

# 基于视差角和天顶角优化的偏振多视角三维重建

张瑞华<sup>1</sup>, 施柏鑫<sup>2</sup>, 杨锦发<sup>1</sup>, 赵红颖<sup>1\*</sup>, 左正康<sup>1</sup>

(1. 北京大学地球与空间科学学院 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

2. 北京大学数字视频编解码技术国家工程实验室, 北京 100871)

**摘要:** 多视角三维重建依赖目标表面的纹理特征, 在处理低纹理区域时易出现数据空洞现象, 融合目标物反射光的偏振信息可以在不同光照环境下对其进行完整重建, 通过偏振参数计算物体表面法向量, 进而重建目标物深度图。但单独使用偏振信息重建三维表面存在方位角歧义和天顶角偏差等问题, 导致重建结果出现变形甚至得不到深度结果。针对存在低纹理区域的物体, 使用偏振相机获取30个左右视角下四个偏振角度的影像, 利用视差角参数化光束法平差方法优化相机参数与点云坐标, 泊松优化方法纠正天顶角偏差, 使用多视角立体几何与偏振信息融合的三维重建算法, 既可以弥补多视角三维点云局部数据空洞现象, 又可以解决偏振三维中方位角歧义和天顶角偏差的问题, 最终得到更加精确的三维重建结果。

**关键词:** 偏振三维重建; 光束法平差; 泊松优化; 图像融合

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## Polarimetric multi-view 3D reconstruction based on parallax angle and zenith angle optimization

ZHANG Rui-Hua<sup>1</sup>, SHI Bo-Xin<sup>2</sup>, YANG Jin-Fa<sup>1</sup>, ZHAO Hong-Ying<sup>1\*</sup>, ZUO Zheng-Kang<sup>1</sup>

(1. Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China;

2. National Engineering Laboratory for Video Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Multi-view stereo reconstruction relies on object's surface feature, and thus occurred data deficiency in dealing with low-texture regions, the polarization characteristics of the reflection light can be fused to observe completely surface under different light surroundings, which can reconstruct depth map of objects by calculating polarization parameters and normal information. However, there appears several problems such as azimuth ambiguity and zenith angle deviation using pure polarization information for 3D reconstruction, which result in distortion of the reconstruction results and even couldn't get the depth. For objects with low-texture regions, capturing images from around 30 views from four polarizing angles using polarization camera, and using parallax bundle adjustment to optimize camera parameters and points' coordinate and using poisson optimization method to correct zenith angle deviation, the 3D reconstruction algorithm combining the multi-view stereo and polarization information can not only replenish the local data deficiency of multi-view 3D point cloud, but also solve the azimuth ambiguity and zenith angle deviation, and finally get the more accurate 3D reconstruction results.

**Key words:** polarization 3D reconstruction, bundle adjustment, poisson optimization, image fusion

PACS: 42.30.Tz

## 引言

在摄影测量与计算机视觉领域, 利用二维影像

获取目标或场景空间信息的三维重建技术是一直以来的研究热点, 其在地形图立体测绘、人脸识别、机器人导航和无人驾驶等领域中得到了广泛的应

收稿日期: 2020-03-28, 修回日期: 2020-04-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503003, 2017YFB0503004)

Foundation items: Supported by National Key R&D Program of China(2017YFB0503003, 2017YFB0503004)

作者简介(Biography): 张瑞华(1996-), 女, 河南永城人, 硕士研究生, 主要研究偏振仪器、偏振图像处理及三维重建方面. E-mail: ruihua-zhang@pku.edu.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhaohy@pku.edu.cn

Received date: 2020-03-28, Revised date: 2020-04-27

用。多视角三维重建依赖于目标本身的纹理特征,通过提取与匹配特征点得到空间三维点云,再利用平差优化算法得到精确的相机外方位元素与点云三维坐标,进而得到全局坐标系下的真实深度值。然而其存在一些缺点:处理低纹理区域时容易出现局部数据空洞现象;当序列影像间夹角过小时,常规方法难以精确解算相机外方位元素和点云三维坐标,造成多视角三维点云信息与原始影像配准不精确<sup>[1]</sup>。

近年来的研究表明,对于低纹理物体,可利用偏振信息有效的进行三维重建<sup>[2-4]</sup>。由菲涅尔定理可知,当平行入射光经过物体表面反射时,物体表面的形状曲率会引起入射角度差异,进而导致反射光偏振信息差异,偏振三维重建便是利用反射光的偏振信息反求出物体形状。此外偏振“弱光强化”的特性使得即便在光源不理想的情况下仍然能获得物体信息。但单纯利用偏振信息进行三维重建时,一方面会出现法向量方位角歧义等问题,导致重建结果变形;另一方面需要获取物体折射系数,且容易受物体纹理与环境噪声影响,难以获得可靠的三维结果。故针对存在低纹理区域的目标,本文拟结合多视角与偏振三维的方法,使其优势互补:

(1) 弥补多视角点云的数据空洞。使用视差角参数化光束法平差算法优化相机外方位元素与特征点坐标,配准三维点云与偏振信息,以偏振信息弥补多视角低纹理区域;

(2) 去除偏振方位角  $\pi$  歧义。由多视角获得的物体三维解算法向量,并将对应的方位角信息纠正偏振获得的方位角;

(3) 纠正反射光混合偏振引起的天顶角偏差。以多视角获得的物体表面法向量天顶角为基准,利用泊松方程优化解算偏振获得的天顶角。

多视角三维重建利用影像之间的空间关系及共线方程对目标或场景进行三维坐标解算,其严重依赖于目标的纹理特征,故多视角立体匹配的方法在处理低纹理区域时存在缺陷<sup>[5]</sup>。为了解决低纹理区域重建问题,一种方法是结合光度立体法(PS, Photometric Stereo)<sup>[6]</sup>或结构光法(Structure light),但此方法需要预先知道光源信息且局限于室内环境成像<sup>[7]</sup>,对成像环境中杂光等影响较为敏感,其二是结合阴影法(SfS, Shape-from-Shading)<sup>[8]</sup>,利用不同方向光源下物体表面明暗变化重建三维结构,但此

