

## 基于 TOF 相机的空间非合作目标位姿测量方法

孙典奇<sup>1,2,3\*</sup>, 段慧仙<sup>1,3</sup>, 裴浩东<sup>1,3\*\*</sup>, 胡亮<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>中国科学院红外智能感知重点实验室, 上海 200083;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

**摘要** 针对空间非合作目标近距离交会对接时较难获取精确位姿的问题, 提出一种高效可靠的基于 TOF(time-of-flight)相机的空间非合作目标位姿测量方法。利用 TOF 相机灰度图可存储光强的特点, 用回光反射材质圆点标定板, 提高了相机标定精度; 基于边缘弧段组合的椭圆检测法计算目标表面对接环内外侧椭圆参数; 基于局部阈值的区域生长法对深度图像进行连通域分析, 通过面积、长宽比等约束提取出目标表面接插件; 利用对接环与接插件建立目标坐标系并解算其在相机坐标系下的三轴位置与姿态角。搭建地面验证系统, 通过对比本文方法与 ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) 方法 4 组 100 帧图像的实验结果, 验证了该方法的鲁棒性与测量精度的准确性, 说明 TOF 相机在非合作目标位姿测量领域具有广阔的前景。

**关键词** 测量; TOF 相机; 非合作目标; 相对位姿; 椭圆检测; 连通域分析

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2212003

## Pose Measurement Method of Space Non-Cooperative Targets Based on TOF Camera

Sun Dianqi<sup>1,2,3\*</sup>, Duan Huixian<sup>1,3</sup>, Pei Haodong<sup>1,3\*\*</sup>, Hu Liang<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

**Abstract** Given that the precise pose of space non-cooperative targets is difficult to obtain during close rendezvous and docking, an efficient and reliable pose measurement method of space non-cooperative targets based on the time-of-flight (TOF) camera is proposed. Firstly, in view of the characteristic that light intensity can be stored in gray-scale images taken by the TOF camera, a dot calibration board made from retro-reflective materials is adopted to improve the calibration accuracy. Secondly, the ellipse detection method based on the combination of edge arcs is applied for calculating the inner and outer ellipse parameters of the target surface butt ring. Thirdly, the connected components of the depth image are analyzed via the region growing method based on local thresholds and the target surface connector is extracted under constraints such as area and aspect ratio. Finally, a target coordinate system is established through the docking ring and the connector and the three-axis position and attitude angle of the system in the camera coordinate system are calculated. Besides, a ground verification system is set up to verify the robustness and measurement accuracy of the proposed method. To this end, the proposed method and the ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) method are compared using the experimental results of 4 groups of 100 frame images, indicating that the TOF camera has broad prospects in the pose measurement of non-cooperative targets.

**Key words** measurement; TOF camera; non-cooperative target; relative pose; ellipse detection; connected

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-05-06; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 装备预先研究基金项目(30504040304)、上海市青年科技启明星项目(17QB1401000)、中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-325, CX-217)

通信作者: \*dq2018@foxmail.com; \*\*peihaodong@sina.com

component analysis

OCIS codes 120.6085; 110.6915; 150.1488; 100.3008

## 1 引言

精确地获取空间非合作目标的相对位姿信息是空间测量的关键问题<sup>[1]</sup>,同时也是后续进行接近、追踪、抓捕、维修等在轨服务操作的前提<sup>[2]</sup>。目前,测量空间非合作目标的相对位姿通常采用双目立体视觉相机<sup>[3]</sup>、3D 闪光雷达<sup>[4]</sup>等,但这些方法都存在一些局限性<sup>[5]</sup>:双目立体视觉相机算法复杂,计算量大,实时性差,而且受空间环境尤其是光照变化影响严重;3D 闪光雷达体积较大且对时间测量精度要求很高,不适合近距离下为交会对接过程提供稳定精确的目标位姿信息<sup>[6]</sup>。这些难题给非合作目标近距离位姿测量带来了很大的挑战。近年来,一种新型的基于 TOF(time-of light)原理的立体成像设备发展迅速,凭借其小型化、实时性好且对光照不敏感等特性<sup>[7]</sup>,结合面阵传感器可实时高效地获取灰度图和深度图<sup>[8]</sup>,已在地面机器人导航<sup>[9]</sup>、目标跟踪、位姿估计<sup>[10]</sup>等领域获得了广泛的应用。

在空间非合作目标位姿测量领域,基于 TOF 相机的位姿测量研究才刚刚起步。在国外,2017 年,Gómez 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于点云的 TOF 相机位姿测量方法,通过前后帧的点云匹配来计算目标相对位姿信息;2018 年,国际空间站 (ISS) 执行 RemoveDEBRIS 任务<sup>[12]</sup>,整星平台释放立方体卫星作为人造碎片目标,使用视觉导航模块上的 2D 摄像机和 3D TOF 相机观察其 2 m/s 的速度漂移过程;2020 年,Wilde 等<sup>[13]</sup>将 Kinect v2 用于交会对接与捕获过程中目标航天器相对位姿的检测,得到的平均误差为 3 mm,标准差为 5 mm。在国内,2016 年,梁斌等<sup>[5]</sup>总结了当前几种主流的空间非合作目标位姿测量方法并比较了其优缺点,介绍了 TOF 相机的原理及发展;2018 年,闫小盼等<sup>[14]</sup>利用目标航天器的矩形结构信息,提出了一种基于 TOF 相机的非合作矩形目标三维位姿测量方法,得到的位置误差在 3 mm 以内,姿态角误差均值为 0.52°;2020 年,刘悦<sup>[15]</sup>采用了基于点云模板匹配的方法对航天器空间圆进行检测,但没有给出该方法的精度。

基于以上分析,本文针对空间非合作目标相对位姿测量系统复杂与测量精度不高的问题,基于利用 TOF 相机深度图可以直接得到真实深度值的特性,提出一种基于 TOF 相机的空间非合作

目标位姿测量方法。该方法利用目标航天器表面的对接环和接插件等的有效特征,建立稳定的目标坐标系,确保在运动前后坐标系的一致性。最后通过 4 组对比实验验证了本文方法的鲁棒性与测量精度的准确性。

