

引用格式:彭群聂,高海峰,张生伟,等.基于光学偏振成像的低纹理目标三维重建算法[J].电光与控制,2018,25(12):49-52,58. PENG Q N, GAO H F, ZHANG S W, et al. A polarization imaging based 3D reconstruction algorithm for textureless objects[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25 (12):49-52, 58.

基于光学偏振成像的低纹理目标三维重建算法

彭群聂^{1,2}, 高海峰^{1,2}, 张生伟^{1,2}, 李 宁³, 李大雷^{1,2}, 揭斐然^{1,2}

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000; 3. 西北工业大学自动化学院, 西安 710129)

摘要: 针对于视觉任务中表面光滑、低纹理的目标, 由于其结构纹理信息的缺乏及高反光的特性, 传统三维重建算法无法恢复物体有效的表面形状特征, 提出了基于光学偏振成像的低纹理目标三维重建算法。该算法不依赖于目标表面的结构纹理信息, 以求解 Stokes 参数来量化目标表面反射光偏振态, 而后结合偏振—几何空间分析, 估计目标表面的法向量分布, 最后提出了多尺度 Shapelets 算子将法向量信息积分获取目标的有效深度信息, 恢复目标的三维形状。实验结果表明, 针对低纹理的高反光目标, 该算法能快速准确地恢复其表面的三维形态, 并且有效抑制镜面耀光和噪声的干扰, 算法实时性高。

关键词: 三维重建; 偏振成像; 低纹理目标; Stokes 参数; 多尺度 Shapelets

中图分类号: TP391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.12.011

A Polarization Imaging Based 3D Reconstruction Algorithm for Textureless Objects

PENG Qun-nie^{1,2}, GAO Hai-feng^{1,2}, ZHANG Sheng-wei^{1,2}, LI Ning³, LI Da-lei^{1,2}, JIE Fei-ran^{1,2}

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China;
2. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;
3. Automation School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: For textureless objects with smooth surfaces in vision tasks, conventional three-dimensional reconstruction methods cannot retrieve the valid shape information of surfaces due to the loss of structure-texture features and the high reflectance. This paper presents a 3D reconstruction algorithm for textureless objects based on optical polarization imaging, which does not rely on the structure-texture features of objects. Stokes vector is calculated to quantify the polarization states of the surface reflected light. Then, based on the analysis of polarimetric-geometric space, the normal distribution of surface is effectively estimated. Finally, the multi-scale Shapelets blank operator is applied to integrate the normal vector to derive the accurate depth information of the objects. Experiments show that the proposed method can obtain the correct 3D shape reconstruction results, especially for high-reflective objects with less texture features. Meanwhile, the proposed technique can suppress the specular highlight and noise, with high computational efficiency.

Key words: 3D reconstruction; polarization imaging; texture-less targets; Stokes vector; multi-scale Shapelets

0 引言

三维重建技术作为视觉测量技术的重要研究方向,能够真实反映物体表面形态和反射特性,被广泛应

用于空间位姿估计感知、目标识别跟踪、医学检测、计算机图形合成等视觉领域^[1-2]。表面光滑的低纹理目标具有表面纹理结构较为单一,并且表面高反射特性易产生镜面耀光的特点。针对此类高反光低纹理目标,传统的非接触式三维重建测量技术如:双目立体视觉技术无法提取有效的目标纹理结构实现特征匹配,极大降低了深度信息的测量精度;基于结构光栅的三维重建技术由于目标表面的镜面耀光的存在,光栅结

收稿日期:2018-01-30

基金项目:国家自然科学基金(61371152)