方法要求预先知道每张影像的光源方向与强度,才能得到目标三维结构。偏振信息作为一种有效的辅助信息也被用于低纹理光滑物体三维表面重建工作,Koshikawa<sup>[9]</sup>最早使用偏振信息重建物体三维表面;Ghosh等<sup>[10]</sup>利用圆偏光分离反射光中镜面反射光与漫反射光,实现物体材质与形状的同时估计;Atkinson等<sup>[11]</sup>利用不同偏振角度影像重建了陶瓷物体的三维表面;Kadambi<sup>[4]</sup>和杨锦发等<sup>[12]</sup>针对低纹理高反光物体,使用RGB-D深度相机获取的粗糙深度图作为先验知识,以此来纠正偏振三维重建中的方位角歧义问题;岳春敏等<sup>[13]</sup>研究了偏振度与法向量的函数关系,并重建了透明物体的三维表面;针对使用多目立体几何结合偏振信息解算目标三维的方法,平茜茜等<sup>[14]</sup>结合双目立体视觉,提出偏振双目视觉三维重建算法,并获得目标全局坐标系下的绝对数据,但两张影像在刻画物体纹理特征时具有一定的局限性,且物体被多相机观测时需要进行全局优化,以获取精确的相机参数与点云坐标,Cui等<sup>[5]</sup>结合多视角观测信息,利用每个像素中偏振信息解决方位角  $\pi$  歧义与  $\pi/2$  歧义,可适用于多种场景,获取物体完整的三维结构,该算法结合多视角三维点云,消除方位角歧义,适用于多种材质与纹理特征的物体。本文采用多视角拍摄增加物体被观测的次数,利用视差角光束法平差算法得到精确的相机外方位元素与三维点云坐标,并以此融合偏振信息,弱化环境噪声的影响,从而获得更精确的深度重建结果;另一方面,多数研究<sup>[4, 11, 12]</sup>仅在纯镜面反射或纯漫反射的假设下进行研究,并不符合自然条件下大部分物体的反射情况。本文提出的偏振多视角三维重建方法属于被动式观测,不要求使用已知光源,可以在自然光源下和室外进行,并且考虑了一般物体反射光的混合偏振现象,不仅更适合多种材质物体的重建,还对三维点云数据空洞和偏振法向量方位角、天顶角解算具有鲁棒性。

针对偏振多视角三维重建存在的问题,本文采用视差角参数化光束法平差算法,以特征点影像坐标作为初始值,迭代优化得到精确的相机外方位元素与三维点云,将偏振信息与多视角立体几何信息精确配准,再利用多视角法向量信息去除偏振方位角歧义和纠正天顶角偏差,最后利用图像积分融合算法得到更精确的三维深度图。

## 1 原理

### 1.1 偏振三维重建原理

菲涅尔反射定律描述了当一束自然光入射至介质表面时,入射光、反射光与折射光的强度信息,是利用偏振信息进行三维重建的理论基础。如图1所示,对于大多数物体表面,反射光中包含三部分:介质表面直接反射产生的镜面反射偏振光、由介质面散射与折射光经过物体内部粒子作用再出射而产生的漫反射偏振光以及由于微小粗糙面元散射产生的无偏光,通过观测反射光中的偏振特性可以反映物体表面的形状曲率,进而可以计算得到物体表面的法向量。

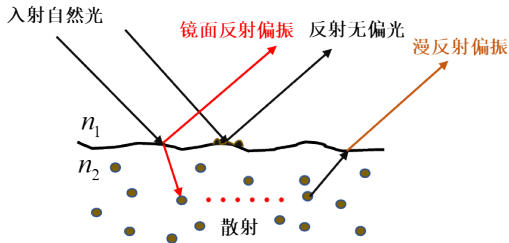


图1 一般物体表面反射混合偏振现象

Fig. 1 General object surface reflection mixed polarization phenomenon

利用偏振相机或在普通相机镜头前放置旋转偏振片可以获取不同偏振角度的影像,观测光强  $I(\theta_{pol}, \varphi)$  与偏振角度  $\theta_{pol}$  的关系为:

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

其中,  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  表示在旋转偏振片的过程中对某一点观测到的最大和最小光强,  $\varphi$  为偏振方位角,可定义当  $\theta_{pol} = \varphi$  时观测到最大亮度  $I_{\max}$ , 当  $\theta_{pol} = \varphi \pm 90^\circ$  时观测到最小亮度  $I_{\min}$ , 通过不同偏振角度下的影像可以解算偏振度(DoP, Degree of Polarization)和偏振方位角(Aop, Azimuth of Polarization)等偏振参数,如 Wolff等<sup>[15]</sup>使用  $0^\circ, 45^\circ$  和  $90^\circ$  三个角度的影像求解偏振参数,文中采用 Atkinson等<sup>[16]</sup>使用的  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$  四个角度影像求解 Stockes分量:

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}}{2}, \\ S_1 &= I_0 - I_{90}, \\ S_2 &= I_{45} - I_{135} \end{aligned}, \quad (2)$$

则偏振度  $\rho$  和偏振方位角  $\varphi$  计算方法为:

$$\rho = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} = \frac{\sqrt{(I_0 - I_{90})^2 + (I_{45} - I_{135})^2}}{\frac{1}{2}(I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135})}, \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan_2(S_2, S_1) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{I_{45} - I_{135}}{I_0 - I_{90}}$$

其中,  $I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}$  表示  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$  方向上线偏振光的强度。

物体表面形状信息可以通过每一点的法向量描述,默认法向量的模长为1,法向量  $\mathbf{n}$  由方位角  $\alpha$  和天顶角  $\theta$  表示,其中方位角的阈值为  $[-\pi, \pi]$ ,天顶角的阈值为  $[0, \pi/2]$ ,法向量表示为:

$$\mathbf{n}_p = [n_{xp}, n_{yp}, n_{zp}]^T = [\sin\alpha_p \sin\theta_p, \cos\alpha_p \sin\theta_p, \cos\theta_p]^T, \quad (4)$$

记  $n$  为物体表面折射系数,对于镜面反射偏振,由偏振方位角  $\varphi$  计算法向量方位角  $\alpha$  的公式为:

$$\alpha = \varphi + \frac{\pi}{2} \text{ 或 } \varphi + \frac{3\pi}{2} \quad (5)$$

