理,其代价函数如下所示:

$$W = \iint \left[\left| z_x - \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right| + \left| z_y - \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right| \right] dx dy \quad (17)$$

以上代价函数的目的是使重建表面的梯度场与所测梯度场的误差最小,通过傅里叶变换将梯度场映射到频域中表示为可积基本函数的组合,每个分量都有一个特定的加权系数如下所示:

$$f(x,y) = \sum \lambda_{ij} \Psi_{ij}(x,y) \quad (18)$$

式中, i 和 j 是离散点的坐标, Ψ 表示傅里叶基函数, λ 为基函数对应的加权系数。由于目标表面是连续可积的,故在不同的求导方向上基函数的系数一致。通过最小化可积表面与不可积表面间的系数差,便可在傅里叶空间内重构出函数 $f(x, y)$, 进而使

用傅里叶逆变换得到期望的表面数据。

3 实验结果及分析

3.1 不同材质重建结果

为了验证所提算法的实用性和有效性,本文利用北方广微科技有限公司生产的 GWPL-0304-X2A 型分焦平面长波红外偏振相机,相机排布为 2×2 的超像素模式 (0° 、 45° 、 90° 和 135°),工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,采集图像分辨率为 640×512 。

实验流程如下:首先采集一幅图像,利用 PCA 去噪算法^[18]进行预处理,通过牛顿多项式插值和偏振差分模型方法^[19]分别得到 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} 图像,然后求解斯托克斯矢量,进而计算出红外自发辐射偏振度和偏振相角,通过偏振度和偏振相角分别解算出物体表面天顶角和方位角,即可得到目标表面的法向量,最后采用 Frankot-Chellappa 全局积分算法对目标表面法向量进行积分,最终实现目标表面的三维重建。Kinect 三维重建原理如下:红外激光发射器向目标表面投射红外激光,其抵达目标时产生衍射效应形成激光散斑,通过接收激光散斑得到目标表面的反射信息,利用 Kinect 的数学模型计算出每一像素点的深度值,进而得到物体表面的三维信息。本文以表面光滑纹理单一的金属铝罐、陶瓷花瓶、玻璃杯为实验对象。其中,第一组实验目标为金属铝罐,其折射率为 $n=25.01$, $k=85.97$,本文方法和 Kinect 重建结果分别如图 4-5 所示;第二组实验目标为陶瓷花瓶,其折射率为 $n=1.56$, $k=0$,本文方法和 Kinect 重建结果分别如图 6-7 所示;第三组实验目标为玻璃杯,其折射率为 $n=2.50$, $k=0$,本文三维重建方法和 Kinect 三维重建结果分别如图 8-9 所示。

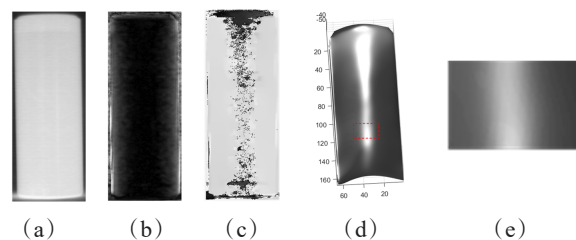


图4 金属铝罐三维重建结果(a)原始图像,(b)红外偏振度图像,(c)红外偏振角图像,(d)三维重建结果,(e)局部放大图

Fig. 4 3D reconstruction results of aluminum metal cans (a) Original image, (b) Infrared polarization degree image, (c) Infrared polarization angle image, (d) 3D reconstruction result, (e) Partial enlarged image

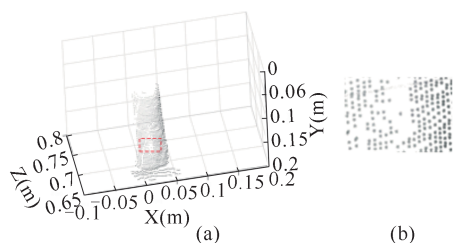


图5 Kinect方法金属铝罐三维重建结果(a)三维重建结果 (b)三维重建结果局部放大图

Fig. 5 Kinect method 3D reconstruction results of aluminum metal cans (a) 3D reconstruction result, (b) Partial enlargement of 3D reconstruction result