作者简介:彭群聂(1991—),男,湖南常德人,硕士,工程师,研究方向为图像目标检测、光电探测。

构条纹被掩盖,造成重构结果出现大区域的数据空洞。因此,进行准确有效的高反光低纹理目标三维重建技术研究具有较高的理论意义和应用价值。

不同于现有光学测量技术通过捕获目标的反射和辐射强度信息来反映目标特征,光学偏振成像技术作为一项新型的光学探测技术,利用目标表面反射光的偏振态解析,反映目标的材质、粗糙度等理化特征及表面性状、分布等几何信息,其不依赖于背景照度、温度、对比度等因素,能极大提高目标探测识别性能^[3-4]。文献[5]研究了菲涅尔理论与反射光偏振态的联系,首次将偏振成像技术引入三维重建领域;文献[6]将偏振视觉和多光谱成像技术结合,利用波段变化估计介质折射系数和三维形态;文献[7]综合利用多视角下的图像序列偏振,重构绝缘体目标的三维信息;文献[8]设计复杂的全方位偏振成像系统,获取透明物体的表面三维形貌。

以上基于偏振视觉的三维重建算法均需要复杂的光学设备和光路配准,且未针对低纹理目标进行探究。本文提出了一种高效的基于光学偏振成像的三维重建算法,该算法不依赖于目标表面结构纹理信息,不需要复杂的光路设备,仅需一线偏振片进行三角度偏振成像,求取目标表面反射光的 Stokes 偏振矢量,反演估计出表面的法向量分布,同时利用多尺度 Shapelets 积分算子求取目标表面的相对深度,从而快速准确地重建得到高反光低纹理目标表面的三维形态。该算法能有效抑制噪声和耀光的干扰,且计算复杂度低,易于工程实现。

1 算法过程分析

1.1 光学偏振成像

光波属于横波,其振动方向相对于光波的传播方向具有不对称性,该特征称为光的偏振^[3],而自然光由于各个方向振动分量一致,为无偏光。但当自然光经物体表面反射时,由于其内部材质结构、表面粗糙度、入射角等影响,光的偏振态发生变化,由无偏光变为部分偏振光,而反射光的偏振态中包含目标内部的理化特征和表面的几何特性。通过解析反射光的偏振态可以反演估计出目标表面的法向量分布,从而积分重建得到表面的三维形貌。

由菲涅尔理论可知,偏振成像捕获的目标图像强度会随着偏振片旋转角度 φ 呈余弦规律变化,其图像强度表达式为

$$I(\varphi) = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} + \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \cos(2\varphi - 2\alpha) \quad (1)$$

式中: I_{\max} , I_{\min} 分别表示旋转偏振片时,所观测得到图像

的最大和最小光强值; α 代表偏振相角。

对于特定波长的反射光,在实际偏振测量中,常利用 3 个偏振方向的 Stokes 矢量数学表示方法来描述反射光的线偏振态^[5]。本文对目标进行 $[0^\circ, 60^\circ, 120^\circ]$ 三偏振角度成像,其 Stokes 矢量表达式为

$$I = \frac{2}{3} [I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \quad (2)$$

$$Q = \frac{2}{3} [2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)] \quad (3)$$

$$U = \frac{2}{\sqrt{3}} [I(60^\circ) - I(120^\circ)] \quad (4)$$

式中, I, Q, U 均为中间变量。

依据 Stokes 矢量,反射光的线偏振度 ρ_1 和偏振相角 α 的算式分别为

$$\rho_1 = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \quad (6)$$

式中: $\rho_1 = 0$ 代表无偏光; $\rho_1 = 1$ 表示完全偏振光; $0 < \rho_1 < 1$ 代表部分偏振光。

1.2 偏振—法向量空间反演

目标反射光的偏振态反映了物体表面的形状、分布等几何特性,通过解析反射光的偏振态可以反演估计出目标表面的法向量分布。假定目标表面为二次连续闭合、光滑的笛卡尔曲面, \mathbf{n} 为待重建目标表面任意一点的法向量(即图 1 中的 \vec{n}), θ 为天顶角(入射角), ψ 为方位角(法向量在成像坐标系的投影与 x 轴的夹角),其偏振—几何成像空间转化如图 1 所示。