## 2 TOF 相机位姿测量原理与实验

本文的非合作目标航天器表面含有对接环、接插件等众多航天器共有的可识别特征,这些特征在一些在轨任务中可作为有效特征。

### 2.1 TOF 相机标定

本文利用 TOF 深度图像灰度值计算真实世界距离时,需要将像素坐标转换为世界坐标。坐标的转换需要知道相机的参数矩阵和畸变参数,因此需要对 TOF 相机进行标定。为了描述方便,定义坐标系如图 1 所示。

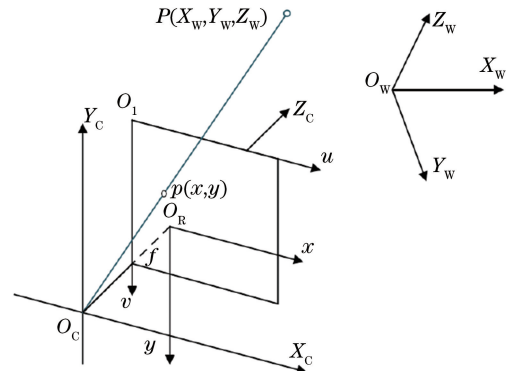


图 1 坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate system diagram

图 1 中,相机坐标系为  $O_c-X_cY_cZ_c$ ,像素坐标系为  $O_l-uv$ ,物理图像坐标系为  $O_r-xy$ ,世界坐标系为  $O_w-X_wY_wZ_w$ 。本文设相机坐标系为世界坐标系,则坐标系间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & c_x \\ 0 & \frac{f}{dy} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $f$  为相机焦距; $dx$ 、 $dy$  分别为传感器在  $x$ 、 $y$  方向上的像元尺寸; $(c_x, c_y)$  为成像光心位置。

已知灰度图像与深度图像共用一套光学系统,像素位置一一对应,相机参数相同。因此,可通过对相机灰度图像进行标定,确定 TOF 相机的内参数

和畸变系数。TOF 相机的分辨率比较低,无法通过棋盘格标定法<sup>[16]</sup>从灰度图中准确地提取角点信息,从而影响标定精度。利用 MATLAB 对棋盘格图像进行标定,得到相机参数,计算得到重投影误差为 0.094 pixel。

本文采用回光反射材质的圆点标定板进行标定,可以从灰度图像中准确地提取圆点中心像素位置。标定板(标点板上圆点排列为 8 行、12 列)的半径  $r=10$  mm、圆心距为 20 mm 的圆点标定板,在工作距离范围内的不同角度采集多幅灰度图像,然后计算相机内参矩阵和畸变系数。具体标定步骤如

下:1)固定 TOF 相机,移动圆点标定板使其处于相机视场不同位置,采集多幅灰度图像;2)先将灰度图像进行高斯滤波降噪处理,之后将图像 Otsu 阈值化;3)检测二值化图像圆点,提取其中心位置并依次连线;4)初始化标定板圆点中心的空间坐标;5)根据图像坐标与空间坐标的对应关系,计算 TOF 相机参数;6)应用最小二乘法计算 TOF 相机畸变系数。

以其中一幅图像为例,提取圆点中心坐标并依次连线,标定结果如图 2 所示。

经过标定得到的相机内参与畸变系数如表 1 所示。

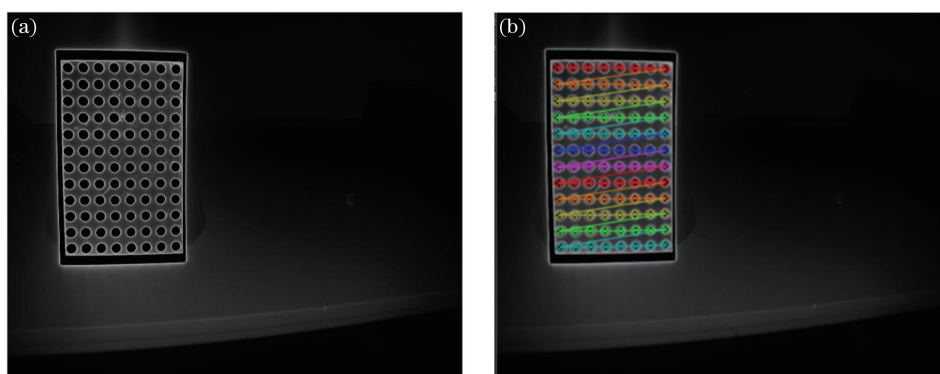


图 2 相机标定结果。(a)原始图像;(b)圆点提取结果

Fig. 2 Camera calibration results. (a) Initial image; (b) result of dot extraction

表 1 TOF 相机标定参数

Table 1 Calibration parameters of TOF camera

Camera focus ( $f_x, f_y$ )	Imaging center ( $c_x, c_y$ )	Radial distortion coefficients $k_1, k_2, p_1, p_2, k_3$
(608.61 pixel, 605.04 pixel)	(321.85 pixel, 238.94 pixel)	-0.1991, 0.0809, 0.0021, -0.0002, 0

利用本文提出的标定方法得到的相机参数,计算得到重投影误差为 0.008 pixel,其远小于棋盘格重投影误差(0.094 pixel),证明了本文标定方法的精度更高。

## 2.2 航天器特征检测

本文非合作目标航天器表面的对接环和接插件可通过椭圆检测与连通域分析算法在 TOF 相机深度图像中进行提取。

### 2.2.1 对接环椭圆检测

对接环在透视投影下总是以椭圆形式出现,因此需要对目标航天器表面进行椭圆提取。本文提出一种基于边缘弧段组合的椭圆检测算法,对目标对接环进行提取识别。该算法在 Canny 边缘检测算法基础上提取弧段,引入近圆率、拟准率、拟全率等多种几何验证方式,以达到精确提取椭圆的效果。主要步骤如下:1)对图像进行高斯滤波降噪处理;2)将滤波后的图像进行自适应阈值 Canny 边缘检测;3)提取边缘轮

廓,并将首尾相近的弧段连接为一个弧段;4)检测弧段拐点并将弧段分割,剔除长度较短与近似直线的弧段;5)通过区域约束将弧段进行组合,拟合椭圆;6)通过聚类分析和几何验证,确定最终椭圆。