第一组实验目标为金属铝罐,其原始红外图像如图4(a)所示。金属铝罐的折射率分别由折射系数和衰减系数两部分组成,其折射率的变化范围大于非金属材料,且会受到目标表面厚度以及粗糙度等因素影响。在本实验中金属铝罐的衰减系数为25.01,折射系数为85.97,本文方法三维重建结果如图4(d)所示,其表面无数据空洞且边缘轮廓完整;利用Kinect深度相机得到的物体三维重建结果如图5(a)所示,其表面边缘轮廓重建不完整,且从局部放大图5(b)可以观察到存在严重的数据空洞问题。

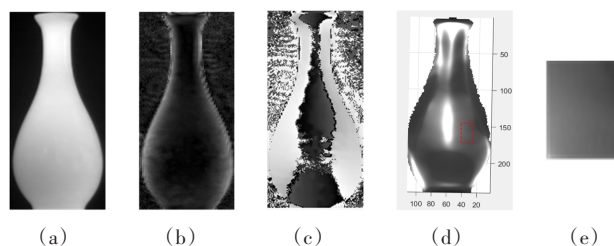


图6 陶瓷花瓶三维重建结果(a)原始图像, (b)红外偏振度图像, (c)红外偏振角图像, (d)三维重建结果, (e)局部放大图

Fig. 6 3D reconstruction results of ceramic vases (a) Original image, (b) Infrared polarization degree image, (c) Infrared polarization angle image, (d) 3D reconstruction result, (e) Partial enlarged image

第二组实验目标为陶瓷花瓶,其原始红外图像如图6(a)所示。用本文方法得到的三维重建结果如图6(d)所示,其表面边缘轮廓完整、无数据空洞;利用Kinect深度相机得到的三维重建结果如图7(a)所示,其表面边缘轮廓不完整存在缺陷,且从局部放大图7(b)同样可以观察到严重的数据空洞问题。

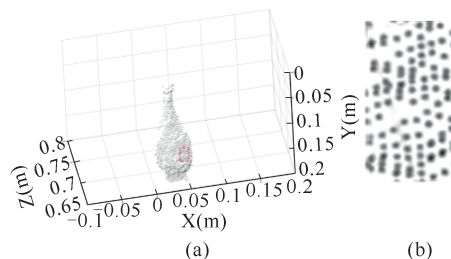


图7 Kinect方法陶瓷花瓶三维重建结果(a)三维重建结果, (b)三维重建结果局部放大图

Fig. 7 Kinect method 3D reconstruction result of ceramic vase (a) 3D reconstruction result, (b) Partial enlargement of 3D reconstruction result

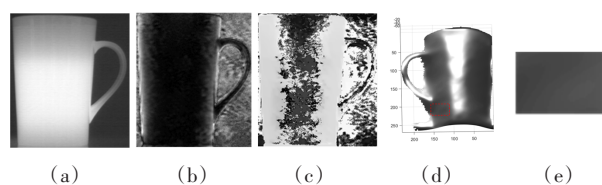


图8 玻璃杯三维重建结果(a)原始图像, (b)红外偏振度图像, (c)红外偏振角图像, (d)三维重建结果, (e)局部放大图

Fig. 8 Glass 3D reconstruction results (a) Original image, (b) Infrared polarization degree image, (c) Infrared polarization angle image, (d) 3D reconstruction result, (e) Partial enlarged image