利用偏振度  $\rho$  计算天顶角  $\theta$  的公式为:

$$\rho_s = \frac{2 \sin^2 \theta \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 - \sin^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 2 \sin^4 \theta} \quad (6)$$

对于漫反射偏振,方位角与天顶角为:

$$\alpha = \varphi \text{ 或 } \varphi + \pi \quad (7)$$

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

由此可以通过不同偏振角度的影像得到物体表面各点的法向量,进而通过积分算法得到物体深度图。

### 1.2 视差角参数化

光束法平差是空中三角测量最严密的解法,以单个相机中心投影成像光束为模型,利用相机的旋转平移和点位共线方程解算精确的相机外方位元素与点云三维坐标,但经典的直角坐标方法针对近景、短基线影像序列解算问题,一方面难以直接表达物体的深度信息,另一方面影像间交角过小时容易出现平差解算法方程病态解,导致平差精度差甚至发散的现象。为了能准确表达观测到一次和多次的特征点,又不受景深远近变化的限制, Sun等<sup>[1]</sup>提出一种视差角参数化特征点表示法,使用特征点在相机坐标系下方位角、高程角和视差角代替长度  $X, Y, Z$  表示特征点坐标,如图2,假设物点被两个相机观测时,选取第一个相机为主相机,第二个相机为副相机,相机成像中心连线为摄影基线,即相机

运动参考方向;相机坐标系定义为:以相机成像中心为原点,向右为 $x$ 轴,以相机成像中心指向目标方向为 $z$ 轴,按照右手系定义 $y$ 轴,方位角 $\phi$ 为观测向量与 $z$ 轴夹角,高程角 $\theta$ 为观测向量与基线的夹角,两个相机观测光线的夹角为该点的视差角 $\omega$ ,视差角在平差过程中保持不变,且可降低特征点间相似度,避免平差发散。

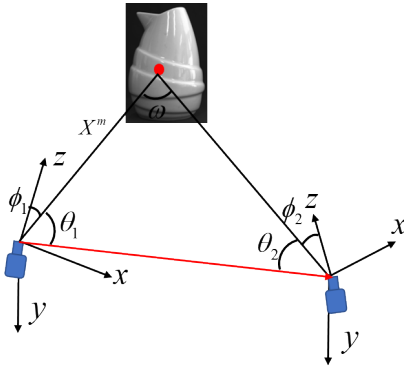


图2 视差角参数化特征点表达示意图

Fig. 2 Schematic representation of parallax angle parameterized feature points

则此特征点坐标表示为:

$$F = (\theta, \phi, \omega)^T \quad (9)$$

相机对特征点的观测向量可以直接表达深度信息,其主相机对特征点的观测向量使用方位角和高程角表示为:

$$X^m = [\sin\phi_1 \cos\theta_1 \quad \sin\theta_1 \quad \cos\phi_1 \cos\theta_1]^T \quad (10)$$

### 1.3 偏振多视角三维重建存在的问题

使用多视角影像重建物体三维表面,处理低纹理区域时会出现局部数据空洞现象,偏振信息可以提供物体表面完整法向量信息,其方位角歧义和天顶角偏差的问题可以从多视角法向量中得到解决,但将多视角立体三维点云与偏振信息融合进行物体三维重建存在以下问题:

(1)相机外方位元素与点云三维坐标优化:为了将多视角立体几何信息与偏振信息配准,同时避免不同坐标系之间转换误差累积,需要使用全局平差优化算法获得精确的相机外方位元素和点云坐标,进而得到全局坐标系下绝对深度值。

(2)偏振方位角 $\pi$ 歧义:对于镜面反射偏振而言, $\varphi + \frac{\pi}{2}$ 与 $\varphi + \frac{3\pi}{2}$ 均为方位角 $\alpha$ 的解,对于漫反射偏振, $\varphi$ 和 $\varphi + \pi$ 均为方位角的解,故直接由公式(5)和(7)求得的方位角存在 $\pi$ 歧义。如图3所示,

以陶瓷花瓶为例,使用偏振相机获得 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 $135^\circ$ 四个角度下的原始影像(a),首先利用偏振影像求得天顶角(c)和偏振方位角(e),得到偏振法向量(f),(d)为FC(Frankot-Chellappa)算法<sup>[17]</sup>重建的三维表面,(g)为Shapelet算法<sup>[18]</sup>得到的三维表面,可以观察到相对于真实物体,重建结果出现变形,左右两边显示深度值失真,且大致呈现以中心轴对称相反的变形趋势,表明偏振方位角在一些区域内存在着 $\pi$ 歧义。

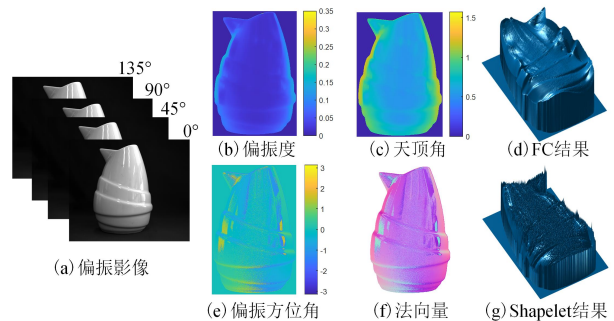


图3 陶瓷花瓶纯偏振三维重建结果(a)偏振影像,(b)偏振度,(c)天顶角,(d)FC结果,(e)偏振方位角,(f)法向量,(g)Shapelet结果

Fig. 3 Polarization 3D reconstruction results of ceramic vase (a) polarization images, (b) degree of polarization, (c) zenith angle image, (d) the result of FC algorithm, (e) polarized azimuth angle image, (f) normal image, (g) the result of Shapelet algorithm

(3)天顶角偏差:自然条件下真实物体反射光属于镜面反射偏振和漫反射偏振引起的混合偏振光,如图4显示了不同反射类型偏振度与天顶角之间的关系,对于纯镜面反射偏振(a),当偏振度一定时,存在天顶角偏差,且对于不同的折射率差异不大;对于纯漫反射偏振(b),偏振度与天顶角是一一对应关系,不存在天顶角偏差,故针对一般物体实际反射情况,考虑混合偏振现象时需要纠正天顶角偏差。

