文章编号:1001-9014(2019)06-0819-09

DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2019.06.020

融合粗糙深度信息的低纹理物体偏振三维重建

杨锦发^{1,2}, 晏 磊^{1,2}, 赵红颖^{1,2*}, 陈 瑞^{1,2}, 张瑞华^{1,2}, 施柏鑫^{3*} (1.北京大学空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室,北京 100871; 2.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; 3.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:对于表面光滑、低纹理的目标,传统基于多视几何重建的算法难以获得理想的结果,利用偏振信息来重建这 类物体是便捷有效的方法之一. 然而单纯利用偏振信息进行三维重建存在歧义性等问题,难以获得理想的结果. 以粗糙深度图作为先验信息可解决歧义性问题. 先对偏振相机与深度相机标定并配准图像,由粗糙深度图获得的 法向量辅助纠正偏振方位角歧义,再利用纠正的法向量与粗糙深度图积分融合,从而获得较高精度的物体三维 表面.

关 键 词:三维重建;低纹理物体;偏振;图像融合 中图分类号:TP391 **文献标识码:** A

Shape from Polarization of low-texture objects with rough depth information

YANG Jin-Fa^{1,2}, YAN Lei^{1,2}, ZHAO Hong-Ying^{1,2*}, CHEN Rui^{1,2}, ZHANG Rui-Hua^{1,2}, SHI Bo-Xin^{3*} (1. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and 3S Application, Peking University, Beijing 100871, China;

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

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

Abstract: For the smooth surface and low-texture target, the traditional multi-view geometry reconstruction algorithm was difficult to obtain the ideal result. However, it is difficult to obtain ideal results by simply using the polarization information for three-dimensional reconstruction with ambiguity problem. Using the rough depth map as a prior information can solve the azimuth ambiguity problem. Firstly, calibrated and aligned the polarized camera and the depth camera, and used the normal vector obtained by the rough depth map to correct the polarization azimuth ambiguity, then integrated the corrected normal vector with the rough depth map to obtain a high-precision three-dimensional surface of the object.

Key words: 3D reconstruction, low-texture object, polarization, image fusion PACS:42. 30. Tz

引言

三维重建在航空观测、计算机视觉等领域中占 有重要地位,如地表地貌的立体测绘、多目立体视 觉中目标识别与三维表面恢复,目标运动参数获取 等技术^[1-2],大多依赖于物体表面的纹理特征进行识 别,但是实际任务中会经常遇到低纹理甚至无纹

收稿日期:2019-05-14,修回日期:2019-09-19 **Received date**:2019-05-14,**Revised date**:2019-09-19 基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0503004),国家自然科学基金(41842048) Foundation items Summer date National View P&D Parameter of Chine (2017VEP0502000) National National Science Foundation of Chine

Foundation items:Supported by National Key R&D Program of China(2017YFB0503000), National Natural Science Foundation of China(41842048) 作者简介(Biography):杨锦发(1995-),男,福建漳州人,硕士研究生,主要研究偏振仪器、偏振图像处理及三维重建.E-mail:jinfayang@pku.edu.cn *通讯作者(Corresponding author): E-mail: shiboxin@pku.edu.cn,zhaohy@pku.edu.cn

理、表面光滑易产生高反光的物体,传统的三维重 建算法针对此类物体会出现大面积的数据空洞,无 法获得完整的表面,即便是基于结构光的重建算法 在遇到大面积耀光时也无法得到精确的深度信息, 故开展针对低纹理高反光物体表面的三维重构算 法具有重要意义.