下面将介绍椭圆检测算法中三个关键步骤。

#### 1) 弧段分割

椭圆的边缘弧段是平滑且连续的,本文定义拐点为弧段曲率较大或曲率方向变化的点。若弧段由  $M$  个点  $A_0, A_1, \dots, A_M$  组成的向量  $\mathbf{A}_0, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_M$  组成,定义向量  $\mathbf{V}_i = \mathbf{A}_i - \mathbf{A}_{i-1}, i = 1, 2, \dots, M$  表示第  $i$  个点,  $\theta_i$  表示  $\mathbf{V}_{i+1}$  与  $\mathbf{V}_i$  的夹角。当  $\theta_i > T_\theta$  时,该点即为拐点,  $T_\theta$  为曲率阈值。同一弧段的曲率方向必须是一致的,可以利用向量的叉乘来计算角度的变化。在二维空间中,有  $\mathbf{V}_{i+1} \times \mathbf{V}_i = |\mathbf{V}_{i+1}| \cdot |\mathbf{V}_i| \cdot \sin \theta_i$ ,可通过  $\sin \theta_i$  的正负来判断曲率的方向,若某一点满足不等式  $||\theta_i| - |\theta_{i-1}|| < |\theta_i - \theta_{i-1}|$ ,则该点为拐点。图 3(a)、(b)中  $A_3$  均是拐

点,可以在此处将弧段分割。

### 2) 弧段组合

一个椭圆可能因噪声等被分割为多个弧段,多个弧段可以组合成一个较为完整的椭圆,本文采用了区域约束来判断一对弧段是否可以组合。定义搜

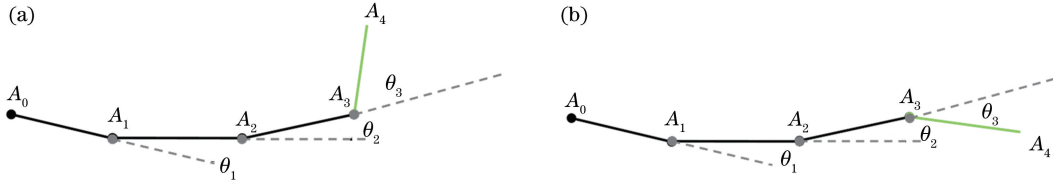


图 3 弧段拐点。(a)  $A_3$  处曲率较大;(b)  $A_3$  处曲率方向变化

Fig. 3 Turning points of segmental arc. (a) Curvature at  $A_3$  is large; (b) direction of curvature at  $A_3$  is changed

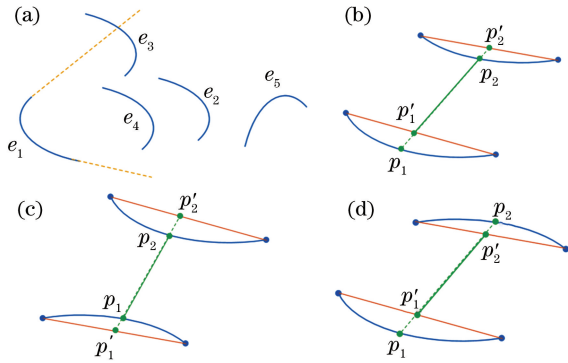


图 4 弧段相对位置。(a)搜索区域;(b)同向;(c)反向;(d)面

Fig. 4 Relative position of segmental arcs. (a) Searching area; (b) the same direction; (c) the opposite direction; (d) the face-to-face

为简化计算,设  $p_1$ 、 $p_2$  为两个弧段的中点, $p'_1$ 、 $p'_2$  为  $p_1p_2$  延长线与两弧段首尾连线各自的交点。判断等式  $p_1p_2 = p_1p'_1 + p'_1p'_2 + p'_2p_2$  是否成立,若成立则满足条件。如图 4 所示,只有图 4(d)满足等式。

### 3) 聚类分析与几何验证

由于某些弧段经多次拟合而形成了相似椭圆,所以还需要进行聚类以优化候选椭圆。本文采用 Prasad 等<sup>[17]</sup>提出的椭圆聚类方法移除相似椭圆以生成候选椭圆集合,且需要对候选椭圆集合中虚假椭圆进行剔除。假设有  $j$  个弧段共  $N$  个采样点参与拟合椭圆,定义  $F_{val} = S_1 \cdot \sqrt{S_2 \cdot S_3}$  为所拟合的椭圆验证得分。下面对 3 个指标进行介绍。

1) 近圆率  $S_1$ :用以避免检测到噪声引起的扁椭圆。令  $a$ 、 $b$  分别为长、短轴, $T_1$  为形状阈值,设为 2,

$$S_1 = \begin{cases} 1, & a/b < T_1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

索弧段与其两端切线所夹区域为搜索区域,只有两个弧段相互处在对方的搜索区域时才满足区域约束,进行组合。如图 4(a)所示, $e_1$ 、 $e_2$  和  $e_1$ 、 $e_4$  均满足条件,所以可生成两个弧段组合,后续通过计算两个椭圆的拟合误差来判断椭圆质量。

2) 拟准率  $S_2$ :表示  $N$  个采样点与拟合椭圆的接近程度。令  $L_i$  表示点  $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, N)$  与椭圆的最短距离:

$$S_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (1 - 0.3L_i)}{N} \quad (3)$$

3) 拟全率  $S_3$ :表示参与拟合的  $j$  个弧段占拟合椭圆的比例。 $\theta_i (i=1, 2, \dots, j)$  为该弧段两端点切线的夹角:

$$S_3 = \frac{0.5N}{\pi [3/2(a+b) - \sqrt{ab}]} + \frac{0.5 \sum_{i=1}^j \theta_i}{360} \quad (4)$$

当  $F_{val} > T_{val}$  ( $T_{val}$  为椭圆验证得分的阈值)时,拟合的椭圆通过验证。

图 5 表示了椭圆检测全过程,最终通过验证的椭圆有 3 个,分别是喷嘴和对接环的内外侧。本文提取对接环的内外侧,求其均值作为有效值,以便在对接环表面取点并求空间三维椭圆的中心点和法向量。

