

基于偏振双目视觉的无纹理高反光目标三维重构

平茜茜, 刘勇, 董欣明, 赵永强*, 张艳

(西北工业大学自动化学院, 陕西西安 710071)

摘要:对于表面光滑、纹理单一甚至缺失、高反光的目標,传统的三维重构方法由于对纹理以及反光特性的依赖会使得重构表面出现大面积的数据空洞。而基于偏振的三维重构方法不依赖于物体表面的纹理信息,同时偏振成像能够在一定程度上抑制耀光,能够有效解决传统三维重构方法存在的问题。但是,基于偏振视觉的三维重构方法得到的是像素坐标系下的深度信息,因此提出了偏振双目视觉三维重构方法,以由双目立体视觉获得的少量特征点的世界三维坐标为“桥梁”,利用双目立体标定得到的相机参数,将偏振得到的图像像素坐标系下的点云数据转化为世界坐标系下的绝对数据。

关键词:三维重构;无纹理目标;偏振;双目立体视觉

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

3-D reconstruction of textureless and high-reflective target by polarization and binocular stereo vision

PING Xi-Xi, LIU Yong, DONG Xin-Ming, ZHAO Yong-Qiang*, ZHANG-Yan
(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710071, China)

Abstract: For high reflective targets with smooth surface, single or even none texture, a large area of data void may appear on the reconstruction surface since the traditional three-dimensional reconstruction method depending on texture and reflective characteristic. While three-dimensional reconstruction method based on polarization vision does not rely on the texture information on the surface of objects, the polarization imaging can restrain highlight to a certain extent, which can effectively solve the problems existing in the traditional three-dimensional reconstruction method. However, the depth information obtained by three-dimensional reconstruction method based on polarization vision is under pixel coordinates. Therefore, polarization and binocular three-dimensional reconstruction method was put forward. Taking absolute three-dimensional coordinate of a few feature points obtained by binocular stereo vision as the “bridge”, combined with the camera parameters obtained by binocular calibration, the point cloud data acquired by polarization in image pixel coordinates can be transformed into absolute data in world coordinates.

Key words: 3D reconstruction, texture absence, polarization, binocular stereo vision

PACS: 42.30.Tz

引言

空间任务中普遍存在低纹理高反光目标,具有表面纹理特征单一甚至缺失、表面光滑容易产生耀光两个特点。传统的三维重构方法如:双目立体视

觉,在很大程度上依赖于物体表面的纹理信息,对于表面光滑的无纹理目标重构结果会出现大面积的数据空洞;基于结构光的三维重构由于大面积耀光会影响光栅条纹的提取从而导致无法获得准确深度信息,无法同时将上述两方面问题很好地解决。因此,

收稿日期:2016-12-31,修回日期:2017-04-17

基金项目:国家自然科学基金(61371152)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61371152)

作者简介 (Biography): 平茜茜 (1993-), 女, 硕士研究生, 山西长治人, 主要研究偏振图像处理与三维重构方面。E-mail: pingxixiyouxiang@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhaoyq@nwpu.edu.cn

Received date: 2016-12-31, revised date: 2017-04-17

研究能够有效处理低纹理高反光目标的三维重构技术具有重要意义。

与传统计算视觉直接利用目标表面反射光强度信息不同,基于偏振视觉的目标三维重构技术利用目标表面反射光的偏振信息,能够有效减小不良光照条件的影响^[1]。同时,基于偏振视觉的三维重构不依赖于目标表面的纹理信息,对光滑的无纹理目标依然能获得完整的三维结果。S. Rahmann 和 N. Canterakis^[2]最早提出了完整的偏振三维重构算法,利用绝缘体表面的偏振信息恢复出其三维形貌。Atkinson^[3]等分别利用镜面反射和漫反射两种偏振模型来恢复物体三维信息。此外,基于偏振立体视觉的三维重构技术还可以与其他成像手段相结合。Miche^[4]等设计了一个特殊的视觉系统,与偏振视觉方法相结合,为基于偏振信息得到的法向量积分提供初始深度,实现基于偏振视觉的三维重构。Cong Phuoc Huynh^[5]等将多光谱成像与偏振成像结合起来估计绝缘体目标的折射系数以及三维信息。N. Missael Garcia^[6]等利用圆偏振光消除天顶角的歧义来恢复目标的三维结构。Achuta Kadambi^[7]等研究人员利用偏振得到的法向量信息为辅助,通过结合 Kinect 的粗略深度图得到了高精度的目标三维重构结果;Trung Thanh^[8]通过调整光源的方向获取偏振信息,将偏振信息与阴影信息作为目标表面法向量方向的约束条件恢复了目标表面的三维形状。