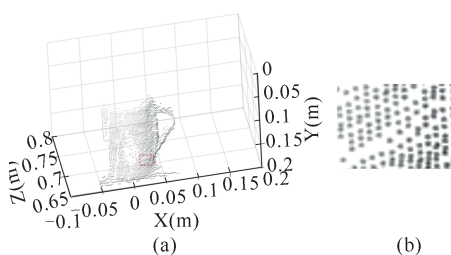


图9 Kinect方法玻璃杯三维重建结果(a)三维重建结果, (b)三维重建结果局部放大图

Fig. 9 Kinect method 3D reconstruction of glass (a) 3D reconstruction result, (b) Partial enlargement of 3D reconstruction result

第三组实验目标为玻璃杯,其原始红外图像如图8(a)所示。由于玻璃杯是透明材料,采用传统可见光三维重建方法很难取得较好的结果。本文利用长波红外波段无法穿透玻璃材料的特性对其进行三维重建,重建结果如图8(d)所示,结果表明基于红外辐射偏振成像的目标三维重建方法能够获得此类目标完整的三维信息;利用Kinect深度相机获得的三维重建结果如图9(a)所示,其表面边缘轮廓没有准确的重建出来,且从局部放大图9(b)能观

观察到数据空洞问题依然存在。

本文的实验对象分别为表面光滑且纹理特征单一的金属、陶瓷与透明材料,采用传统三维重建方法需要两幅或以上图像且无法有效提取出纹理特征。而本文提出的基于红外自发辐射偏振成像的目标三维重建方法不依赖于光照条件和目标表面的纹理特征。该方法通过红外辐射的偏振态做量化估计,较好的恢复出了不同材质表面的三维形状,有效解决了轮廓信息不完整和数据空洞问题。

3.2 温度与折射率鲁棒性验证

为了验证本算法对温度变化的鲁棒性,改变物体表面的温度并分别对其进行三维重建实验。实验结果如图 10 所示,从实验结果可以得到,物体表面温度越高重建出的三维形状越光滑、越准确。这是由于温度的增高使得物体的自发辐射效应更加明显。实验验证了本算法对 50℃至 90℃区间内的温度变化具有较高的鲁棒性。

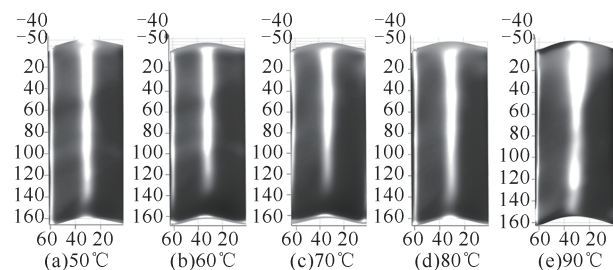


图 10 表面温度鲁棒性验证结果

Fig. 10 Surface temperature robustness verification results

为了验证本算法对折射率误差的鲁棒性,分别改变物体折射率实部 n 与虚部 k 的取值范围,其偏振三维重建结果如图 11 所示。从实验结果可以看出当折射率在该区间内变化时,对重建结果精度影响很小。实验验证了本算法对折射率误差在变化区间 0.1 范围内三维重建结果具有较高的鲁棒性。

4 结论

表面光滑且纹理单一目标的三维重建一直都是计算机视觉领域的难题。本文提出了基于红外辐射偏振成像的目标三维重建方法,通过求解斯托克斯矢量计算出红外辐射的偏振参数,然后建立目标红外辐射偏振特性与表面法向量之间的关系,最后通过全局积分的方法解析出目标表面的三维形态。该方法不依赖光照条件和目标表面的纹理特征,仅需采集一幅红外偏振图像就可重建出物体表面的三维形状,具有重建精度高和实时性好、无数