### 2.2.2 接插件检测

目标航天器表面的接插件在空间中突出于目标航天器本体,可在 TOF 相机深度图中利用图像处理领域常用的连通域分析法进行检测。本文提出一种基于局部阈值的区域生长法,结合面积、长宽比和填充度等约束,可以准确定位深度图像中的连通域质心的像素位置。

用  $(2w+1) \times (2w+1)$  (其中  $w$  为窗口的一半) 的搜索窗口在图像上滑动,边缘使用镜像填充,计算中心位置  $P(x, y)$  处的局部阈值:

$$T(x, y) = m(x, y) - 0.2 \times \sqrt{\frac{1}{m(x, y)} \sum_{i=-w}^w \sum_{j=-w}^w [G(x+i, y+j) - m(x, y)]^2} \quad (5)$$

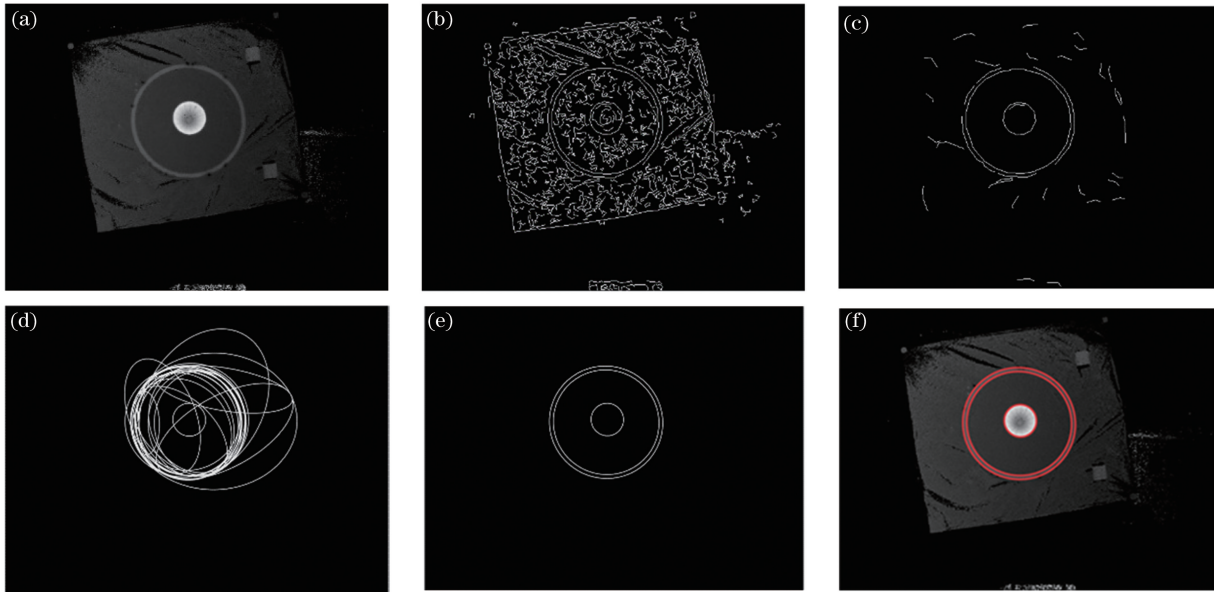


图 5 对接环检测过程。(a)原图;(b)边缘弧段;(c)弧段分割;(d)椭圆拟合;(e)聚类验证;(f)结果图

Fig. 5 Docking ring detection process. (a) Original image; (b) edge arc; (c) arc segmentation; (d) ellipse fitting; (e) cluster verification; (f) result

式中:  $m(x, y) = \frac{1}{(2w+1)^2} \sum_{i=-w}^w \sum_{j=-w}^w G(x+i, y+j)$

表示窗口内像素均值;  $G(x, y)$  为中心位置像素值。

基于局部阈值的区域生长法提取连通域的具体步骤如下:

1) 设置  $w=4$ , 从图像左上角进行逐行扫描, 为每个像素位置  $P(x, y)$  设置一个初始标签值  $l=0$ , 计算该像素位置  $P(x, y)$  的局部阈值  $T(x, y)$ , 直到扫描结束;

2) 再次从图像左上角进行逐行扫描, 直到当前坐标像素值满足区域生长准则  $G(x, y) > T(x, y)$ , 将  $P(x, y)$  作为生长种子点, 并设置其标签值为  $l++$ ;

3) 对生长点 4 邻域进行扩展, 针对满足生长准则的像素, 赋予其相同的标签值  $l$ , 直到所有邻域像素不满足  $G(x, y) > T(x, y)$ , 此时便找到了目标图像中的一个连通区域, 该区域内的像素值均被标记为  $l$ ;

4) 返回至步骤 2), 继续扫描, 直到图像扫描结束, 所有像素点标记结束, 就可以得到目标图像中所有的连通区域。

由于非合作目标航天器的表面通常包络着热控包覆层, 凹凸不平。深度图的连通域检测结果通常不能直接用于位姿计算, 需要进行形态学运算以去除毛刺与孤立的小点, 结合面积、长宽比和填充度筛选出目标接插件。

1) 面积筛选。初步统计检测到的连通域个数  $K$ , 记每个连通域的面积为该连通域的 0 阶图像矩  $S(k) = \sum_x \sum_y G(x, y)$  ( $k=1, 2, \dots, K$ )。已知接插件一般是小于目标航天器对接环的, 本文设置面积范围为  $[20, 0.1 \cdot S_{\text{elp}}]$ , 其中  $S_{\text{elp}}$  为上文目标对接环椭圆的面积, 用于筛选面积较大的干扰项和面积较小的噪声。

2) 长宽比筛选。已知航天器的接插件一般为方形, 可利用此信息筛选部分狭长的候选连通域。定义长宽比表示连通域的形状  $R_{\text{shape}}(k) = W(k)/L(k)$ , 其中  $W(k)$ 、 $L(k)$  分别表示该连通域最小外接矩形的宽和高。本文设置  $R_{\text{shape}}(k)$  的范围是  $[0.7, 1.5]$ 。