针对基于偏振视觉的三维重构方法无法获取目标表面点世界坐标的问题,给出了偏振视觉与立体视觉相结合的方案。通过坐标转换的方法将两种方法获得的点云数据进行融合,实现了稠密点云数据从相对深度到绝对深度的转化,实现了高反光无纹理目标完整的三维重构。

1 基于偏振视觉的三维重构

1.1 偏振成像原理

光波属于横波^[9],自然光在各个方向振动分量相同,属于无偏光。无偏光经物体表面反射后会变成部分偏振光。通过偏振成像可以获得物体表面反射光的偏振信息,反射光的偏振信息中包含了目标表面的法向量信息,通过分析反射光的偏振状态可以得到物体表面的法向量信息,进而对法向量积分获得目标的表面三维形状。

根据 Fresnel 方程可知,反射率 R 会随光矢量的振动方向改变而发生相应的变化。

将线偏振片置于相机镜头, θ_{pol} 为偏振片透光轴

与起始位置(参考位置)之间的夹角。光照强度 I 可表示为与偏振片旋转角度有关的正弦函数,如下式^[10]:

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

式中, I_{max} 、 I_{min} 分别表示连续旋转偏振片时,CCD 相机所观测到的最大光强与最小光强, ϕ 表示反射光的偏振相角(Angle of Polarization, Aop)。由斯托克斯矢量^[11]可知,偏振度表示为:

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

偏振相角计算式为:

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

其中, I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} 分别代表 0° 、 45° 、 90° 以及 135° 方向上线偏振光的强度。

1.2 基于偏振信息的三维重构

自然光经过光滑介质表面反射后,反射光中包含了镜面反射分量和漫反射分量。镜面反射分量只有在特定的角度才能观测到,故基于偏振的三维重构主要考虑光的漫反射分量。

根据菲涅尔原理、折射定律以及偏振度的定义可得到偏振度 ρ 与法线天顶角 θ_d 的关系为:

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

方位角 α_d 与偏振相角 ϕ 间有着如下的关系:

$$\alpha_d = \phi \text{ 或 } \alpha_d = \phi + 180^\circ \quad (5)$$

若 \vec{n} 表示待重构目标的表面某一点的法向量,其表示形式为:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} \tan \theta \cos \alpha \\ \tan \theta \sin \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

法向量表示的是目标表面形状的梯度信息,若目标表面是光滑、连续且闭合的曲面(笛卡尔曲面),用 $z = f(x, y)$ 表示目标表面,其表面法向量另一种表示形式为:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ -\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

由此可得：

$$\begin{aligned} p(x,y) &= \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ q(x,y) &= \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \end{aligned} \quad (8)$$

梯度信息被积分之后可得目标表面在像素坐标系下的相对深度。

2 偏振与双目立体视觉的结合

从第一部分可知,基于偏振视觉的三维重构方法能够很好地处理低纹理目标.然而,该方法得到的结果是建立在像素坐标系下的,是目标的相对深度信息,反映了目标表面的三维形状,却缺少了真实世界坐标,属于不完全的三维重构.而基于双目立体视觉的三维重构虽然只能得到表面极少数特征点的位置,但得到的却是准确的世界坐标,因此本节将立体视觉同偏振视觉结合起来,以双目特征点云 P_1 的真实三维坐标为“桥梁”,利用立体标定得到的相机参数解算出图像像素坐标系与摄像机(世界)坐标系之间的坐标转换参数,将由基于偏振视觉的三维重构得到的图像像素坐标系下的稠密点云 P_2 转化为摄像机坐标系下完整点云数据 P_3 .不同坐标系之间的转化如图 1 所示.