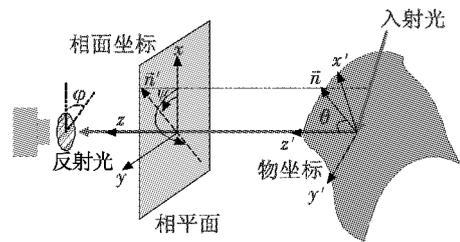


图 1 偏振—几何成像空间

Fig. 1 Polarimetric-geometric imaging coordinate system

令 $z = f(x, y)$ 表示目标曲面,其上任意一点的法向量可表示为

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} \partial f(x, y) / \partial x \\ \partial f(x, y) / \partial y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan \theta \cos \psi \\ \tan \theta \sin \psi \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据 SHAFER 的双色反射模型可知,自然光经光滑介质表面反射后,其反射光包含漫反射分量和镜面反射分量,两者均具有起偏效应。但对于绝缘体介质,其漫反射光分量起偏效应强于镜面反射分量;对于金属导

体介质,其漫反射分量起偏效应低,其效果可近似忽略。因此,本文对于绝缘体目标,仅考虑漫反射光的偏振特性;而对于金属目标,则仅考虑其镜面反射分量。

结合菲涅尔公式及折射定律,推导得到绝缘体目标表面的漫反射线偏振度 ρ_2 与天顶角 θ 的几何表达式为

$$\rho_2 = \frac{(\varepsilon - 1/c)^2 \sin^2 \theta}{2 + 2\varepsilon^2 - (\varepsilon + 1/c)^2 \sin^2 \theta + 4\cos \theta \sqrt{\varepsilon^2 - \sin^2 \theta}} \quad (8)$$

而金属目标表面镜面反射线偏振度 ρ_3 的几何表达式为

$$\rho_3 = \frac{2\varepsilon \tan \theta \sin \theta}{\tan^2 \theta \sin^2 \theta + |\varepsilon^*|^2} \quad (9)$$

式中: ε 为绝缘体折射系数; c 为内部散射次数,取 $c = 10$ 可满足重建精度; ε^* 为金属的复折射系数。

偏振相角 α (式 6) 与方位角 ψ 的关系为

$$\psi = \alpha \text{ 或 } \psi = \alpha + \pi \quad (10)$$

综合式(7)~式(10)可知,求取目标表面反射光的偏振态 (ρ_i, α) ,即可反演估计得到目标表面的几何特征 (θ, ψ) ,进而获取目标表面的法向量分布。

1.3 多尺度 Shapelets 积分算子

目标表面的法向量分布反映的是物体表面形状变化的梯度信息^[9],令 $p(x, y) = \partial f(x, y) / \partial x, q(x, y) = \partial f(x, y) / \partial y$,则对于二次连续闭合的笛卡尔曲面 $z = f(x, y)$,满足梯度二次可积,则物体表面的相对深度可表示为

$$z = f(x, y) = \iint p(x, y) dx + q(x, y) dy \quad (11)$$

多尺度 Shapelets 算子将二次可积曲面用一组非正交基函数系数的加权和来表示,定义了 n 个不同尺度下的高斯滤波器作为 Shapelets 基函数^[10],其表达式为

$$g_i(x, y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2 \cdot \sigma_i^2}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

针对直接利用梯度积分导致深度误差放大的问题,本文利用多尺度 Shapelets 积分算子将深度求解问题转化为多尺度下非正交基函数系数加权和的问题,直接利用法向量的天顶角 θ 和方位角 ψ ,放大了积分过程的约束,避免了积分误差的传递。由式(7)可知,目标表面的梯度幅值可表示为

$$|\nabla f| = \sqrt{p^2 + q^2} = |\tan \theta| \quad (13)$$

式(13)表明目标表面的梯度幅值仅与天顶角 θ 有关。定义非正交基函数幅值系数为

$$C_{Mi} = |\nabla f| * |\nabla g_i| = |\tan \theta| * |\nabla g_i| \quad (14)$$

幅值系数能反映目标表面三维形态的幅度,却不能反映表面形状的起伏方向。为保持重建结果与目标表面方向的一致性,本文同时结合方位角 ψ ,定义非正交基函数方位系数,其表达式为