近年来的研究表明,通过观测物体表面反射光 中的偏振特性,可以获得物体的形状信息,且偏振 所具有的"弱光强化,强光弱化"特性,使得即便外 界光源不理想,仍然能得到较为清晰的偏振信息, 从而进行三维表面恢复. 三维重建的方法大致可以 分为两种,一种是利用三维激光扫描仪等直接获取 测区及环境的三维点云,这种方法精度较高,但是 作业时间长,设备昂贵,受限于物体尺寸和材质;另 一种是基于视觉的重建方法,多目立体视觉通过提 取多张影像的特征点并匹配同名像点[3],然后利用 影像间的几何关系重建三维表面[4],明暗恢复法 (Shape From Shading, SFS)^[5]利用单张影像的明暗 变化获取物体形状信息,认为灰度值与表面不同位 置反射光强弱有关,光度立体法(Photometric Stereo, PS)^[6]通过改变入射光源得到多幅明暗不同的 影像,利用目标表面同一个像素点在不同影像中的 亮度信息得到几何信息,但是这些方法都要求已知 光源的方向与强度等,不能很好的适用于大多数情 况. 基于偏振信息的三维重构方法不依赖物体的纹 理特征,同时又能很好地抑制耀光,对低纹理、高反 光的物体也能获得完整的三维表面形态. Koshikawa^[7]最早将偏振视觉引入三维重建领域;S. Rahmann和N. Canterakis等^[8]针对绝缘体反射光的偏振 信息首次提出了完整的偏振三维重建算法;Ghosh 等阿利用圆偏光分离了漫反射与镜面反射,完成了 物体材质和形状的同时估计;Miche^[10]设计一种特定 的视觉系统,可实现偏振图像采集与处理,通过积 分过程实现三维重建;Kadambi等^[11]融合了Kinect 得到的粗深度图和偏振图像得到的法向量,得到了 较高精度的三维重建结果. 该文章出发点与本文较 为相似,但本文使用较少的偏振图像,对方位角处 理和积分算法更简单高效,并且将结果与扫描仪真 值进行了对比分析.国内近年来也开展了偏振三维 重建技术的研究,平茜茜等^[12]结合双目立体视觉, 提出偏振双目视觉三维重建算法,并获得目标的世 界坐标系下绝对数据;岳春敏等[13]提出利用解析反 射光偏振图像重建透明物体三维表面的方法,并推 导偏振度与表面法向量得函数关系,构建三维重建 算法;彭群聂等^[14]针对视觉任务中表面光滑低纹理 的目标,提出多尺度Shapelets算子获取有效深度信 息,恢复三维形状.

针对偏振重建时存在的方位角歧义,本文先利 用边缘传播算法进行粗纠正,再通过比较粗糙深度 图的方位角偏差,重新对偏振信息获得的方位角进 行估值;针对目前尚未有完善的梯度积分算法,本 文采用融合深度图的表面三维重建算法,重建出较 高精度的物体表面.

1 偏振三维重建

1.1 偏振三维重建原理

1809年,法国科学家马吕斯在双折射晶体的实验中发现了光的偏振现象,进一步证实光是横波^[15].偏振光可利用Stokes矢量来描述,使用四个参量表示光的强度和偏振信息,得到Stokes矢量需要三个及以上偏振角度的光强信息(本文采用四个角度来测量),在成像系统前放置线偏振片,通过调节偏振片的角度θ_{polar},光强*I*(θ_{polar},φ)与角度的关系为正弦函数如式(1)所示.

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

其中,光矢量沿垂直方向上的振动占优势,光强为 I_{max} ,与其垂直方向处于劣势,光强为 I_{min} , φ 为偏振方 位角,偏振度(DoP, Degree of Polarization)为:

$$\rho = \frac{\sqrt{(I_0 - I_{90})^2 + (I_{45} - I_{135})^3}}{\frac{1}{2} (I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135})} \qquad . \tag{2}$$

偏振相位角(AoP, Angle of Polarization)为:

$$\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{I_{45} - I_{135}}{I_0 - I_{90}} \qquad , \quad (3)$$

其中,*I*₀, *I*₄₅, *I*₉₀, *I*₁₃₅表示 0°、45°、90°和135°方向上 线偏振光的强度.

三维重建的关键在于获得物体表面准确的法向量,法向量使用其天顶角θ和方位角α表达.对于 镜面非导电物体,天顶角与偏振度的关系为:

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

其中n为物体表面的折射系数.对于金属导电物体,天顶角与偏振度的关系为:

$$\rho = \frac{2n\tan\theta\sin\theta}{\tan^2\theta\sin^2\theta + |n^*|} \qquad , \quad (5)$$

其中 $|n^*| = n^2(1 + \kappa^2), \kappa$ 为材料的衰减系数.图1为两类物体天顶角与偏振度的仿真曲线.