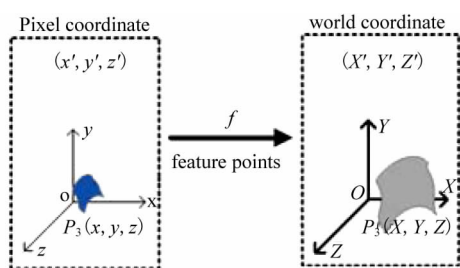


图 1 不同坐标系转化示意图
Fig.1 The conversion diagram of different coordinate systems

2.1 立体视觉坐标系统

像素坐标系 $o-uv$ 以图像左上角为坐标原点,横纵坐标值分别表示列数和行数.图像坐标系 o_1-xy 以图像中心为坐标原点,横纵坐标值分别表示该点离坐标原点的水平距离与垂直距离.摄像机坐标系以摄像机光心 O_c 为坐标原点, X 轴与 Y 轴分别平行于图像坐标系的 x 轴与 y 轴.世界坐标系的原点 O_w 可以是三维场景中的任意点.各个坐标系的关系如图 2 所示.

2.2 点云融合

双目特征点的稀疏点云 P_1 位于世界(摄像机)

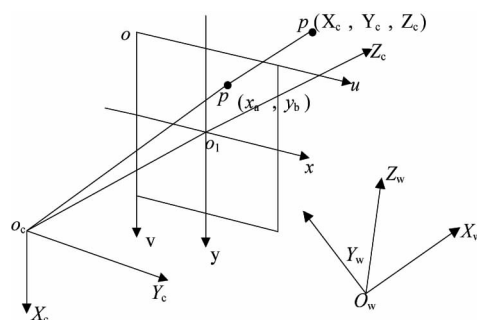


图 2 不同坐标系之间的关系
Fig.2 The relationship between different coordinate systems

坐标系下,点集数据量小;偏振点云 P_2 位于图像像素坐标系下,包含目标表面所有点的数据,故点云融合的问题可以看作是偏振点云数据由图像像素坐标系向世界坐标系的转换,重点在于获得图像像素坐标系向世界坐标系转换的参数,点云融合示意图如图 3 所示.

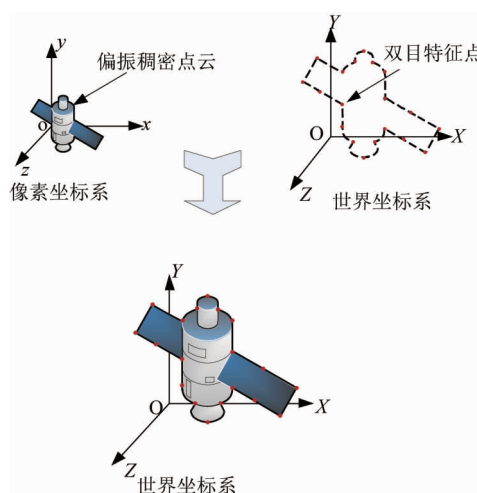


图 3 点云融合示意图
Fig.3 The diagram of point cloud fusion

空间中某点在不同坐标系下有不同的坐标值,假设目标表面某一特征点在像素坐标系(o_1-xyz)的坐标值为 (x^i, y^i, z^i) ,在世界坐标系下(O_w-XYZ)的三维坐标为 (X^i, Y^i, Z^i) ,那么该点由像素坐标系向世界坐标系转换的转换关系可以表示为:

$$\begin{bmatrix} X^i \\ Y^i \\ Z^i \end{bmatrix} = k\mathbf{R} \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = k\mathbf{R} \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{bmatrix} + T \quad (9)$$

其中, \mathbf{R} 为含有三个角度旋转参数的旋转矩阵, k 为尺度缩放因子, T 为在三个坐标轴方向的平移参数.