3) 填充度筛选。定义填充度  $R_{\text{fill}}(k)$  为连通域最小外接矩形的填充程度,  $R_{\text{fill}}(k) = S(k)/H(k)$ , 其中  $H(k)$  表示该连通域最小外接矩形的面积。本文设置  $R_{\text{fill}}(k)$  的范围是  $[0.7, 1]$ , 用于筛选部分存在空洞的连通域。

本文采用的目标航天器表面有两个形状大小相似的接插件(图 6), 连通域检测结果如图 6(f) 所示。为确保目标航天器运动过程中目标坐标系的一致性, 采用距离对接环中心最近的接插件作为有效接插件, 确定目标坐标系  $X$  轴。

### 2.3 相对位姿求解方法

本文在非合作目标的表面建立一个目标坐标系  $O'-X'Y'Z'$ 。如图 7 所示, 定义对接环平面的中心位

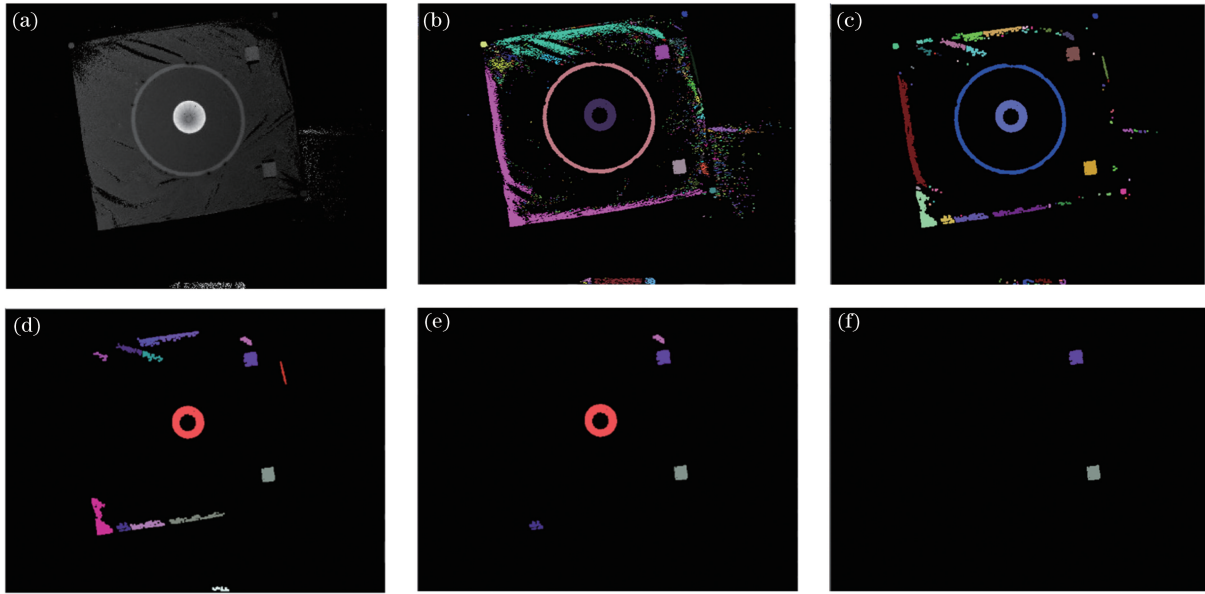


图 6 接插件检测过程。(a)原图;(b)二值图像连通域检测;(c)形态学运算;(d)面积筛选;(e)长宽比筛选;(f)填充度筛选  
Fig. 6 Detection process of connector. (a) Original image; (b) binary image connected component detection; (c) morphological operation; (d) area filtering; (e) aspect ratio filtering; (f) fill degree filtering

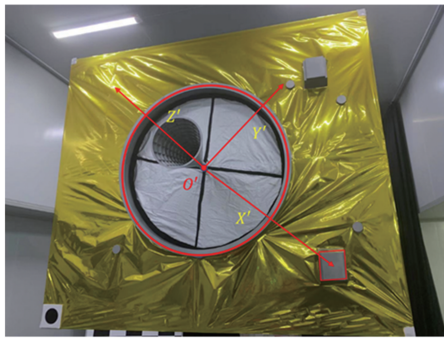


图 7 非合作目标航天器卫星模型图

Fig. 7 Satellite model of non-cooperative target spacecraft

置为原点  $O'$ ,  $Z'$  轴为对接环平面的法向, 并指向相机, 对接环中心位置指向有效接插件表面中心位置的单位向量为  $\mathbf{X}$ ,  $Y'$  轴方向向量由  $Z'$  轴方向向量和向量  $\mathbf{X}$  叉乘得到, 再将  $Y'$  轴方向向量与  $Z'$  轴方向向量进行叉乘, 得到  $X'$  轴方向向量。

假设目标航天器对接环中心空间三维坐标为  $O'(x_o, y_o, z_o)$ , 计算对接环平面法向量  $\mathbf{n}_z$ , 接插件中心位置空间三维坐标为  $A(x_A, y_A, z_A)$ , 则单位向量  $\mathbf{X}$  为  $\mathbf{X} = \frac{\overrightarrow{O'A}}{\|\overrightarrow{O'A}\|_2}$ , 目标坐标系  $Y'$  轴单位法向量为  $\mathbf{n}_y = \mathbf{n}_z \times \mathbf{n}_x$ , 再次叉乘得到  $\mathbf{n}_x = \mathbf{n}_y \times \mathbf{n}_z$ , 这确保了坐标系三轴相互垂直。

按照右手系定则旋转方向姿态角, 大拇指指向轴线方向, 四指方向为旋转的正方向。目标航天器依次沿着相机坐标系的  $Z_c, Y_c, X_c$  轴旋转, 其旋转

矩阵与沿目标坐标系自身  $X', Y', Z'$  轴依次旋转  $\alpha, \beta, \gamma$  得到的旋转矩阵相同。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(x, \alpha)\mathbf{R}(y, \beta)\mathbf{R}(z, \gamma) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{R}(x, \alpha)\mathbf{R}(y, \beta)\mathbf{R}(z, \gamma)$  表示目标航天器依次绕自身坐标系  $X, Y, Z$  轴顺时针旋转  $\alpha, \beta, \gamma, r_{ij} (i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3)$  表示旋转矩阵  $\mathbf{R}$  对应位置的元素。