## 2 技术路线与数据预处理

### 2.1 整体技术路线

针对存在低纹理区域的物体,提出偏振多视角三维重建方法。如图5,首先对相机进行定标得到相机内方位元素,在不同视角下获取不同偏振角度的原始影像(a),再使用SfM(Structure-from-Motion)<sup>[19]</sup>算法提取匹配影像特征点,得到像点坐标和相机参数的初始值(b),把像点初始坐标作为输入,

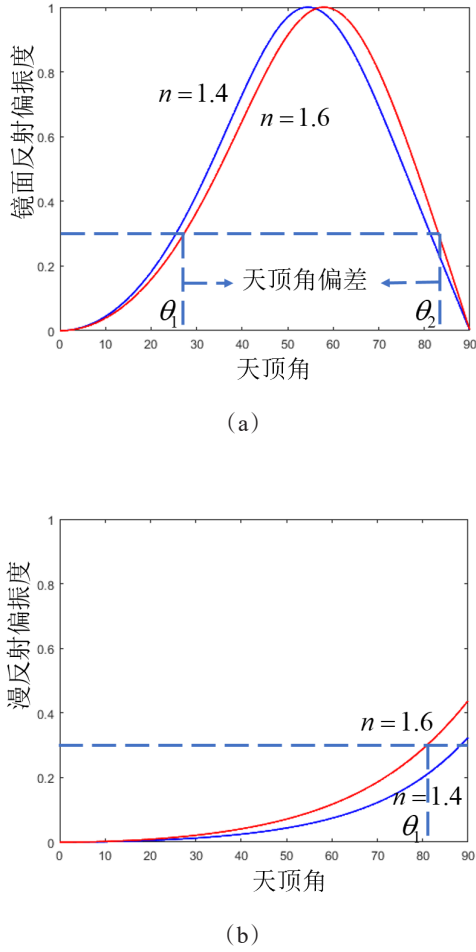


图4 偏振度与天顶角的关系(a)纯镜面发射偏振,(b)纯漫反射偏振

Fig.4 Relationship between polarization degree and zenith angle (a) Pure specular emission polarization, (b) Pure diffuse emission polarization

利用视差角参数化光束法平差方法对特征点坐标和相机参数进行交替迭代优化,得到精确的三维点云与相机外方位元素,通过三维点云与某一视角下相机旋转与平移矩阵得到该视角下的法向量(c),直接积分得到多视角深度图(d);然后,利用该视角下经过畸变校正的偏振影像计算偏振度和偏振方位角,得到天顶角和方位角(e),通过边缘传播算法去除偏振方位角 $\pi$ 歧义性,泊松优化方法纠正天顶角偏差,得到纠正的偏振法向量(f),(g)是使用FC算法对纠正法向量重建得到的三维表面,最后,以多视角深度图作为基础,结合图像融合积分算法,以偏振信息的完整性弥补了多视角在低纹理区域存在数据空洞的现象,使最终获得的物体三维表面(h)更加精确与完整。

## 2.2 相机定标与三维点云获取

实验使用Lucid Phoenix系列偏振相机获取灰度偏振图像,该相机采用覆盖防反射材料来抑制闪光和重影的气隙纳米线栅作为线偏振阵列层,偏振片按四个角度( $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $135^\circ$ )放置于单个像元上,每四个像元一组作为一个计算单元,单角度偏振影像分辨率为 $1024 \times 1224 \text{ pixel}$ ,由于四张偏振影像实际成像中心不一致,为了得到相同的畸变校正影像,需要对四个角度融合影像进行预定标。

相机定标采用张正友棋盘格定标法<sup>[20]</sup>,偏振相机获取一系列棋盘格影像,并得到融合影像,通过棋盘格角点的配准与计算,特征点的像素坐标 $(u, v)$ 和影像坐标 $(x, y)$ 之间存在尺度和平移关系,即通过定标获取相机内方位元素和实际相主点坐标:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中, $f_x, f_y$ 为坐标系之间尺度参数, $u_0, v_0$ 为实际相主点与理论相主点的偏离值, $k$ 为相机预定标矩阵,实验中使用的 $k$ 为:

$$k = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1850.0 & 0 & 601.1 \\ 0 & 1846.1 & 516.8 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

用偏振相机在不同视角下对物体成像,进而获取融合影像,SfM特征点提取匹配算法可以获得相机初始外方位元素和像点坐标,将特征点初始坐标作为输入值,利用自由网光束法平差优化算法得到精确的相机外方位元素和三维点云坐标,经过密集匹配生成多视角稠密三维点云,结合相机预定标参数,输出无畸变影像,可利用相机外方位元素计算每个相机相对于第一个相机的旋转矩阵和平移量,将偏振信息与多视角三维点云信息配准,有利于偏振信息与多视角信息的融合积分。

## 3 融合多视角立体几何信息的偏振三维重建

### 3.1 方位角纠正:去除方位角 $\pi$ 歧义

单目视觉影像不能准确地判断物体远近,即不能直接获取物体的深度信息,观测物体不同位置反射光的偏振特性可以获取物体表面法向量,进而重建出三维深度图。由1.3节可知偏振影像获得的偏振方位角与实际物体真实法向量方位角之间存在 $\pi$