图 1 偏振度与天顶角仿真曲线



方位角与偏振方位角的关系为: $\alpha = \varphi \, \ensuremath{\mathbf{g}} \, \alpha = \varphi + \pi$. (6)

$$\vec{n} = \begin{cases} -\frac{\partial f(x,y)}{\delta x} \\ -\frac{\partial f(x,y)}{\delta y} \\ 1 \end{cases} = \begin{cases} -z_x(x,y) \\ -z_y(x,y) \\ 1 \end{cases} = \begin{cases} \tan\theta\cos\alpha \\ \tan\theta\sin\alpha \\ 1 \end{cases}, \quad (7)$$

其中f(x,y)为物体曲面方程,z_x(x,y)与z_y(x,y)分 别为曲面方程对x,y轴上的偏导,即物体表面的梯 度信息.对物体表面不同形状,不同曲率位置的法 向量进行积分,便能得到物体的相对深度信息,通 过深度信息的解算,最终获得物体表面的三维 形状.

1.2 偏振三维重建存在的问题

图 2 以桌球为例,从左到右显示了利用偏振三 维重建的过程,首先利用拍摄的四张偏振影像图 2 (a)求得目标物的偏振度图 2(b)和偏振方位角图 2 (e),其次由偏振度和偏振方位角求得物体表面法向 量的天顶角图 2(c)和方位角图 2(f),最终由获得的 法向量图 2(d)得到物体表面梯度并重建出三维表 面图 2(g).图 2 中重建算法采用经典的梯度积分算 法,利用 Neumann 边界条件进行泊松重建^[16],但重 建的结果并非是我们期望得到的球形.在利用偏振 信息直接进行物体表面重建时,实际上存在一些 问题:

(1)方位角歧义:偏振方位角解算时 φ 与 φ + π 的 正 切 值 是 一 样 的 ,反 正 切 得 到 的 值 域 为 $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$,而实际需要的方位角值域为 $\left[-\pi, \pi\right]$, 即偏振获得的方位角部分区域存在 π 歧义:

(2)图像噪声:实际拍摄受周围环境和相机系 统噪声的影响,偏振图像无法避免噪声的存在.由 梯度到三维表面是一个积分过程,对图像噪声的积 分会引起累加性的误差,目前尚未有完善的积分算 法来处理这类问题.

(3)曲面初始偏差:在未知初始边界的条件下,一般的积分算法只能设定或预估初始值,从而导致积分结果与真实值间存在系统性偏差.

2 整体流程与数据预处理

2.1 整体算法处理过程

针对偏振三维重建时存在的问题,本文整体处



图2 桌球偏振三维重建

Fig. 2 Shape from polarization of snooker

理的结构图如图3所示.

(1)利用偏振相机获得的偏振图像与深度相机获得的粗糙深度图配准,得到目标物的粗糙法向量及深度图;

(2)利用粗糙深度图求得的目标法向量来纠正 偏振图像获得的偏振方位角,得到准确的目标物表 面法向量的方位角;

(3)利用已纠正的偏振法向量与粗糙深度图积 分融合,获得更高精度的物体三维表面.



图3 整体处理结构图

Fig. 3 Overall processing flowchart

图4以杯子为例,显示本文整体算法的处理流 程.图4(a)为由深度相机获得的粗糙深度图;图4 (b)由偏振相机获得的0°、45°、90°、135°偏振图片; 图4(c)为1.1节的处理结果,直接由偏振求解法向 量,并用经典的积分算法重建,其结果存在方位角 歧义,直接导致形状畸变;图4(d)为经过3.1节方位 角去歧义处理的法向量积分重建结果;图4(e)为经 过3.2节融合已纠正的偏振法向量信息和粗糙深度 信息的三维重建结果.从图4中可以看出,粗糙深 度图融入偏振信息后可以获得精确的物体三维 表面.

2.2 粗糙深度图获取

本文利用Astra获得粗糙深度图作为先验信息, Astra 是深圳奥比中光科技有限公司开发的一款 3D 相机,采用红外散斑结构光的方式来获取景深,其 拍摄深度范围 0.8~8 m、深度图分辨率为 640 × 480@30*FPS*、精度 1 m: ±1 - 3 mm、视场角 *H*: 58.4°, *V*: 45.5°.