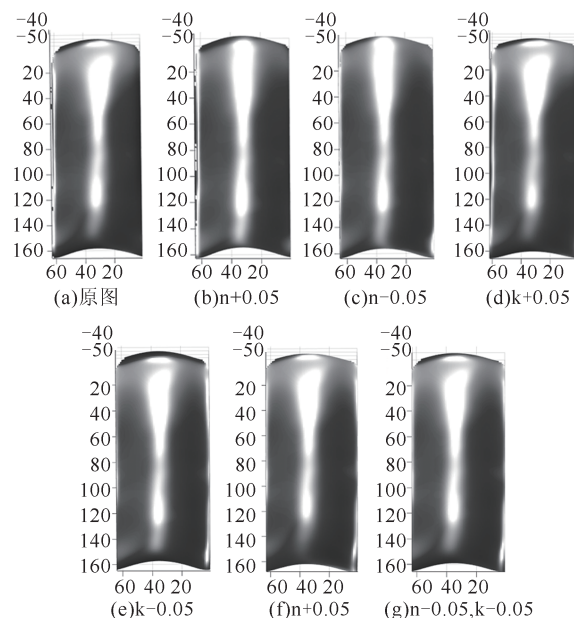


图 11 折射率鲁棒性验证结果

Fig. 11 Refractive index robustness verification results

据空洞等优点,从而有更广阔的应用前景。

References:

- [1] 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.
- [2] MAHMOUD A H , EL-MELEGY M T , FARAG A A. Direct method for shape recovery from polarization and shading[C]. *Image Processing (ICIP), 2012 19th IEEE International Conference on*. IEEE, 2012.
- [3] BAILER C, FINCKH M, LENSCH H. Scale robust multi-view stereo[C]. *Processing of the 12th European on Computer Vision*, 2011, **49**(1): 264–276.
- [4] CHEN Z, WANG X, LIANG R. Snapshot phase shift fringe projection 3D surface measurement [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(2):667–73.
- [5] NGO T. Shape and Light Directions from Shading and Polarization [C]. *IEEE Conference on Computer Vision (CVPR)*, 2015:2310–2318.
- [6] NGO THANH T, NAGAHARA H, TANIGUCHI R. Shape and light directions from shading and polarization [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015:3370–3378.
- [7] 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.
- [8] GARCIA M, EDMISTON C, YORK T, et al. Bio-inspired imager improves sensitivity in near-infrared fluorescence image-guided surgery [J]. *Optica*, 2018, **5**(4): 413–422.
- [9] ZHAO S, ZHANG Z, WAN X. Three-dimensional profile reconstruction based on infrared multi-view vision[C]. *International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test*. International Soci-

- ety for Optics and Photonics, 2016.
- [10] MA Y, WANG Y, MEI X, *et al.* Visible/Infrared Combined 3D Reconstruction Scheme Based on Nonrigid Registration of Multi-modality Images with Mixed Features [J]. *IEEE Access*, 2019:1-1.
- [11] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J].*Applied Optics*, 2006, **45**(22):5453-69.
- [12] LAVIGNE D A , MÉLANIE B, FOURNIER G, *et al.* A new passive polarimetric imaging system collecting polarization signatures in the visible and infrared bands [C]. SPIE Defense, Security, & Sensing. 2009.
- [13] WOLFF L B, LUNDBERG A, TANG R. Image Understanding from Thermal Emission Polarization [C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1998.
- [14] Wesely, Ml. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, **15**(15):43-49.
- [15] ATKINSON G A , HANCOCK E R. Recovery of surface orientation from diffuse polarization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(6):1653-1664.
- [16] CONIGLIO N , MATHIEU A , AUBRETON O, *et al.* Characterizing weld pool surfaces from polarization state of thermal emissions[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(12):2086.
- [17] FRANKOT R T , CHELLAPPA R. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1988, **10**(4):439-451.
- [18] JUNCHAO Z , HAIBO L , RONGGUANG L, *et al.* PCA-based denoising method for division of focal plane polarimeters[J]. *Optics express*, 2017, **25**(3):2391-2400.
- [19] LI N, ZHAO Y, PAN Q, *et al.* Demosaicking DoFP images using Newton's polynomial interpolation and polarization difference model [J]. *Optics express*, 2019, **27**(2): 1376-1391.