TOF 相机坐标系到目标坐标系的平移向量和各轴欧拉角的计算式分别为

$$\mathbf{T} = \mathbf{O}' = [X_o \ Y_o \ Z_o]^\top, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(-r_{23}/r_{33}) \\ \beta = \arcsin r_{13} \\ \gamma = \arctan(-r_{12}/r_{11}) \end{cases}. \quad (8)$$

## 2.4 实验验证

搭建的地面验证系统如图 8 所示, 主要包括 TOF 相机视觉测量系统、空间机器人控制器、滑动导轨和非合作目标卫星模型等部分。

图 8 中 TOF 相机安装在左边机器人上, 机器人固定在导轨上, 通过移动机器人在导轨上的位置来进行距离变化模拟, 卫星模型安装在右边机器人机械臂上用来模拟旋转目标卫星的运动状态。

由于无法获取 TOF 相机与卫星模型间的绝对位置和姿态, 本文设计 4 组不同工况下的对照实验

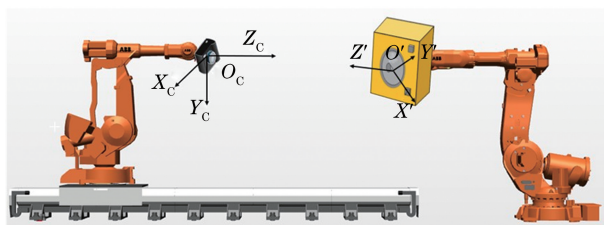


图 8 地面验证系统示意图

Fig. 8 Ground verification system diagram

进行验证,每次只改变一个自由度,通过计算两个工况间的相对位姿信息来验证算法的有效性。本文使用 LUCID Helios 3D TOF 相机,单次实验共采集 100 帧图像用于计算目标模型的相对位姿。下面的实验都是用 C++ 编程语言实现的,并在带有 Win10 的计算机(i7-7700, 2.8 GHz, 8 GB Ram)上进行测试。

- 1) 移动 TOF 相机,使其距模型约 4 m,模型保持初始状态静止不动,采集共 100 帧图像;
- 2) 保持 TOF 相机不动,模型绕目标坐标系 Z 轴逆时针旋转 10°(翻滚角),采集 100 帧图像;
- 3) 移动 TOF 相机,使其距模型约 3 m,模型保持静止不动,采集 100 帧图像;
- 4) 保持 TOF 相机不动,模型绕相机坐标系 X 轴逆时针旋转 5°(偏航角),采集 100 帧图像。

### 3 分析与讨论

本文通过计算目标在相机坐标系下 100 帧图像的位姿并将其与 ORB 方法<sup>[18]</sup>计算的位姿进行对比,从而评价本文方法的测量精度与鲁棒性。实验 1 采用本文方法,其结果如图 9 所示,图 9(a)~(c)

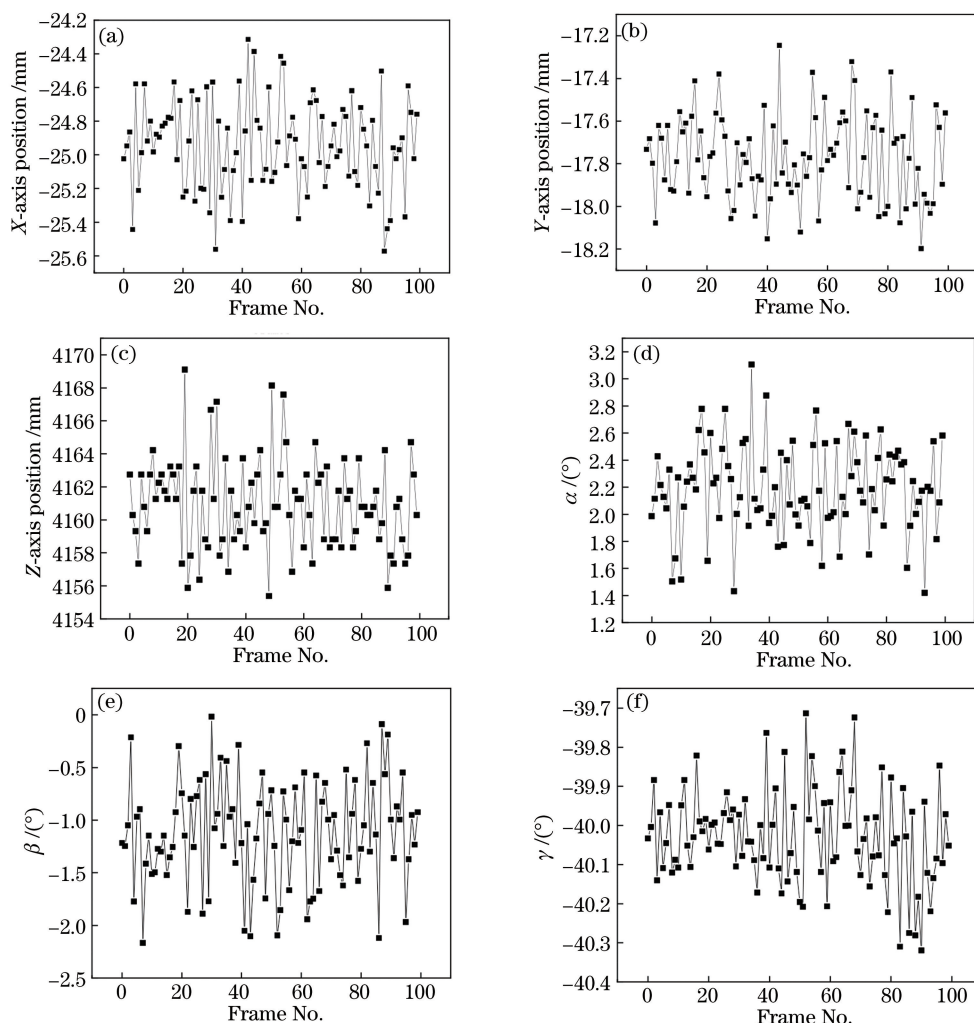


图 9 实验 1 中本文方法测得的卫星模型姿态信息。(a) X 轴相对位置;(b) Y 轴相对位置;(c) Z 轴相对位置;