图 5(a)为利用 Astra 拍摄的一组深度图,其中正 中央放置着待测的目标物(杯子),背面为挡板.对 二维深度数据处理,采用基于视场角的方法可以获 得点云数据,具体解算式为:

$$\begin{cases} X = \left(\frac{x}{X_{\text{res}}} - 0.5\right) * \tan\left(\frac{\text{FOV}_{-}h}{2}\right) * 2*d \\ Y = \left(\frac{y}{Y_{\text{res}}} - 0.5\right) * \tan\left(\frac{\text{FOV}_{-}v}{2}\right) * 2*d \\ Z = d \end{cases}, \quad (8)$$

其中,x,y为投影坐标系中的x,y坐标;X,Y为世界坐标系中的X,Y坐标;X_{res},Y_{res}为深度图的分辨率(本文采用 640×480);FOV_h为水平方向视场角; FOV_v为竖直方向视场角;d为深度值.图5(b)为点云图计算结果,图5(c)为所要提取的目标物点云图,图5(d)为目标物三维显示.由于深度相机视场较大且拍摄距离需要大于0.8 m,因此无法获取近距离高密度的三维点云数据,只能得到粗糙的目标表面.

2.3 偏振相机标定

本文使用 Lucid Phoenix 系列偏振相机获取偏振 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(90°、45°、135°和0°)放置于单个像元上,每 四个像元一组作为一个计算单元.相机图像分辨率 2448×2048@24FPS、精度为1m:±(1~3)mm.



图4 杯子三维重建过程

Fig. 4 The 3D reconstruction process of a cup



为了将Lucid偏振相机获取的图片与Astra获取 的深度图精确配准,有必要进行相机标定(Camera Calibration),从而获取相机内外参,本节以偏振相机 为例来描述相机标定过程.Lucid偏振相机由于添 加偏振片阵列光学结构,导致相机模型与原始的小 孔成像模型有差异,但由于实际仅选取1/4的单张 偏振影像进行配准,从而忽略组合单元的影响.本 文采用张正友标定方法^[17],该方法是一种有物理棋 盘格辅助的相机参数检校,其优点是标定简单、精 度较高.

对于相机成像,二维像点与三维坐标点之间的 转化可表示为:

$$sp = K \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} P \qquad , \quad (9)$$

其中 $p = [u,v,1]^{T}$ 为二维相机平面像素坐标; $P = [X,Y,Z,1]^{T}$ 为三维世界坐标点;s为世界坐标系到 图像坐标系的尺度因子;K为相机内参矩阵;R为旋 转矩阵;t为平移向量.以平面标定板上左上角的点 为世界坐标系的原点,其XOY平面与标定板平面重 合,则标定板上点的Z = 0,公式(9)可以转化为

$$s\begin{bmatrix} u\\ v\\ 1\end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & \gamma & x_0\\ 0 & f_y & y_0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1\\ r_{21} & r_{22} & t_2\\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\\ Y\\ 1\end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中 (u_0, v_0) 为像主点坐标, γ 为径向畸变参数, f_x, f_y 将相机的焦距f变换为在x, y方向上像素度量表示, 以上五个参数即为所要求解的相机内参.通过标定 板角点检测可获得多组方程组,再加上旋转矩阵的 约束条件,及对多组解的最大似然估计可获得较高 的精度的标定参数,图6为相机内外参标定.





(a)标定板棋盘格角点检测图 6 相机标定Fig. 6 Camera calibration

(b)还原拍摄影像场景

最终获得偏振相机的内外参矩阵分别为:

$$\boldsymbol{K}_{\text{pol}} = \begin{bmatrix} 1839.99 & 0 & 0 \\ 0 & 1835.61 & 0 \\ 623.39 & 483.55 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{R}_{\text{pol}} = \begin{bmatrix} 0.0531 & -0.9962 & 0.0685 \\ 0.9962 & 0.0481 & -0.0724 \\ 0.0689 & 0.0721 & 0.9950 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{t}_{\text{pol}} = \begin{bmatrix} -70.43 & 37.72 & 343.87 \end{bmatrix}$$

2.4 图像配准

同时得到偏振相机与深度传感器参数之后,需 要将两类影像数据进行配准,主要原因是两类图像 素之间不是一一对应关系.具体可通过图7观测, 空间中任一点P在深度图与偏振图上的投影位置, 会根据两类传感器之间的姿态与内参的不同而不 同,且分别投影在点P_{dep}与点P_{pel}上.配准的最终目 的是,将深度图上任一点P_{dep},对应地赋予给自身对 应点P_{pel}的偏振图像上.解算思路是将深度图中某 像素投影到空间中,若该空间点被偏振相机观测 到,可以将其投影到偏振图像坐标系中,最终将该 点的深度值赋值到偏振图的同名像点上.

