

# 空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法

束安<sup>1,2,3</sup>, 裴浩东<sup>1,3\*</sup>, 丁雷<sup>1,3</sup>, 段慧仙<sup>1,3</sup>, 周姗姗<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 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** 针对清理空间非合作目标任务中如何获取目标的相对位置和姿态的难题, 提出一种双目视觉位姿测量方法。首先, 设计了基于双目视觉的位姿测量算法, 利用弧支撑线段的方法快速检测目标表面的对接环, 通过极线约束准则和光流法辅助跟踪算法建立复杂场景下的对接环检测和筛选机制; 利用两次遍历法快速标记连通区域, 加入面积和曲率约束, 提取目标表面特征较突出的规则标志点。利用三维重建后的对接环平面和标志点建立目标坐标系, 解算与世界坐标系之间的位姿关系。之后将算法移植到 DSP6678 信息处理平台, 实现了对空间非合作目标的实时连续位姿测量。通过 3 组不同工况下的小卫星模型实验, 验证了该方法的有效性。

**关键词** 测量; 双目视觉; 非合作目标; DSP6678

**中图分类号** TP391; V557

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202040.1712003

## Binocular Visual Position and Attitude Measurement Method for a Spatial Non-Cooperative Target

Shu An<sup>1,2,3</sup>, Pei Haodong<sup>1,3\*</sup>, Ding Lei<sup>1,3</sup>, Duan Huixian<sup>1,3</sup>, Zhou Shanshan<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, 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** Herein, a measurement method is proposed to obtain the binocular visual position and attitude of a target during the removal of a spatial non-cooperative target. First, an algorithm measuring the position and attitude based on binocular vision is designed. The algorithm detects the docking ring on the target surface based on arc-support line segments. Moreover, it establishes the detection and sifting mechanism of the docking ring in complex environments using polar line constraints and optical flow method. Further, regular marking points with prominent features on the target surface are extracted based on a two-pass algorithm coupled with area and curvature constraints. The measurement algorithm also builds the target coordinate system using the docking ring plane after the execution of a 3-D reconstruction method and regular marking points. Then, the pose relation under the world coordinate system is calculated. Hereafter, the algorithm is transplanted into the DSP6678 information processing platform, and the real-time continuous measurement of the positions and attitudes are realized for a spatial non-cooperative target. The effectiveness of the proposed method is verified using three small satellite model experiments under different working conditions.

**Key words** measurement; binocular vision; non-cooperative target; DSP6678

**OCIS codes** 120.6085; 330.1400; 150.0155; 150.1135

## 1 引 言

随着空间技术的发展, 人类对太空探索的进程大大加快, 导致在轨运行和失效卫星的数量逐年增

加, 以 2019 年印度的反卫星实验为例, 已发现其产生了约 400 多块碎片, 其中有 24 块碎片的轨道远地点超过了国际空间站所在轨道高度, 使国际空间站受损的风险增加了 44%<sup>[1]</sup>。这些碎片以及一些故

收稿日期: 2020-04-10; 修回日期: 2020-05-06; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (Y8K22017N1)

\* E-mail: peihaodong@sina.com

障或失效的卫星、敌方危险航天器等,它们均不能自主地提供有效的轨道姿态参数,也无法提供有效的合作标志器,均属于非合作目标<sup>[2]</sup>。这些失效的卫星和碎片不仅极大浪费了空间轨道的资源,还给正在工作的卫星和国际空间站带来了巨大的威胁。因此,清理空间非合作目标成为了在轨服务领域的重要研究方向<sup>[3]</sup>。