$$C_{Ai} = \cos \psi \cos g_i + \sin \psi \sin g_i \quad (15)$$

综合非正交基函数的幅值和方位系数,得到多尺度 Shapelets 积分算子为

$$C_i = C_{Mi} * C_{Ai} =$$

$$|\tan \theta| * |\nabla g_i| * (\cos \psi \cos g_i + \sin \psi \sin g_i) \quad (16)$$

由式(16)可知,多尺度 Shapelets 积分算子能保证目标表面三维形貌幅值准确的同时,对表面形态的起伏方向同样进行了约束。因此,目标表面三维深度信息的求解即可转化为求取多尺度下非正交基函数的系数加权和,其表达式为

$$z = \sum_i^n C_i \quad (17)$$

由于 Shapelets 积分算子采用了非正交的高斯基函数,能在不同尺度下反映目标表面的局部特性,进而能准确快速地重建物体表面的形貌细节,有效抑制了局域误差和噪声的放大。

2 实验结果与分析

本文中的光学偏振成像测量装置采用尼康 D500 CCD 相机与线偏振片的组合,通过机械旋转偏振片的方式,获取待重建低纹理目标 $[0^\circ, 60^\circ, 120^\circ]$ 3 个不同角度的偏振图像,实现目标的三维重建。为保证待测目标表面得到光源全方位的均匀照射,实验中采用卤素灯作为面光源。利用 Intel i7 CPU,内存 4 GiB 的计算机和 Matlab2012 进行软件算法仿真处理。实验以瓷碗、石膏柱体、铝罐 3 种不同材质的目标作为重建对象,该类目标表面光滑、结构纹理特征单一甚至缺失。图 2~图 4 给出了以上 3 种低纹理目标的三维重建结果,进一步论证了本文算法的有效性(注:图 2~图 4 均截取自仿真软件原图)。