(d) X 轴旋转欧拉角  $\alpha$ ;(e) Y 轴旋转欧拉角  $\beta$ ;(f) Z 轴旋转欧拉角  $\gamma$

Fig. 9 Pose information of satellite model in test 1 with our method. (a) Relative position of X-axis; (b) relative position of Y-axis; (c) relative position of Z-axis; (d) rotational Euler angle  $\alpha$  of X-axis; (e) rotational Euler angle  $\beta$  of Y-axis; (f) rotational Euler angle  $\gamma$  of Z-axis

表示目标航天器三轴相对于 TOF 相机坐标系绝对位置的波动变化,图 9(d)~(f)表示三轴欧拉角波

动变化。实验 1 用 ORB 方法计算前后帧相对位姿,并输出三轴位置与欧拉角,结果如图 10 所示。

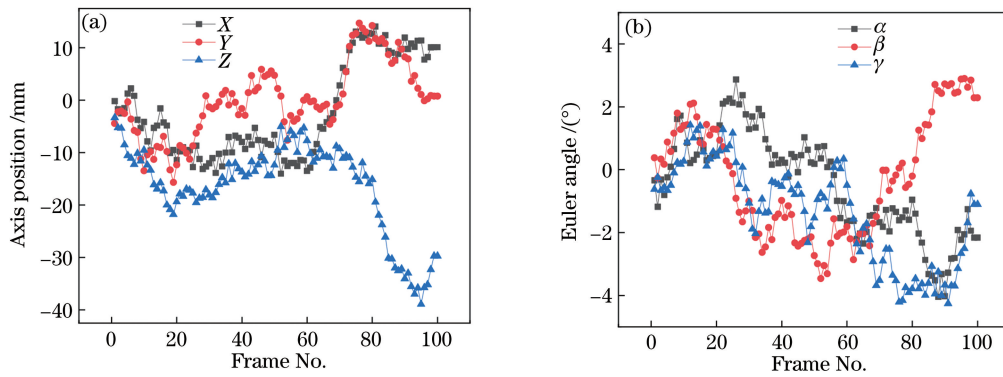


图 10 实验 1 中 ORB 方法测得的卫星模型姿态信息。(a)三轴位姿信息;(b)三轴旋转欧拉角信息  
Fig. 10 Pose information of satellite model in test 1 with ORB method. (a) Pose information of three axis;  
(b) rotational Euler angles of three axis

由图 9 可知,本文方法计算得到的 X 轴绝对位置在 -25.6 mm 到 -24.2 mm 之间波动,Y 轴绝对位置在 -18.2 mm 到 -17.2 mm 之间波动,Z 轴绝对位置在 4155 mm 到 4170 mm 之间,波动范围达到 15 mm。旋转角  $\alpha$  在 1.4°到 3.1°之间波动,旋转角  $\beta$  在 -2.2°到 0°之间波动,旋转角  $\gamma$  在 -40.3°到 -39.7°之间波动。如图 10 所示,ORB 方法在静止不动的情况下得到的 Z 轴最大误差可以达到 40 mm,欧拉角最大误差可以达到 4°。经对比可

得,本文方法的测量结果比 ORB 方法更稳定,鲁棒性更好。

由于 Z 轴绝对位置是由 TOF 相机深度图直接得来的,真实的深度信息被归一化在 256 个灰度值内,1 个灰度值的误差会引起几毫米的误差,造成了精度的损失。为确保算法的准确性,本文将 100 帧图像位姿的均值作为有效值。表 2 详细列出了实验 1~4 中本文算法计算的 100 帧图像三轴位置与欧拉角的均值与标准差。

表 2 相对位姿测量结果

Table 2 Measurement results of relative pose

Test	Parameter	X /mm	Y /mm	Z /mm	$\alpha$ / (°)	$\beta$ / (°)	$\gamma$ / (°)
Test 1	Mean value	-24.9450	-17.7542	4160.9610	2.1898	-1.1236	-40.0284
	Standard deviation	0.2714	0.2437	2.8402	0.3269	0.4944	0.1210
Test 2	Mean value	-24.7347	-17.5638	4161.6241	2.3504	-1.3453	-50.1938
	Standard deviation	0.2615	0.2739	2.7273	0.3097	0.4273	0.1508
Test 3	Mean value	-24.8963	-17.6972	3160.7328	2.2107	-1.0863	-50.0215
	Standard deviation	0.2243	0.2357	2.3254	0.27874	0.3743	0.0987
Test 4	Mean value	-25.0107	-17.5758	3161.4673	-2.7394	-1.3826	-50.1332
	Standard deviation	0.2386	0.2466	2.3649	0.3672	0.3581	0.1264

由表 2 可知,实验中 100 帧图像中目标模型在 TOF 相机坐标系下 X、Y、Z 轴绝对位置的相对误差标准差分别在 0.3 mm,0.3 mm,3 mm 以内,姿态角相对误差标准差分别小于 0.4°,0.5°,0.2°,可以认为算法结果具有较好的鲁棒性。而且,实验 3、4 的三轴位置与姿态角的标准差都比实验 1、2 小,说明相机与目标的距离越近,测量结果的波动越小,精度越高。

实验 2 相当于在实验 1 基础上将目标航天器围绕自身 Z 轴逆时针旋转 10°,实验 3 相当于在实验 2 的基础上将目标航天器沿着相机坐标系 Z 轴移动 1000 mm,实验 4 相当于在实验 3 的基础上逆时针进行 5°偏航运动。故为对比本文方法和 ORB 方法,求取不同条件下目标航天器的相对位姿,计算结果如表 3 所示。