由图像像素坐标系与摄像机坐标系的定义可知,二者的三个坐标轴方向互相平行,即图像像素坐标系与摄像机坐标系之间不存在旋转,即旋转矩阵 \mathbf{R} 中的三个坐标轴的旋转角度值可以取为 0. 因此,两坐标系之间的转换参数仅有三个平移参数以及一个尺度转换因子参数. 则式(9)变为:

$$\begin{bmatrix} X^i \\ Y^i \\ Z^i \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (10)$$

为将图像像素坐标系下的相对深度转化为世界坐标系下的真实深度,首先将像素坐标系下的点云数据进行平移变换,使之移动到以相机镜头光心为坐标原点的坐标系下,然后通过最小二乘法求解相对深度与真实深度之间尺度转换参数.

在理想情况下,相机光心的正投影位于成像平面的中心 (u_0, v_0) ,但是由于镜头畸变以及装配工艺的影响,真实的主点位置往往与理论值存在一定的差异,其真实值 (u_0', v_0') 可以通过立体标定得到. 主点位置与图像像素坐标系原点之间的距离就是两坐标系原点之间 X 轴与 Y 轴的平移参数,都是图像像素坐标系下的数值,因此图像像素坐标系与摄像机坐标系在 X 轴与 Y 轴上平移参数可表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = u_0' \cdot d_x \\ \Delta y = v_0' \cdot d_y \end{cases}, \quad (11)$$

其中 d_x, d_y 分别为 CCD 像元在 X 轴与 Y 轴方向上的像元尺寸,单位是毫米/像素. 摄像机坐标系原点到图像像素坐标系平面的 Z 轴平移参数为摄像机镜头的焦距. 立体标定得到的相机镜头的焦距是以像素为单位的,而且通过相机标定会得到 X 轴与 Y 轴两个方向上不同的焦距值 f_x, f_y ,具有两个焦距值的原因是廉价的 CCD 传感器的像元并不是严格意义上的正方形. 但通常情况下 f_x, f_y 差距极微小. 为保证数据准确性, Z 轴方向上的平移参数可取为:

$$\Delta z = (f_x \cdot d_x + f_y \cdot d_y) / 2 \quad (12)$$

因此,图像像素坐标系与摄像机坐标系之间的平移参数可以表示为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} u_0' \cdot d_x \\ v_0' \cdot d_y \\ (f_x \cdot d_x + f_y \cdot d_y) / 2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

至此,两坐标系之间的转换参数只剩尺度转换因子 k . 对于双目特征点的稀疏点云 P_1 中的某一特征点来说,可以得到该点在世界坐标系下的 Z 轴坐标值 Z_0 ,同时也可以得到该点在图像像素坐标系下

的深度值 z_0 . 对于同一点来说, Z_0 与 z_0 之间的比例系数即为目标表面点在不同坐标系下的尺度转换参数. 为了提高尺度转化参数的可靠性,本节采用数据统计中常用的最小二乘法来估计不同坐标系下的尺度转换因子 k ,即遍历所有双目稀疏特征点的世界坐标系下的 Z 坐标与像素坐标系下的 z 坐标,估计出最佳尺度转换因子,使得转化误差 E_{error} 取得最小值. 转化误差 E_{error} 的表达式为:

$$E_{\text{error}} = \sum_{i=1}^N (Z_i - kz_i)^2, \quad (14)$$

其中, Z_i 为特征点在世界坐标系下的深度值, z_i 为对应点在像素坐标系下的深度值, k 为图像像素坐标系与世界坐标系之间的转化尺度因子, N 为特征点的个数.

2.3 算法流程

(1) 利用基于偏振的三维重构方法,获取目标的三维形状,得到目标表面在像素坐标系下相对深度信息(稠密点云 P_2);

(2) 利用 SURF 特征点检测算法对由双目立体视觉方法得到的立体图像提取目标表面的特征点,并匹配相应的特征点对,求解在世界坐标系下特征点对的三维坐标(稀疏点云 P_1);

(3) 以特征点对在世界坐标系下的三维坐标为“桥梁”,利用双目立体标定得到的相机参数解算出图像像素坐标系与世界坐标系之间的坐标平移转换参数,利用最小二乘法求解出尺度变换参数,将双目立体视觉获得的稀疏点云与偏振视觉获得的稠密点云进行融合,得到世界坐标系下目标的完整稠密点云 P_3 .