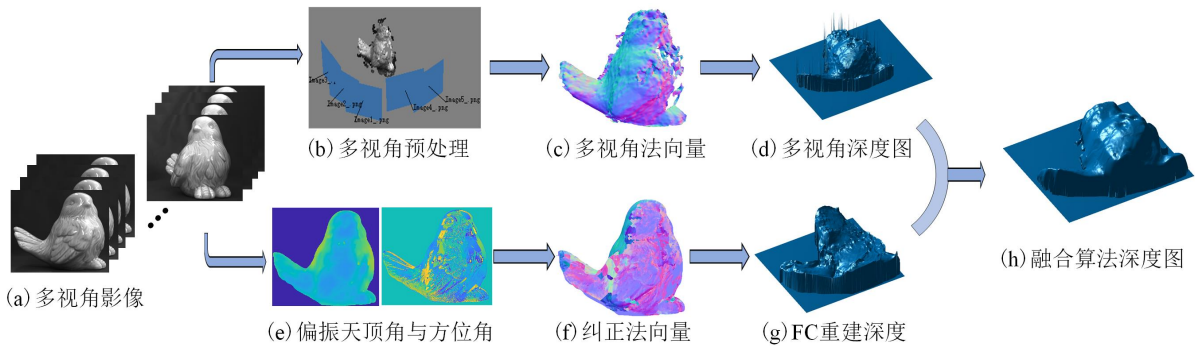


图5 整体技术路线图(a)多视角影像,(b)多视角预处理,(c)多视角法向量,(d)多视角深度图,(e)偏振天顶角与方位角,(f)纠正法向量,(g)FC重建深度,(h)融合算法深度图

Fig. 5 Overall technology flowmap (a) multi-view images, (b) multi-view images preprocessing, (c) normal obtained from multi-view images, (d) depth map obtained from multi-view images, (e) polarization zenith and azimuth angle, (f) corrected normal, (g) depth map by using FC algorithm, (h) depth map from fusion algorithm

歧义,使用边缘传播算法初步校正 $\pi$ 歧义,如图6所示,设想在同一深度圆周上的点具有相同的方位角解算方法,在等深圆周上外围选取种子点向里迭代,根据不同区域方位角取值范围进行校正,但此方法对于非对称物体容易误判;多视角影像可多次观测同一物点,通过影像间空间关系和共线方程求得物方点三维坐标,并得到物体真实深度信息,再由深度图反算得到真实法向量。多视角法向量不存在方位角歧义和天顶角偏差,均是在全局坐标系中的唯一值,故以多视角法向量为基础,进一步去除偏振法向量方位角的 $\pi$ 歧义。

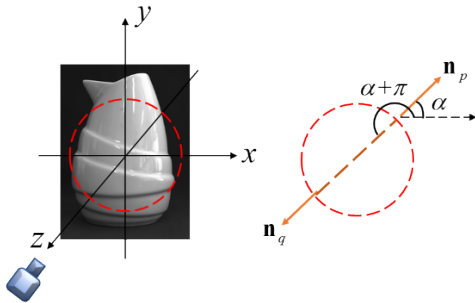


图6 边缘传播算法

Fig. 6 Edge propagation algorithm

### 3.2 泊松优化:纠正天顶角偏差

在垂直观测的平面区域,由于偏振度小,噪声影响更大,理论上偏振度应为0,但实际测量中,夹杂周围环境噪声和相机系统噪声的影响,偏振度无法得到零值,对于漫反射物体,其天顶角计算就会存在较大的初始值,图7(a)为花瓶天顶角与偏振度的计算关系。此外,由偏振度计算天顶角需要有确

切的反射系数( $n$ ),对于不同的 $n$ 取值,求得的天顶角不同,图7(b)为漫反射物体不同反射系数时,偏振度与天顶角的仿真曲线。

针对以上两个问题,本文利用粗糙深度图计算得到的天顶角,采用泊松方程<sup>[21]</sup>纠正偏振得到的天顶角。

$$\theta_c = \arg \min \iint_{\Omega} \|\nabla \theta_c - v\|^2, \quad s.t. \theta_p|_{\partial\Omega_p} = \theta_d|_{\partial\Omega_d}, \quad (13)$$

其中 $\Omega$ 为图像的整个区域, $\theta_c, \theta_p, \theta_d$ 分为天顶角纠正后的结果、偏振图像求解得到的天顶角、深度图解算得到的天顶角。 $v$ 为重合区域的梯度场。由欧拉-拉格朗日方程,可将式(13)转换为满足Dirichlet边界条件的泊松方程

$$\nabla^2 \theta_c = \nabla \cdot v, \quad s.t. \theta_p|_{\partial\Omega_p} = \theta_d|_{\partial\Omega_d}, \quad (14)$$

其中 $\nabla^2 \theta_c = \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial y^2}$ 是Laplacian算子, $\nabla^2 v = \frac{\partial \theta_c}{\partial x} + \frac{\partial \theta_c}{\partial y}$ 为散度。通过对偏振获得的方位角去奇异,及天顶角纠正,可以获得目标物准确的法向量,法向量是物体能否准确表面重建的前提。

### 3.3 积分融合:参数优化与深度重建

光束法平差算法利用特征点初始影像坐标作为输入,相机外方位元素和点云三维坐标为未知数,通过交替迭代优化得到精确的相机参数与加密点云坐标。物体深度信息来源于视差角 $\omega$ ,当特征点被不同相机观测到时,每一个相机成像中心到特征点的观测向量 $X$ 可以直接地表达深度信息,特征点在第 $i$ 张影像中被观测到,影像坐标为 $(u^i, v^i)$ ,则观测方程为:

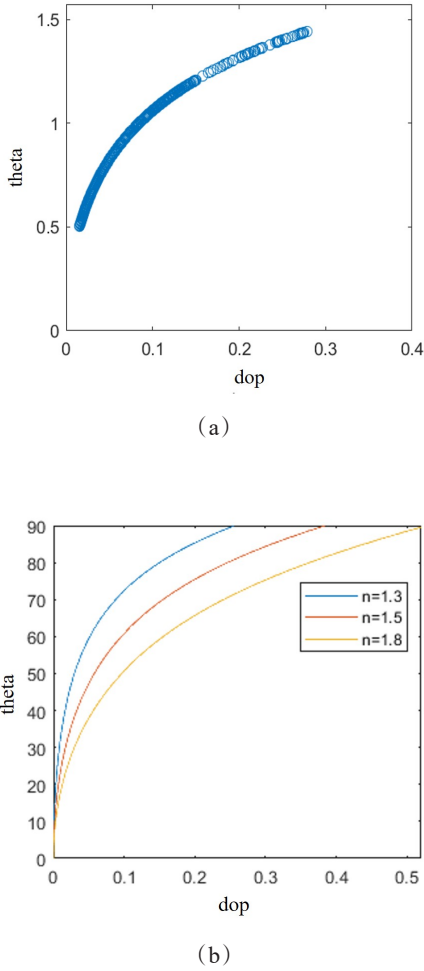


图7 天顶角求解存在的问题(a)花瓶偏振度与天顶角的关系,(b)不同n取值偏振度与天顶角关系

Fig.7 The problem of calculating zenith angle (a) the relationship between dop and zenith angle (theta) (the vase),(b) the relationship between dop and zenith angle (theta) under different n value

$$\begin{cases} u^i = \frac{x^i}{t^i} \\ v^i = \frac{y^i}{t^i} \end{cases}, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ t^i \end{bmatrix} = \begin{cases} kRX^m & i = m \\ kR \sin \omega X' & i \neq m \end{cases}, \quad (16)$$