第一组实验目标为光滑的白色瓷碗,介质折射系数 $\varepsilon = 1.642$,利用本文三维重建算法,重建结果如图 2 所示。

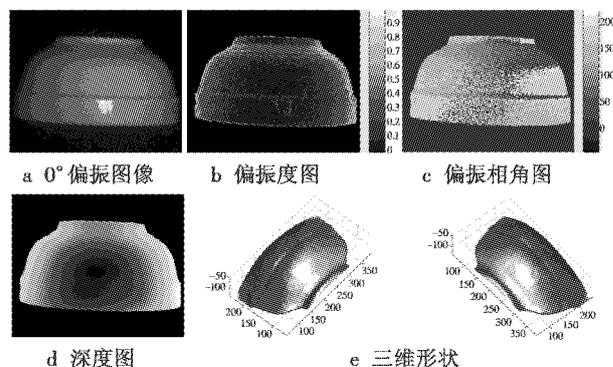


图 2 第一组实验目标三维重建结果

Fig. 2 The 3D reconstruction results of Experiment 1

第二组实验目标为无纹理结构的石膏柱体,介质折射系数 $\varepsilon = 1.574$,其三维重建结果如图 3 所示。

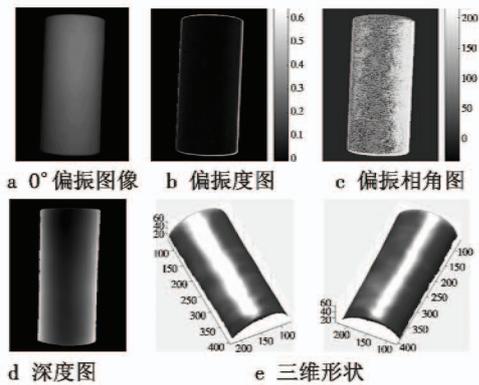


图 3 第二组实验目标三维重建结果

Fig. 3 The 3D reconstruction results of Experiment 2

第三组实验目标为易反光的金属导体铝罐, 介质折射系数 $\varepsilon = 1.48 + 3.9i$, 其三维重建结果如图 4 所示。

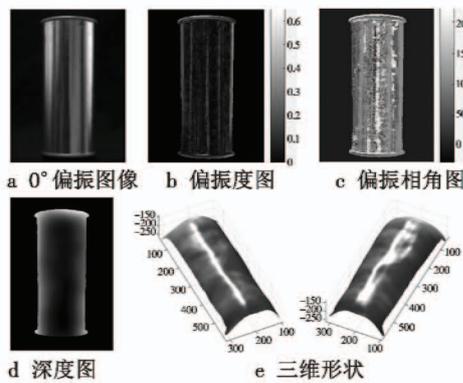


图 4 第三组实验目标三维重建结果

Fig. 4 The 3D reconstruction results of Experiment 3

以上 3 组实验目标, 其图像分辨率参数及重建算法运行时间如表 1 所示。

表 1 重建场景分辨率及算法时间

Table 1 The pixel resolution and the runtime of reconstructed scenes

	第一组目标 (瓷碗)	第二组目标 (石膏柱)	第三组目标 (铝罐)
图像分辨率/像素	1980 × 1280	720 × 1080	720 × 1366
运行时间/s	0.347	0.103	0.174

由图 2 ~ 图 4 可知, 针对于高反光低纹理目标, 无论是绝缘体还是金属目标, 本文提出的基于偏振成像的三维重建算法, 都能准确获取目标表面的深度信息, 恢复其三维形状, 有效抑制背景噪声。图 2 中的瓷碗目标, 其成像过程中由于表面高反射特性, 图像中出现镜面耀光, 而本文利用偏振成像能一定程度上抑制耀光的干扰, 同时结合多尺度 Shapelets 积分算子实现局部积分, 有效避免了耀光造成的数据空洞和误差传递, 同时碗底的起伏、局部细节重建精度高。图 3 中的石膏柱, 表面无任何结构纹理信息, 传统三维重建算法无法提取有效的纹理特征, 而本文算法不依赖于目标表

面特征, 从反射光的偏振态进行量化估计, 从而精确恢复目标的三维深度。图 4 目标为金属导体, 其电介质表面导致图像出现了不同阴影和杂散光的干扰以及梯度不连续的问题。本文重建算法避开了梯度积分, 高效地重建出目标整体的三维形貌。

同时, 本文提出的重建算法将曲面积分问题转化为系数加权求和问题, 大大降低了计算复杂度。由表 1 可看出, 对于高分辨的目标图像, 其算法实效性高, 易于工程实现。

3 结束语

高反光低纹理目标的三维重建一直是视觉测量领域中的难题。本文提出基于光学偏振成像的三维重建技术, 不依赖于目标的纹理结构特征, 通过解析反射光的偏振态, 反演估计目标表面的法向量分布, 提出了多尺度 Shapelets 积分算子, 将曲面积分简化为基函数系数求和问题。相对于传统三维重建技术, 本文算法能高效准确地获取高反光低纹理目标的深度信息, 实现目标表面的真实三维形态重建。同时算法有效抑制了耀光、背景噪声的干扰, 其重建精度高、计算复杂度低。

参考文献

- [1] 周佳立, 张树有, 杨国平. 基于双目被动立体视觉的三维人脸重构与识别[J]. 自动化学报, 2009, 35(2): 123-131.
- [2] 刘李旭, 戴鑫志, 侯振宇, 等. 基于光栅投影法的 3D 扫描技术研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(6): 101-105.
- [3] ZHAO Y Q, PENG Q N, YI C, et al. Multiband polarization imaging[J]. Journal of Sensors, 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5985673>.
- [4] ZHAO Y Q, YI C, KONG S G, et al. Multi-band polarization imaging and applications[M]. 北京: 国防工业出版社, Berlin: Springer, 2016.
- [5] 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.
- [6] HUYNH C P, ROBLES-KELLY A, HANCOCK E. Shape and refractive index recovery from single-view polarization images[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 1229-1236.
- [7] MIYAZAKI D, SHIGETOMI T, BABA M, et al. Polarization-based surface normal estimation of black specular objects from multiple viewpoints[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, 2012: 104-111.