3 实验结果及分析

为验证算法的有效性,搭建了双目—偏振图像采集系统. 以水平方向为参考方向,将左相机镜头前的线偏振片分别旋转至 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 以及 135° ,获得四个角度下的偏振图像,同时将左右相机下的 0° 偏振图像作为立体图像对,用于求解特征点的三维坐标. 以具有表面光滑无纹理高反光特征的陶瓷瓶为重构对象,在图像采集完成之后提取左右相机图像的 SURF 特征点,图 4 为目标表面成功匹配的特征点. 完成立体匹配后计算出特征点的三维坐标. 部分特征点的三维坐标如表 1 所示,获得的三维重构结果如图 5 所示.

在对偏振图像进行处理时首先对每一幅图像进行去畸变,然后与双目相机采集到的左图像进行配

表 1 特征点坐标

Table 1 Feature points coordinate set

点数	特征点相对深度 z/pixel	特征点真实深度 Z/mm
1	88.125	1004.041
2	99.223	966.715
3	80.452	995.824
4	113.041	1008.501
5	82.330	1023.223
6	111.220	1046.251
7	105.442	984.345
8	113.315	1025.247
9	85.642	992.627
10	85.132	1002.656
11	83.012	1010.132
12	107.325	1021.314

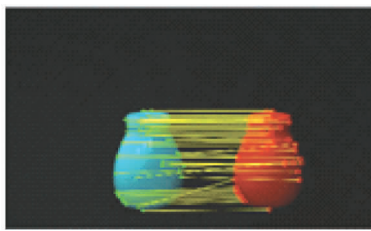


图 4 成功匹配的特征点
Fig. 4 The successfully matched feature points

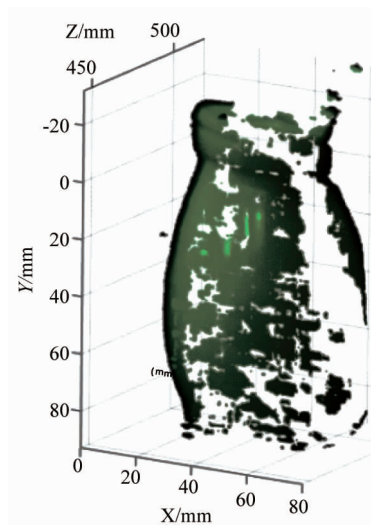


图 5 双目重构结果
Fig. 5 Binocular reconstruction result

准,再根据四个角度偏振图像求取偏振度图像,如图 6 所示.由于偏振相角与方位角之间存在二义性,故仅使用天顶角来求取目标表面的相对深度.利用偏振视觉求得的点云如图 7 所示.

根据立体标定可以得到相机的内参数,式(13)可以得到像素坐标系与世界坐标系之间的平移参数.最后,根据式(14),带入特征点的图像像素坐标

(z_i)与世界坐标(Z_i),采用最小二乘法进行拟合,可求得尺度因子 $k \approx 0.62$,最小二乘拟合过程如图 8 所示.

根据求得的尺度参数与平移参数,对偏振点云数据进行坐标变换便可将相对深度转化为世界坐标系下的绝对深度信息.最终恢复结果如图 9 所示.