其中,  $R = (X, Y, Z, \Omega, \Phi, K)$  为相机外方位元素, 即该相机相对于第一个相机的平移和旋转矩阵,  $k$  为相机内定标矩阵,  $[x^i \ y^i \ t^i]^T$  为观测方程,  $m$  表示第一次观测到该点的相机,  $i$  表示其他观测到该点的

相机。

光束法平差的数学本质是非线性最小二乘优化, 将相机外方位元素和点云坐标作为未知数  $X = [X, Y, Z, \Omega, \Phi, K, \phi, \theta, \omega]$ , 特征点影像坐标为  $z = [u, v]$ , 影像权重为  $Q^{-1}$ ,  $f(X)$  为观测方程, 即公式(16), 则光束法平差的目的就是通过迭代优化估计出最佳的未知数使目标函数最小:

$$\|\varepsilon\|_{Q^{-1}}^2 = (z - f(X))^T Q^{-1} (z - f(X)) \quad (17)$$

由于在平差的过程中将平面参量与高程参量采用不同量纲表达, 且对于特征点而言, 视差角在平差优化的过程中保持不变, 这降低了特征点参量之间的相关性, 避免平差中出现法方程奇异, 进而避免结果发散, 得到精确的相机外方位元素和三维点云坐标, 进一步提高多视角几何信息与偏振信息配准精度。

之后利用相机参数将偏振信息与多视角三维点云配准, 并得到不同视角下融合法向量图; 由法向量重建物体三维表面是一个积分过程, 除了需要边界条件限制, 图像里的噪声、畸变等都会导致积分结果的错误, 文中利用多视角立体几何信息作为基础, 融合偏振信息, 定义两个最小化能量项: 点误差  $E_p$  和法向量误差  $E_n$ , 并引入权重参数  $k$ , 表示多视角信息与偏振信息分别在最终三都结果中所占的比重, 则最终结果会随着  $k$  值的变化而变化, 如对于三维点云数据空洞的区域, 偏振信息无高反光的的情况下, 较大比重的偏振信息可以弥补数据空洞带来的数据不连续的现象; 使用的积分融合算法其数学本质是利用最小二乘法优化使得点位误差  $E_p$  和法向量误差  $E_n$  最小, 对应的优化方程为:

$$\arg \min_{\Omega} KE_p + (1 - K)E_n, \quad (18)$$

其中,  $k$  为  $[0, 1]$  之间的参数, 表示多视角信息与偏振信息的比重。

#### 4 实验结果与分析

针对存在低纹理区域的物体, 选用陶瓷花瓶, 塑料地球仪, 树脂火烈鸟和树脂小鹿等物体进行, 拍摄环境为白天室内。其中, 陶瓷花瓶在局部易形成高反光区域, 地球仪纹理丰富易影响偏振信息, 火烈鸟和小鹿的三维点云均存在局部数据空洞, 四种材质物体都存在混合偏振。本算法能够优化物体表面折射系数, 选择不同材质的物体可以验证算法对不同材质物体三维重建的鲁棒性。

法向量的精度和完整性是深度重建结果的重要因素,现有的偏振三维重建算法受拍摄环境噪声和物体本身材质与纹理的影响,会出现即便得到偏振参数和法向量也无法积分得到深度图的情况。图8为法向量结果,第一列是偏振原始影像,直观地展示所拍摄物体的环境与表面纹理情况;第二列为扫描仪获得的结果作为真值,扫描仪结果精度为0.1mm;第三列是由偏振影像直接解算偏振参数得到的法向量;第四列为本文融合了多视角信息,去除了方位角 $\pi$ 歧义和纠正了天顶角偏差后的法向量;第五列为文献[22]中算法得到的结果;第六列为文献[23]算法得到的结果,结果与真值的误差以MAE(Mean Absolute Error)表示,即真值法向量与求解法向量之间夹角绝对值的平均值,单位为度。观察结果可以发现,本文融合了多视角三维点云的法向量结果与扫描仪真值最为接近,整体数值呈现过渡趋势。

图9为三维深度重建结果,第一列是扫描仪获

得的结果作为真值;第二列为经典FC算法对纯偏振信息重建得到的深度图,由于对环境噪声和物体本身材质与纹理敏感,容易出现无法得到深度图的现象;第三列为多视角信息直接积分得到的多视角立体观测深度图,陶瓷花瓶使用了22张影像,地球仪使用了13张影像,火烈鸟使用了34张影像,小鹿使用了37张影像,为了更好的展示,经过了一定的可视化处理;第四列为融合多视角的重建结果,即本文算法得到的最终深度值;第五列为文献[24]中梯度积分重建算法得到的结果,可以发现,此结果有较大形变,尤其是花瓶与地球仪;第六列为文献[18]中Shapelet算法得到的结果,此算法能避免方位角歧义问题,但对噪声敏感,容易出现毛刺,结果误差以MAE表示重建点深度与真实点深度误差绝对值的平均值,单位为mm。由于积分算法在未设定边界初始值时,重建结果会存在一定初始偏差,可能会影响MAE的评判结果,因此引入相关系数 $r$ (Correlation Coefficient)来辅助评判结果与真实值的相