清理空间非合作目标任务的关键在于如何在超近程阶段解算目标的相对位置和姿态。目前常用的测量手段有单目视觉、双目视觉、扫描式激光雷达、无扫描式激光雷达和多传感器融合等<sup>[4]</sup>。其中,双目视觉方法是通过模拟人眼观测物体的立体信息,来直观地反映目标的三维姿态,已经成为较为常用的位姿测量方法。2015年美国 DARPA(美国国防高级研究项目局)在 PHOENIX 计划的基础上提出了“地球静止轨道卫星机器人服务”(RSGS),这套系统采用多目视觉手段,在抓捕非合作目标航天器的逼近阶段,从多台相机中选择成像较好的 3 台相机,利用三目视觉算法,实现了对非合作目标的位置姿态测量,并计划在 2022 年或 2023 年将其送入太空<sup>[5-6]</sup>。德国启动的“德意志在轨服务(DEOS)”计划,考虑到星上处理器的能力有限,将采集数据下传至地面,并以半自主方式从地面为地球同步轨道上的非合作卫星进行在轨服务<sup>[7-8]</sup>。日本提出的“在轨维护系统(OMS)”计划,采用双目立体相机和手眼相机的视觉系统对非合作目标进行位姿测量,其视觉系统采用两种处理图像的方法,以离线处理为主,在线处理为辅<sup>[9]</sup>。与国外相比,我国近年来逐渐将空间的非合作目标测量作为一个研究重点。2009 年徐文福<sup>[10]</sup>等提出了基于图像特征、3D 重构的非合作目标位姿测量方法,在 VC(Microsoft Visual C++)环境下完成了闭环仿真实验;2015 年蔡晗<sup>[11]</sup>针对非合作目标的矩形太阳帆板和星箭对接环等,利用特征提取和最小二乘法椭圆拟合的方法进行双目视觉测量研究,并用 C++ 编程构建对地实验仿真系统,验证了该方法的有效性;2018 年颜坤<sup>[12]</sup>提出了基于尺度不变特征变换(SIFT)算法和极线约束的立体匹配方法,通过主成分分析(PCA)方法完成了对非合作目标的姿态测量,利用计算机采集双目相机的图像数据,完成了对算法的验证。综上所述,目前对空间非合作目标相对位姿的测量方案,大多是利用视觉测量的方法,采用离线的方式对目标进行识别和测量,而这种离线方式一般会因为图像传输延迟而导致视觉测量精度下降。并且国

内针对非合作目标的双目视觉测量技术大多均处在计算机仿真模拟阶段,还没有应用到嵌入式平台。

本文提出一种针对非合作目标的双目视觉位姿测量方法,通过识别非合作目标的对接环和规则标志物,加入极线约束准则和光流法辅助跟踪算法,提高了解算非合作目标的相对位姿的效率和精度。利用三维重建后的对接环平面和标志点建立目标坐标系,解算与世界坐标系之间的位姿关系。之后将设计的算法移植到 DSP C6678 嵌入式平台,实现对空间非合作目标的实时连续位姿测量。最终通过 3 组不同工况下的小卫星模型实验,验证了该方法的有效性。

## 2 空间非合作目标的位姿测量

### 2.1 双目视觉位姿测量模型

双目视觉位姿测量模型的设计思路是基于立体视差原理,获取了被测物体的三维几何信息和运动姿态。本文的双目视觉测量系统为了获得更大的检测视场,采用的两台相机的视场为  $60^\circ$ ,图像的像素分辨率为  $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ ,基线距为  $1.3 \text{ m}$ ,并且将两相机的光轴内旋  $18^\circ$ 。图 1 为本文双目视觉测量系统的示意图。

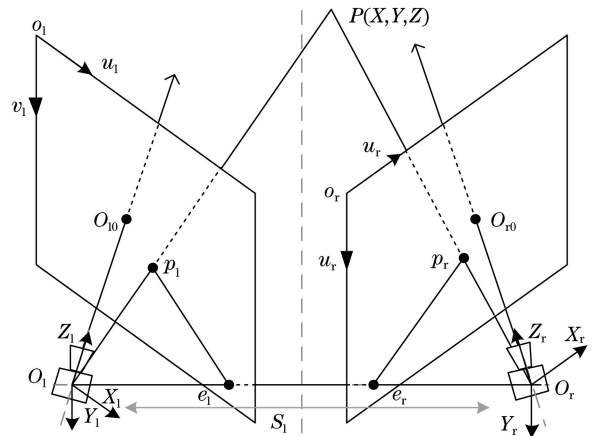


图 1 双目视觉位姿测量系统示意图

Fig. 1 Binocular visual position and attitude measurement model

图 1 中:左右相机的坐标系分别为  $O_l-X_lY_lZ_l$  和  $O_r-X_rY_rZ_r$ ,  $O_l$  与  $O_r$  的连线称为基线,用  $S_1$  表示;图像坐标系分别为  $o_l-u_lv_l$  和  $o_r-u_rv_r$ ,左右图像上的主点记为  $o_l(u_0, v_0)$  和  $o_r(u_0, v_0)$ ;空间点  $P$  在左相机坐标系下的坐标为  $(X, Y, Z)$ ,在左右图像上的投影记为  $p_l(u_l, v_l)$  和  $p_r(u_r, v_r)$ 。假设标定后两相机的投影矩阵分别为  $M_1$  和  $M_2$ ,根据双目视觉测量原理,可得