设偏振相机与深度传感器经过相机标定后的 内参分别为 K_{pol}, K_{dep}, 并且在统一的参考坐标系





Fig. 7 Alignment of the depth map and polarization map

(Coordinate Datum)下的其他外方位元素分别为 R_{pol} , t_{pol} 与 R_{dep} , t_{dep} . 设点P在偏振相机坐标系下的空 间坐标为 P_{pol} ,在深度坐标系下的空间坐标为 P_{dep} (均为非齐次坐标),则该空间点在两类影像上的投 影坐标分别为:

$$\begin{cases} P_{\text{pol}} = R_{\text{pol}}P + t_{\text{pol}} \\ P_{\text{dep}} = P_{\text{dep}}P + t_{\text{dep}} \end{cases}$$
(11)

由于点*P*_{pol}, *P*_{dep}在空间中为同一点*P*,所以之间的转换可以通过旋转矩阵*R*与平移向量*t*表达,即可以转换深度图像至偏振相机观测的视角下

$$P'_{pol} = RP_{dep} + t$$
 , (12)
由式(11)与式(12)可得到

 $P'_{pol} = R_{pol}R_{dep}^{-1}P_{dep} - R_{pol}R_{dep}^{-1}t_{dep} + t_{pol}$, (13) 结合相机内参,在图像像素坐标系下,式(13)可表 示为:

$$\frac{1}{s} \begin{bmatrix} u'_{\text{pol}} \\ v'_{\text{pol}} \\ 1 \end{bmatrix} = K_{\text{pol}} R_{\text{pol}} R_{\text{dep}}^{-1} K_{\text{dep}}^{-1} Z_{\text{dep}} P_{\text{dep}} \quad . \quad (14)$$

-K_{pol}R_{pol}R_{dep}+K_{pol}t_{pol} 对相同的目标物,深度相机获得的像素尺寸一 般小于偏振相机获得的像素尺寸,需要进一步做插 值处理,由此可将两幅不同相机的图像进行配准.

3 偏振信息与粗糙深度图融合

针对偏振三维重建存在的问题:方位角存在π 歧义;噪声对法向量积分的误差累计影响;获得曲 面的初始偏差.本文利用粗糙的物体深度图为基 础,来融合两种图像信息,使获得的物体三维表面 具有粗糙深度图的大体轮廓,并具备偏振获取的详 细信息.

在此研究中有以下假设,(1)实验在无偏光的 环境中进行;(2)物体材质为非导电体,且整个物体 表面材质相近;(3)忽略物体与周边环境的多次交 叉反射,天顶角的计算主要针对单次反射的结果.

3.1 方位角纠正

在1.3节中有论述过,部分物体表面偏振方位 角与实际三维物体的表面法向量的方位角存在π歧 义.由这个问题出发,首先采用边缘传播算法获得 初步的纠正结果,边缘传播算法假定物体表面整体 遵循圆周周期变化,由此预估图像四周的方位角分 布如图8所示,从外围选取种子点向里迭代,当所在 点的方位角处于该区域给定的方位角范围内时,则 认定为准确值,否则利用邻近点插值代替.

该算法对于非对称的复杂物体容易出现误判,



图 8 方位角的分布范围与数值大小

Fig. 8 Azimuth distribution range and numerical value

因此本文在此基础上进一步利用粗糙深度图的方 位角来纠正,具体计算方式为:

$$\varphi_{c} = \begin{cases} \varphi_{c0} + \pi & \varphi_{c0} - \varphi_{d} < -\alpha\pi \\ \varphi_{c0} - \pi & \varphi_{c0} - \varphi_{d} > \alpha\pi \end{cases} , \quad (15)$$

其中φ_a,φ_a分为边缘传播纠正、深度图计算得到的 方位角,α为[0,1]间的系数,α取值大则会误判噪声 点,取值小则会影响整体结果准确性,本文实验选 用3/4.

3.2 物体表面重建

由法向量重建出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,如何找到一种鲁棒的积 分算法一直是三维重建里的难题.本文利用粗糙的 深度信息作为整理框架,并融入偏振细节信息.为 此首先定义两个最小化的能量项^[18]:点误差*E*_p和法 向量误差*E*_n.