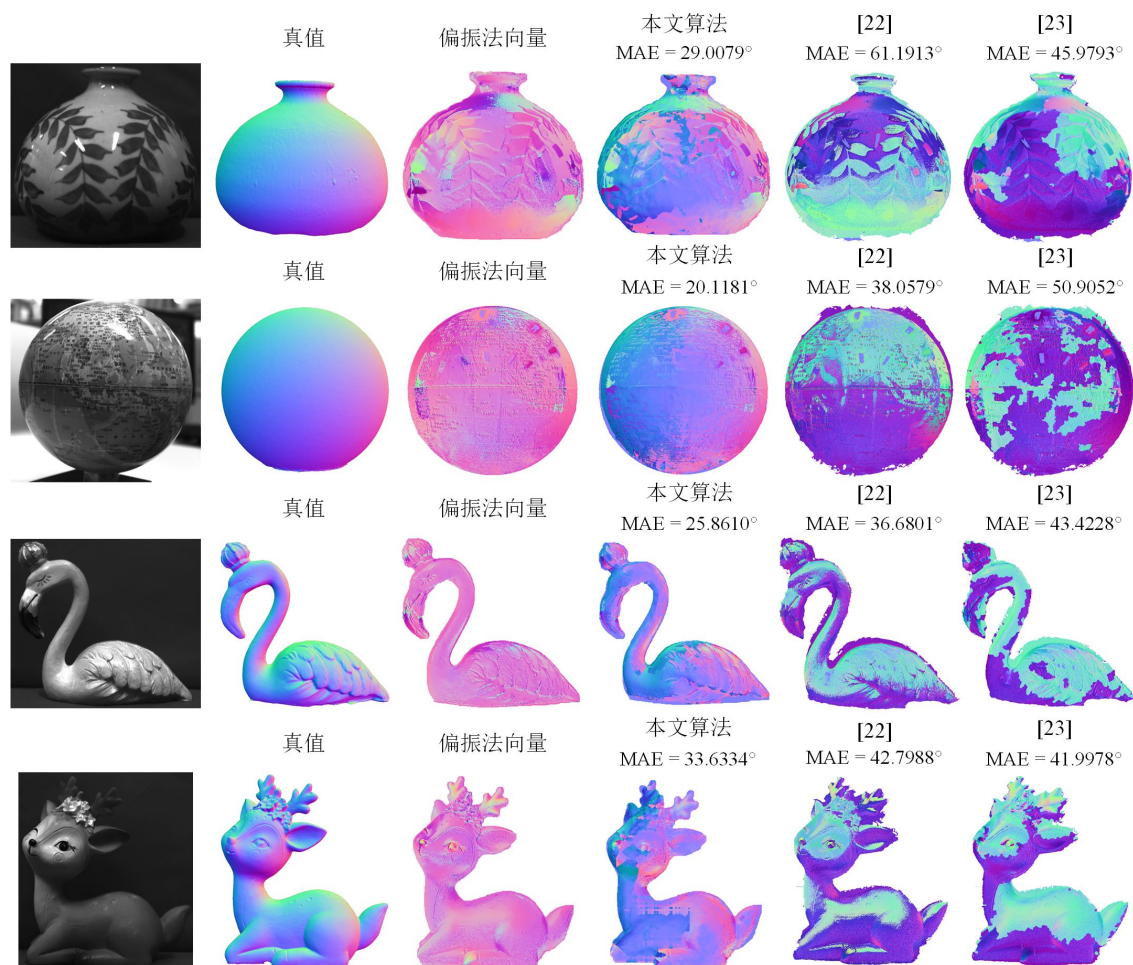


图8 法向量结果

Fig. 8 Normal vector results



似程度。MAE 越高说明结果整体与真值相差较大,  $r$  越高说明重建形状与真值越接近。可以发现, 偏振参数存在方位角  $\pi$  歧义和天顶角偏差, 直接重建得到的结果往往出现左右两侧深度失真, 利用多视角立体几何得到的法向量作为基础, 可以解决此类问题, 对于局部低纹理区域, 偏振信息的完整观测可以弥补多视角三维点云出现数据空洞。

## 5 结论

结合多视角立体观测信息, 可以优化偏振三维重建的结果。针对偏振存在的方位角  $\pi$  歧义和天顶角偏差问题, 多视角立体观测法向量可以消除方位角歧义, 由混合偏振引起的天顶角偏差, 采用泊松融合的方法纠正, 使得此方法适用于更多材质更复杂环境下的重建任务, 而偏振信息的完整性弥补了多视角对物体纹理特征的依赖, 得到融合立体观测和偏振信息的三维重建深度图。

在使用光束法平差全局优化相机外方位元素

和三维点云坐标时, 可以得到所有相机的参数, 而三维点云其固有的立体特征可以进一步获取各个视角下的法向量与深度值, 下一步考虑结合三维拼接技术与视频处理技术, 获取 360 度全方位三维重建结果和视频三维重建。

## References

- [1] Sun Y, Sun H, Yan L, *et al.* RBA: Reduced Bundle Adjustment for oblique aerial photogrammetry [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, **121**: 128-142.
- [2] Atkinson G, Hancock E. Polarization-based surface reconstruction via patch matching [C]. In Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2006, **1**: 495-502 (Logothetis, F., Mecca, R., Sgallari, F., Cipolla, R.: A differential approach to shape from polarisation: A level-set characterisation [J]. *International Journal of Computer Vision*). 2019, **127**(11-12): 1680 - 1693
- [3] Atkinson G A. Polarisation Photometric Stereo [J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2017, **160**: 158-167.
- [4] Kadambi A., Taamazyan V., Shi B., Raskar R.: Depth