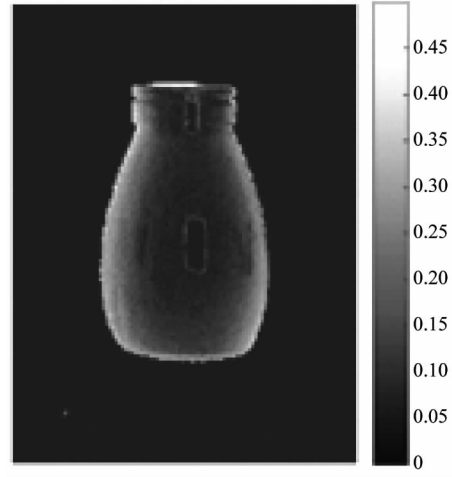


图 6 偏振度图像
Fig. 6 The degree of polarization image

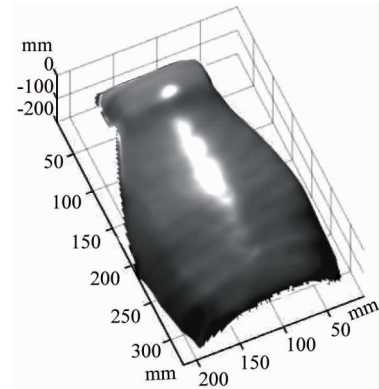


图 7 偏振重构结果
Fig. 7 Polarization reconstruction result

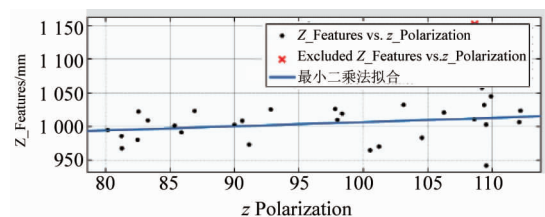


图 8 尺度参数 k 拟合过程
Fig. 8 The fitting process of scale parameter k

在本实验中,仅仅基于双目立体视觉的重构方

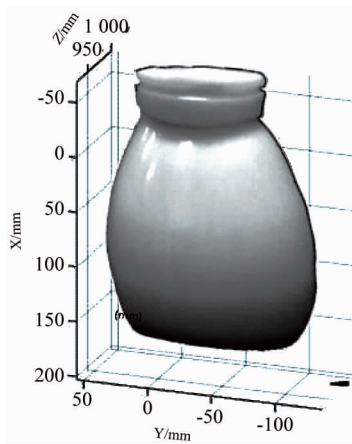


图9 双目与偏振结合重构结果
Fig. 9 The combined reconstruction result of binocular and polarization

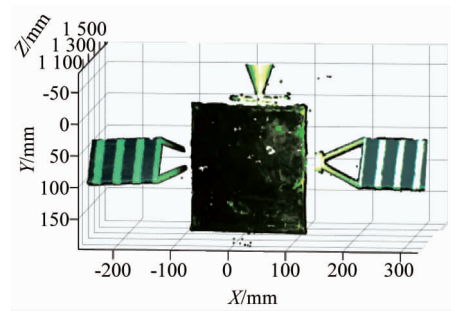


图12 双目与偏振结合重构结果
Fig. 12 The combined reconstruction result of binocular and polarization

法在求取视差图时难以找到左右图像的正确匹配点,结果出现了大面积的数据空洞,而基于偏振双目视觉的三维重构方法得到了较好的实验结果,获得了目标表面在世界坐标系下的完整点云数据.图10~15分别给出了卫星和电池板模型的三维重构结果,进一步验证了算法的有效性.