点误差定义为所有的优化三维点和深度图测 量三维点平方距离的总和:

$$E_{p} = \sum_{i} \left\| P_{i} - P_{i}^{d} \right\|^{2} \qquad , \quad (16)$$

其中 P_i 为优化后第i个点的位置, P_i^d 为深度图中对应的i点.当 E_p 达到最小值时,优化后的三维点与深度图的三维点一致.实际上三维点在x,y的方向上是固定的,因此式(16)可以转换为z轴深度图上表示:

$$E_{p} = \left[\left(\frac{x_{i}}{f_{x}} \right)^{2} + \left(\frac{y_{i}}{f_{y}} \right)^{2} + 1 \right] \cdot \left(Z_{i} - Z_{i}^{d} \right)^{2}, \quad (17)$$

其中f_x, f_y为相机在像素点上的焦距.

法向量表示垂直于空间曲面点的任一切线方向,因此可利用切线与法线垂直的关系来表述法线 误差:

$$E_{n} = \sum_{i} [T_{x}(P_{i}) \cdot N_{i}^{pc}]^{2} + [T_{y}(P_{i}) \cdot N_{i}^{pc}]^{2}, \quad (18)$$

其中*N*^{*re*}为从偏振图像获得,已方位角去奇异的法向量,图像*x*,*y*方向的切线向量可由偏微分方程表示:

$$T_{x} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{f_{x}} \left(x \frac{\partial Z}{\partial x} + z \right) & -\frac{1}{f_{y}} y \frac{\partial Z}{\partial x} & \frac{\partial Z}{\partial x} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\ T_{y} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{f_{x}} \left(x \frac{\partial Z}{\partial y} + z \right) & -\frac{1}{f_{y}} y \frac{\partial Z}{\partial y} & \frac{\partial Z}{\partial y} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} .$$
(19)

最终的优化方程可以表述为:

$$\arg\min_{0} kE_p + (1-k)E_n \qquad , \quad (20)$$

其中*k*为[0,1]间的参数,决定深度信息与偏振信息 三维重建的比重,当*k*取值为0时,优化的结果等同 于纠正后的偏振重建结果,当*k*取值为1时,优化的 结果等同于深度图的结果.而且该方程组为超定的 线性系统,可用最小二乘法求得最优解.

4 实验结果与分析

针对低纹理乃至无纹理的目标物,本文选用合

成树脂光滑表面(桌球)、陶瓷磨砂表面(杯子)、陶 瓷光滑表面(两个不同形状的花瓶)作为验证实验, 并利用扫描仪得到的结果作为真实值来评估实验 结果的准确性.

图9为法向量处理的结果.偏振获取的信息处 理最终得到物体表面的法向量,而法向量的重建结 果受目前积分算法不完善的限制,因此通常也以法 向量的结果图来表示物体处理的优劣.图中第一列 为实物图;第二列为扫描仪获得的结果作为真值; 第三列为本文算法对偏振获得的方位角去奇异处 理后的结果;第四列为文献[19]算法得到的结果; 第五列为文献[20]算法得到的结果;第六列为文献 [21]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.从结果 可以看出,在物体垂直观测视角的切面上,磨砂、光 滑表面均会出现明显的噪声,这是由于在这个区域



图 9 法向量结果 Fig.9 Normal vector results

偏振度较小,噪声的影响更明显.作为对比的三类 结果中,文献[19]获得的结果与真值较为接近,但 其实验依赖于对光源的确定,而且不同的光源参数 值结果相差很大.从MAE值比较可以看出本文算 法获得的法向量与真值较为接近.

图 10 为物体表面重建的结果.图中第一列为 扫描仪获得的结果作为真值;第二列为Astra获得的 粗糙深度图;第三列多视角处理的结果,利用商业 软件 Agisoft PhotoScan处理同一物体多张影像,在最 高质量的模式下配准图像并生成密集点云,其中桌 球选取 10 张配准 0 张无三维结果,杯子选取 10 张配 准4张,花瓶 1 选取 10 张配准 5 张,花瓶 2 选取 10 张 配准 7 张;第四列为融合深度图的重建结果,即本文 重建的最终结果;第五列为文献[16]经典的梯度积 分重建算法得到的结果;第六列为文献[22] Shapelet算法得到的结果;第六列为文献[22] Shapelet算法得到的结果,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,因此本文引入相关系数r(Correlation Coefficient) 来辅助评判结果与真实值的相似程度.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.文中选取的低纹理物体,多视角结 果并不理想,多视角三维重建依赖于目标物的纹理 特征,对于低纹理乃至无纹理物体提取的特征点 少,无法生成准确密集的目标点云.文献[16]算法 的重建结果存在较大畸变,尤其在桌球上明显有 错;文献[22]Shapelet算法能避免方位角歧义问题, 但对噪声敏感,中间部分容易出现毛刺,当调整天 顶角参数时,会引起部分过饱和;深度相机只能获 取粗糙深度图,尤其在花瓶2里,丝带纹理基本没 有,只存在大体轮廓,本文算法重建结果依赖于偏 振信息获取物体丝带立体纹理.从三维形状和误差 值比较可以看出本文算法获得的物体三维表面与 真值较为接近.