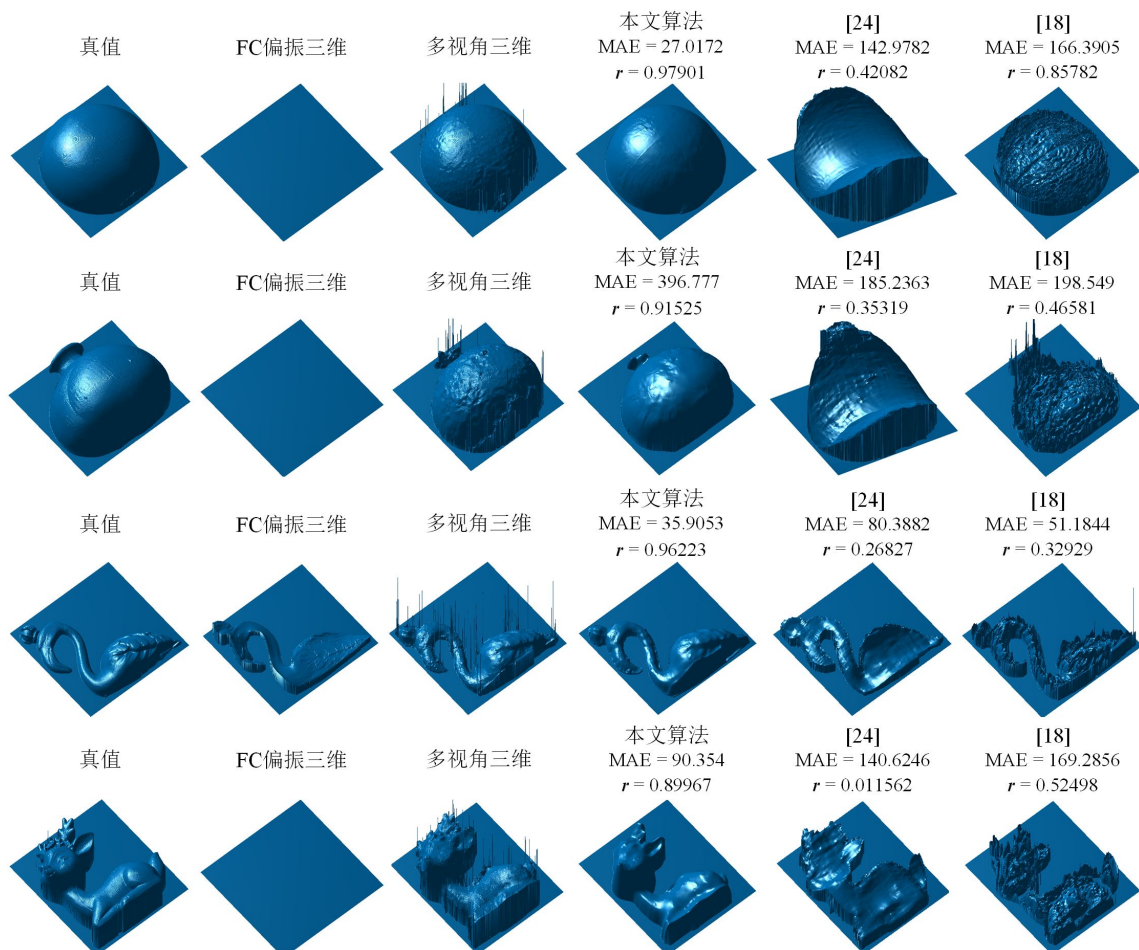


图9 表面重建结果

Fig. 9 Surface reconstruction results

- sensing using geometrically constrained polarization normals [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2017, **125**(1-3): 34-51
- [5] Cui Z, Gu J, Shi B, *et al.* Polarimetric multi-view stereo [C]. In Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017:1558-1567.
- [6] Shi B, Mo Z, Wu Z, *et al.* A Benchmark Dataset and Evaluation for Non-Lambertian and Uncalibrated Photometric Stereo [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, **41**(2): 271-284.
- [7] Nehab D, Rusinkiewicz S, Davis J, *et al.* Efficiently combining positions and normals for precise 3D geometry [J]. *ACM transactions on graphics (TOG)*. 2005, **24** (3) : 536-543.
- [8] Atkinson G A, Hancock E R. Shape estimation using polarization and shading from two views [J]. *IEEE transactions on pattern analysis machine intelligence*, 2007, **29** (11) : 2001-2017.
- [9] Koshikawa K. A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects [C]. In Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence, 1979: 493-495.
- [10] Ghosh A, Chen T, Peers P, *et al.* Circularly polarized spherical illumination reflectometry [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2010, **29**(6): 162.
- [11] Atkinson G A, Hancock E R. Multi-view surface reconstruction using polarization [C]. In Proceedings of International Conference on Computer Vision, 2005, **1**:309-316.
- [12] Yang J, Yan L, Zhao H, *et al.* Shape from Polarization of low-texture objects with rough depth information[J]. *J. Infrared Millim. Waves.*(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. *红外与毫米波学报*)2019, **38**(6): 819
- [13] Yue C, Yang J, Li Z, *et al.* 3-D surface reconstruction based on polarization analysis [J]. *Journal of Applied Optics.* (岳春敏, 杨进华, 李志宏, 等. 一种基于偏振解析的三维表面重建方法. *应用光学*)2008(06): 844-848
- [14] Ping X, Liu Y, Dong X, *et al.* 3-D reconstruction of textureless and high-reflective target by polarization and binocular stereo vision [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (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. *红外与毫米波学报*) 2017, **36** (04): 432-438
- [15] Wolff L B. Polarization vision: a new sensory approach to image understanding [J]. *Image Vision computing*, 1997, **15**(2): 81-93.
- [16] Atkinson G A, Hancock E R. Surface reconstruction using polarization and photometric stereo [C]. In Proceedings of International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns. 2007: 466-473.
- [17] Frankot R T, Chellappa R. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms [J]. *IEEE Transactions on pattern analysis machine intelligence*, 1988, **10** (4): 439-451.
- [18] Kovese P. Shapelets correlated with surface normals produce surfaces [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2005, **2**:994-1001.
- [19] Wu C. Towards linear-time incremental structure from motion [C]. In Proceedings of International Conference on 3D Vision, 2013:127-134.
- [20] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [21] Pérez P, Gangnet M, Blake A. Poisson image editing [M]. ACM SIGGRAPH, 2003:313-318.
- [22] Mahmoud H. A, El-Melegy, *et al.* Direct method for shape recovery from polarization and shading [J]. *Image Processing (ICIP)*, 2012.
- [23] Miyazaki D., Tan, *et al.* Polarization-based inverse rendering from a single view [J]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2003.
- [24] Agrawal A, Raskar R, Chellappa R. What is the range of surface reconstructions from a gradient field? [C]. In Proceedings of European conference on computer vision, 2006:578-591.