表 3 不同工况下的相对位姿  
Table 3 Relative pose of different working conditions

Method	Test	X /mm	Y /mm	Z /mm	$\alpha /(^{\circ})$	$\beta /(^{\circ})$	$\gamma /(^{\circ})$
Our method	Tests 1 and 2	0.2103	0.1904	0.7091	0.1606	0.2217	10.1654
	Tests 2 and 3	0.1616	0.1334	1000.7926	0.1397	0.2590	0.1723
	Tests 3 and 4	0.1144	0.1214	0.7345	4.9501	0.2963	0.1117
ORB method	Tests 1 and 2	0.8430	0.7595	1.0391	0.4108	0.3364	10.9608
	Tests 2 and 3	0.6414	0.5487	1002.2569	0.3361	0.2927	0.3260
	Tests 3 and 4	0.6837	0.6268	0.9582	5.5835	0.3681	0.2732

对比实验 1、2 的结果可得,理论上 Z 轴方向的旋转角为  $10^{\circ}$ ,本文方法的计算结果为  $10.1654^{\circ}$ ,ORB 方法的结果为  $10.9608^{\circ}$ ;对比实验 2、3 的结果可知,理论上 Z 轴方向的位置结果为 1000 mm,本文方法计算得到的结果为 1000.7926 mm,ORB 方法的结果为 1002.2569 mm;对比实验 3、4 的结果可得,理论欧拉角  $\alpha$  为  $5^{\circ}$ ,本文方法计算得到的结果为  $4.9501^{\circ}$ ,ORB 方法的结果为  $5.5835^{\circ}$ 。对比实验结果可知,本文方法的测量相对位置与姿态角的精度均高于 ORB 方法。且由表 3 中最大误差可知,100 帧位姿结果均值的三轴位置误差小于 0.8 mm,姿态角误差小于  $0.3^{\circ}$ ,均满足航天任务要求。

## 4 结 论

针对空间近距离交会对接过程中需精确获取目标位姿信息的问题,提出了一种高效可靠的 TOF 相机位姿测量方法。该方法具有计算量小、测量精度高、鲁棒性好等优点。通过本文方法与 ORB 方法的对比验证实验,从静止状态和相对状态两方面对算法进行评估,结果表明静止状态下不同帧图像的相对位姿是波动的,且相机与目标的距离越远波动越大。但计算得到 100 帧图像位姿均值的三轴相对位置误差在 0.8 mm 内,姿态角相对误差在  $0.3^{\circ}$  内,满足航天任务中的指标要求,这表明该方法是一种实用有效的在轨任务位姿测量方法。未来需要进一步研究 TOF 相机探测原理,以减小获取深度值时的波动与误差,提高位姿测量的精度。

## 参 考 文 献

- [1] Gu Y Y, Wang L. Fast-swirl space non-cooperative target spin state measurements based on a monocular camera[J]. Acta Astronautica, 2020, 166: 156-161.
- [2] Oumer N W, Panin G. 3D point tracking and pose estimation of a space object using stereo images[C]//

Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), November 11-15, 2012, Tsukuba, Japan. New York: IEEE Press, 2012: 796-800.

- [3] Lu R S, Shi Y Q, Hu H B. Review of three-dimensional imaging techniques for robotic vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 040001.  
卢荣胜, 史艳琼, 胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 040001.
- [4] Chen S J, Zhu Z C, Zhang Y H, et al. Extrinsic calibration for lidar and stereo vision using 3D feature points[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 030102.  
陈少杰, 朱振才, 张永合, 等. 基于 3D 特征点的激光雷达与立体视觉配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 030102.
- [5] Liang B, He Y, Zou Y, et al. Application of time-of-flight camera for relative measurement of non-cooperative target in close range [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(9): 1080-1088.  
梁斌, 何英, 邹瑜, 等. ToF 相机在空间非合作目标近距离测量中的应用[J]. 宇航学报, 2016, 37(9): 1080-1088.
- [6] Rohrschneider R, Masciarelli J, Miller K L, et al. An overview of ball flash LIDAR and related technology development [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, August 19-22, 2013, Boston, MA. Virginia: AIAA, 2013.
- [7] Jiang B, Jin X L. Improved correction algorithm for harmonic- and intensity-related errors in time-of-flight cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111024.  
蒋彬, 金湘亮. 改进的 TOF 相机谐波和强度误差校正算法设计[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111024.
- [8] Kim S K, Kang B, Heo J, et al. Photometric stereo-based single time-of-flight camera [J]. Optics Letters, 2014, 39(1): 166-169.

- [9] Henry P, Krainin M, Herbst E, et al. RGB-D mapping: using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(5): 647-663.
- [10] Brachmann E, Krull A, Michel F, et al. Learning 6D object pose estimation using 3D object coordinates [M]//Fleet D, Pajdla T, Schiele B, et al. *Computer vision-ECCV 2014. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2014: 536-551.
- [11] Gómez H, Giorgi G, Eissfeller B. Pose estimation and tracking of non-cooperative rocket bodies using Time-of-Flight cameras [J]. *Acta Astronautica*, 2017, 139: 165-175.
- [12] Aglietti G S, Taylor B, Fellowes S, et al. The active space debris removal mission Remove Debris. Part 2: in orbit operations [J]. *Acta Astronautica*, 2020, 168: 310-322.
- [13] Wilde M, Blackwell B, Kish B. Experimental evaluation of a COTS time-of-flight camera as rendezvous sensor for small satellites [C]//2020 IEEE Aerospace Conference, March 7-14, 2020, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1-16.
- [14] Yan X P, Ao L, Yang X. Three-dimensional pose measurement method of non-cooperative rectangular target based on time-of-flight camera[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(9): 2856-2860.
- 闫小盼, 敖磊, 杨新. 基于 TOF 相机的非合作矩形目标三维位姿测量方法[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(9): 2856-2860.
- [15] Liu Y. The method of non-cooperative spacecraft pose measurement based on circular feature with ToF camera [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- 刘悦. 基于圆特征的非合作航天器位姿 ToF 相机测量方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [16] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] Prasad D K, Leung M K H. Clustering of ellipses based on their distinctiveness: an aid to ellipse detection algorithms [C]//2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, July 9-11, 2010, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2010: 292-297.
- [18] Lin F C, Liu Y H, Zhou J F, et al. Optimization of visual odometry algorithm based on ORB feature[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 211507.
- 林付春, 刘宇红, 周进凡, 等. 基于 ORB 特征的视觉里程计算法优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 211507.