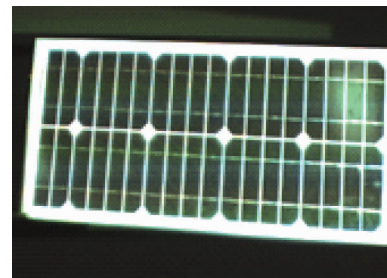


图13 重构对象:电池板
Fig. 13 Reconstruction object: panel

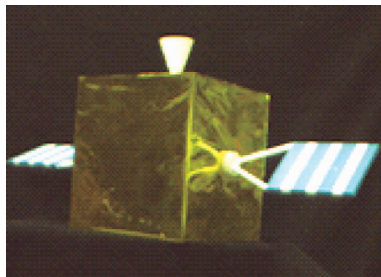


图10 重构对象:卫星模型
Fig. 10 Reconstruction object: satellite model

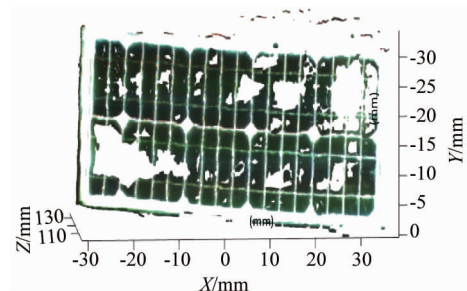


图14 双目重构结果
Fig. 14 Binocular reconstruction result

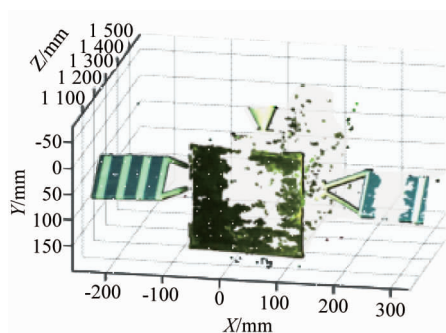


图11 双目重构结果
Fig. 11 Binocular reconstruction result

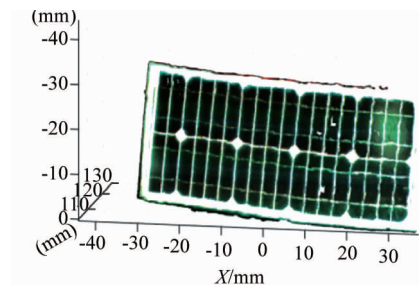


图15 双目与偏振结合重构结果 fg-gijjieguo 结果
Fig. 15 The combined reconstruction result of binocular and polarization

由图10~15的实验结果可知,由于目标表面没有纹理等特征信息,基于双目立体视觉的目标三维

重构方法在求取视差图时难以找到左右图像的正确匹配点,导致得到的视差图出现大面积的数据缺

失,进而导致最终的三维重构结果出现了大面积的数据空洞.而偏振双目视觉方法结合了各自的优势,有效地解决了这一问题,并且得到了完整点云的世界坐标.对于图 15 出现的畸变现象是因为电池板的边框是金属材料,而内部都是非金属材料,在利用偏振信息对目标进行三维重构时,只能选择一个折射系数,折中的选择了适用于非金属材料的折射系数,导致金属边框部分的重构结果出现了失真现象.

4 结论

偏振视觉与双目立体视觉相结合的意义在于,能够很好地处理低纹理目标,得到目标表面三维形貌和世界坐标,解决了纹理缺失使得单纯利用双目立体视觉,目标重构结果出现大面积数据空洞这一问题,同时偏振成像对耀光具有抑制作用.此外,只需要计算部分特征点的真实坐标,便可以得到目标整体的坐标信息,大大减少了立体匹配的计算量,减少了运算成本.

References

- [1] Zhao Y, Yi C, Kong S G, *et al.* *Multi-band polarization imaging and applications* [M]. Springer, 2016.
- [2] Ahmad J E, Takakura Y. Stereo-polarimetric measurement of pair of mueller images for three dimensional partial reconstruction [C], *IEEE Conference on Signal Processing*, 2006 14th European. 1-4.
- [3] Atkinson G A, Hancock E R. Recovery of surface orientation from diffuse polarization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(6):1653-1664.
- [4] Miche P, Benschair 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):027005-027005-9.
- [5] Huynh C P, Robles-Kelly A, Hancock E. Shape and refractive index recovery from single-view polarisation images [C], *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2010:1229-1236.
- [6] Garcia N M, de Erausquin I, Edmiston C, *et al.* Surface normal reconstruction using circularly polarized light [J]. *Optics express*, 2015, **23**(11): 14391-14406.
- [7] Kadambi A, Taamazyan V, Shi B, *et al.* Polarized 3D: High-quality depth sensing with polarization cues [C], *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2015: 3370-3378.
- [8] Ngo Thanh T, Nagahara H, Taniguchi R. Shape and light directions from shading and polarization [C], *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015: 2310-2318.
- [9] Born M, Wolf E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* [M]. Elsevier, 1980.
- [10] Forsyth D A, Ponce J. A modern approach [J]. *Computer vision: a modern approach*, 2003: 88-101.
- [11] De Boer J F, Milner T E. Review of polarization sensitive optical coherence tomography and Stokes vector determination [J]. *Journal of biomedical optics*, 2002, **7**(3): 359-371.