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^{(1)} - m_{11}^{(1)})X + (u_1 m_{32}^{(1)} - m_{12}^{(1)})Y + (u_1 m_{33}^{(1)} - m_{13}^{(1)})Z = m_{14}^{(1)} - u_1 m_{34}^{(1)} \\ (v_1 m_{31}^{(1)} - m_{21}^{(1)})X + (v_1 m_{32}^{(1)} - m_{22}^{(1)})Y + (v_1 m_{33}^{(1)} - m_{23}^{(1)})Z = m_{24}^{(1)} - v_1 m_{34}^{(1)} \\ (u_r m_{31}^{(2)} - m_{11}^{(2)})X + (u_r m_{32}^{(2)} - m_{12}^{(2)})Y + (u_r m_{33}^{(2)} - m_{13}^{(2)})Z = m_{14}^{(2)} - u_r m_{34}^{(2)} \\ (v_r m_{31}^{(2)} - m_{21}^{(2)})X + (v_r m_{32}^{(2)} - m_{22}^{(2)})Y + (v_r m_{33}^{(2)} - m_{23}^{(2)})Z = m_{24}^{(2)} - v_r m_{34}^{(2)} \end{cases} \quad (1)$$

以上 4 个线性方程中,  $m_{ij}^{(k)}$  ( $k=1, 2; i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, 4$ ) 为投影矩阵  $\mathbf{M}$  中的各个元素, 只有  $(X, Y, Z)$  为未知量, 利用最小二乘法就可以得到  $P$  点的最优解。

## 2.2 极线约束准则

图 1 中,  $P, O_l$  和  $O_r$  构成的平面称为极平面, 极平面与左右图像平面的交点为  $p_l, p_r, e_l$  和  $e_r$ , 其中  $e_l$  和  $e_r$  分别为左右相机的光心在另一相机成像平面的投影。根据双目极线约束准则, 当已知空间点  $P$  在左图像的位置  $e_r$  时, 相应的右图像匹配点  $p_r$  必然在极线  $L$  上, 反之亦然。

可以将极线约束的关系式表示为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{p}_r^T \mathbf{F} \mathbf{p}_l = 0, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{F} = (\mathbf{K}_r^{-1})^T \mathbf{R} \mathbf{T} \mathbf{K}_l^{-1}$ , 其中  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  表示了右相机相对于左相机的旋转矩阵和平移向量,  $\mathbf{K}_l$  和  $\mathbf{K}_r$  表示左右相机的内参矩阵。所以  $\mathbf{F}$  融合了相机的内外参数, 被称为双目位姿测量系统的基础矩阵。利用极线约束准则可以调节图像点的匹配效率, 有利于满足基于嵌入式平台的双目位姿测量系统的实时性要求<sup>[14-15]</sup>。

## 2.3 非合作目标关键信息提取

在双目视觉位姿测量系统中, 经过两台相机采集到的图像含有丰富的信息, 但这些信息很大一部分并不是位姿测量所需要的, 需要系统从这些丰富的信息中提取关键信息, 以进行同名点匹配和目标位姿解算。本文研究的对象是非合作目标, 这些目标通常表面含有星箭对接环、规则标志和矩形边框等特征较为明显的信息, 如图 2 所示。对于追踪航天器而言, 更希望能够实时获取非合作目标的对接环信息以及运动轨迹等, 所以本文通过提取非合作目标表面的对接环和规则标志点, 建立目标坐标系, 解算相对于双目相机的位姿关系, 为追踪航天器提供了实时连续的精准相对导航信息。

### 2.3.1 对接环椭圆提取

常见的椭圆提取方法就是 Hough 变换, 其基本思路是点-线的对偶性, 即对图像空间进行坐标变换, 使其在另一坐标的特定位置出现峰值, 从而将检测曲线转化为寻找峰值的问题<sup>[16]</sup>。对于某一椭圆, 可以用一般方程表示为

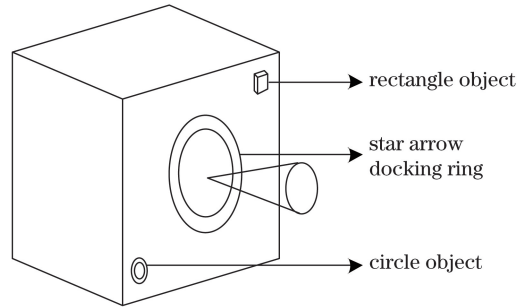


图 2 非合作目标结构模拟图

Fig. 2 Non-cooperative target structure simulation diagram

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + dx + Ey + F = 0, \quad (3)$$