(下转第 58 页)

- 制[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(11): 38-41.
- [14] BOLANDI H, REZAEI M, MOHSENIPOUR R, et al. Attitude control of a quadrotor with optimized PID controller[J]. *Intelligent Control and Automation*, 2013(4): 335-342.
- [15] 董良新. 模糊 PID 在无人机飞行控制中的应用研究[J]. *自动化技术与应用*, 2015, 34(8): 33-35.
- [16] LEWIS F L. Linear quadratic regulator (LQR) state feedback design[Z]. *Lecture notes in Dept. Elect. Engineering, University of Texas, Arlington*, 2008; 1-10.
- [17] JAFARI H, ZAREH M, ROSHANIAN J, et al. An optimal guidance law applied to quadrotor using LQR method[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2010. doi:10.2322/tjsass.53.32.
- [18] PRIYATMADI, SANDIWAN A P, WIJAYA H, et al. Application of SPSA LQR tuning on quadrotor[C]//*The 6th International Annual Engineering Seminar*, 2016. doi:10.1109/INAES.2016.7821902.
- [19] RODRIGUEZ W E, IBARRA R, ROMERO G, et al. Comparison of controllers for a UAV type quadrotor; feedback control by Bessel's polynomials and LQR with Kalman filter[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 555:40-48.
- [20] ZHAO B, XIAN B, ZHANG Y, et al. Nonlinear robust sliding mode control of a quadrotor unmanned aerial vehicle based on immersion and invariance method[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, 25(18): 3714-3731.
- [21] MUNOZ F, GONZALEZ-HERNANDEZ I, SALAZAR S, et al. Second order sliding mode controllers for altitude control of a quadrotor UAS[J]. *Neurocomputing*, 2017, 233:61-71.
- [22] MADANI T, BENALLEGUE A. Backstepping control for a quadrotor helicopter[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006. doi:10.1109/IROS.2006.282433.
- [23] BOUABDALLAH S, MURRIERI P, SIEGWART R. Design and control of an indoor micro quadrotor[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. doi:10.1109/ROBOT.2004.1302409.
- [24] BOUABDALLAH S, SIEGWART R. Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005. doi:10.1109/ROBOT.2005.1570447.
- [25] HUANG M, XIAN B, DIAO C, et al. Adaptive tracking control of underactuated quadrotor unmanned aerial vehicles via backstepping[C]//*Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 2010. doi:10.1109/ACC.2010.5531424.
- [26] 钟宜生. 基于信号补偿的鲁棒控制方法[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2003, 43(4): 536-542.
- [27] LIU H, LI D J, XI J X, et al. Robust attitude controller design for miniature quadrotors[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(4): 681-696.
- [28] LIU H, WANG X F, ZHONG Y S. Brief paper-robust position control of a lab helicopter under wind disturbances[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2014, 8(15): 1555-1565.
- [29] DINH X, AHN K K. Adaptive tracking control of a quadrotor unmanned vehicle[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(2): 163-173.
- [30] ISLAM S, LIU P X, SADDIK A E. Nonlinear adaptive control for quadrotor flying vehicle[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 78(1): 117-133.
- (上接第 52 页)
- [8] 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(11): 2115-2119.
- [9] AGRAWAL A, CHELLAPPA R, RASKAR R. An algebraic approach to surface reconstruction from gradient fields[C]//*IEEE International Conference on Computer Vision*, 2005: 174-181.
- [10] KOVESI P. Shapelets correlated with surface normals produce surfaces[C]//*The 10th IEEE International Conference on Computer Vision*, 2005: 994-1001.