5 结论

以粗糙深度图作为先验信息,可以有效地处理 偏振三维重建时出现的一些问题,包括方位角π歧 义,积分受图像噪声影响,重建初始偏差,最终可以 获得精度较高的物体三维表面.使得利用偏振手



Fig.10 Surface reconstruction results

段,能很好地处理表面光滑、纹理单一的物体表面 三维重建.

在天顶角求解过程中,垂直于观测方向的区域,偏振度较低,且容易受噪声影响,所求解的天顶 角存在较大的误差,这部分的误差会直接影响物体 的形状,后续可以考虑引入融合算法等提升重建的 精度;对于结构比较复杂的物体,粗糙深度图与偏 振图像的精确匹配直接影响重建的精度,需要有更 高精度的初始深度图,以及优化的匹配算法,从而 能处理结构更为复杂的物体.

References

- [1] Nex F, Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review [J]. Applied Geomatics, 2014, 6(1): 1–15.
- [2] Chen J, Bautembach D, Izadi S. Scalable real-time volumetric surface reconstruction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 113.
- [3] Moo Yi K, Trulls E, Ono Y, et al. Learning to find good correspondences [C]. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 2666–2674.
- [4] Yasutaka F, Jean P. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis* and Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1362–1376.
- [5] Horn B K, Brooks M J. Shape from shading [M]. MIT press, 1989: 123-171.
- [6] Basri R, Jacobs D, Kemelmacher I. Photometric stereo with general, unknown lighting [J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 72(3): 239–257.
- [7] Koshikawa K. A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects [C]. In Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence, 1979: 493-495.
- [8] Ahmad J E, Takakura Y. Stereo-polarimetric measurement of pair of mueller images for three dimensional partial reconstruction [C]. In *Proceedings of IEEE European Signal Processing Conference*, 2006:1–4.
- [9] Ghosh A, Chen T, Peers P, et al. Circularly polarized spherical illumination reflectometry [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): 162.
- [10] Miche P, Bensrhair A, Lebrun D. Passive 3-D shape recovery of unknown objects using cooperative polarimetric and radiometric stereo vision processes [J]. Optical Engineering, 2005, 44(2): 1-9.

- [11] Kadambi A, Taamazyan V, Shi B, et al. Polarized 3d: High-quality depth sensing with polarization cues [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 3370-3378.
- [12] PING Xi-Xi, LIU Yong, DONG Xin-Ming, et al. 3-D reconstruction of textureless and high-reflective target by polarization and binocular stereo vision [J]. Journal of Infrared and Millimeter 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.
- [13] YUE Chun-Min, YANG Jin-Hua, LI Jin-Jun, 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), 2008,6: 844-848.
- [14] PENG Qun-Nie, GAO Hai-Feng, ZHANG Sheng-Wei, et al. A polarization imaging based 3D reconstruction algorithm for textureless objects [J]. *Electronics Optics & Control*(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.电光与控制), 2018, 25 (12): 49-52.
- [15] 廖延彪. 偏振光学[M]. 科学出版社, 2003: 11-25.
- [16] 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.
- [17] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22: 1330–1334.
- [18] Nehab D, Rusinkiewicz S, Davis J, et al. Efficiently combining positions and normals for precise 3D geometry [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 536-543.
- [19] Smith W A, Ramamoorthi R, Tozza S. Linear depth estimation from an uncalibrated, monocular polarisation image [C]. In Proceedings of European Conference on Computer Vision, 2016: 109-125.
- [20] Mahmoud A H, El-Melegy M T, Farag A A. Direct method for shape recovery from polarization and shading [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, 2012: 1769–1772.
- [21] Miyazaki D, Tan R T, Hara K, et al. Polarization-based inverse rendering from a single view [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2003: 982.
- [22] Kovesi P. Shapelets correlated with surface normals produce surfaces [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2005: 994–1001.