椭圆的长短轴位于坐标轴上时, 也可以表示为

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1, \quad (4)$$

其中,  $a$  表示椭圆的长半轴,  $b$  表示椭圆的短半轴,  $(x_0, y_0)$  为椭圆的圆心, 当椭圆相对于坐标轴旋转某一角度  $\theta$  时, 椭圆方程包含 5 个参数  $(x_0, y_0, a, b, \theta)$ , 将其与一般方程进行转换可得

$$\begin{cases} x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \\ a^2 = 2 \frac{Ax_0^2 + Cy_0^2 + Bx_0y_0 - F}{(A + C) - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \\ b^2 = 2 \frac{Ax_0^2 + Cy_0^2 + Bx_0y_0 - F}{(A + C) + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \\ \theta = \frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{B}{A - C} \end{cases} \quad (5)$$

使用 Hough 变换检测椭圆时, 已知椭圆的方程包含 5 个参数  $(x_0, y_0, a, b, \theta)$ , 故需要建立一个五维空间的累加器, 并将累加器的累计值作为判断依据。这种方法无要求曲线连续, 受噪声和椭圆遮挡的影响较小, 但是计算量大, 需要大量的存储空间, 难以在嵌入式平台满足实时要求。本文采用基于弧支撑线段的椭圆检测方法来实现对左右图像对接环的快速识别<sup>[17]</sup>。该方法利用 LSD (Line Segment Detector) 算法<sup>[18]</sup>, 在线性时间内提取亚像素级的直线段, 构成相应的圆弧段, 并用最小二乘法拟合椭圆参数, 然后建立由粗到细的筛选机制, 具体步骤如下:



1) 运用 LSD 算法从原始的灰度图像中提取线段  $E_{sum}$ , 保存去除直线段后弧支撑线段的集合  $E_{arc}$ ;

2) 基于弧支撑线段的连续性和凸性, 连接属于同一椭圆的弧支撑线段, 形成了弧支撑组  $G_{arc}$ ;

3) 采用两种互补的方法拟合初始椭圆  $S$ , 局部选择具有显著特点的弧支撑组和全局搜索所有有效配对的弧支撑组;

4) 运用椭圆类聚算法对  $S$  进行聚类分析, 产生候选椭圆集合  $C'$ ;

5) 最后在椭圆候选集中应用椭圆的几何性质加以验证, 检测出椭圆。

上述椭圆检测算法在较多场景下均能准确提取出对接环椭圆, 但因空间环境较为复杂, 光照强度不稳定, 椭圆边缘容易被高光覆盖, 故从空间环境中提取的圆弧段既包含真实圆环边缘, 也可能包含阴影和高亮边缘, 从而导致检测结果为多个椭圆, 增加了系统的误检概率。由于双目系统通常缓慢接近于非合作目标, 相邻帧之间的运动范围较小, 亮度变化基本恒定, 故本文利用极线约束准则和光流法辅助跟踪<sup>[19-20]</sup>的方法建立完善的对接环检测和筛选机制, 有效提高了左右图像椭圆的检测和匹配精度, 具体步骤如下:

1) 对于初始帧, 利用弧支撑线段的方法检测左右图像上的椭圆集合  $E_l = \{e_l^0, e_l^1, \dots\}$  和  $E_r = \{e_r^0, e_r^1, \dots\}$ , 利用极线约束准则匹配各个椭圆圆心, 得到两两配对的椭圆候选集  $E_{binocular} = \{(e_l^{i'}, e_r^{i'})\}$ ,  $(e_l^{i'+1}, e_r^{i'+1}), \dots\}$ , 选取外环作为最终的检测对象, 即长短轴之和最大值所对应的椭圆为  $(e_l^{i'}, e_r^{i'})$ ; 另外, 分别在对接环外环椭圆  $e_l^{i'}$  和  $e_r^{i'}$  上等间隔选取 36 个点(假设每  $10^\circ$  为一间隔), 作为光流法辅助跟踪的初始点集  $P_{prev}$ 。

2) 对于非初始帧, 以左图为例, 利用弧支撑线段的方法检测左右图像上的椭圆集合  $E_l^{(t)}$ ,  $t$  表示当前的帧数, 通过光流法追踪上一帧椭圆上的 36 个点在当前帧的位置  $P_{next}^{(t)}$ , 最后在所有检测到的椭圆集合中选择和追踪点距离平均值最小的椭圆作为对接环外环椭圆。如果当前帧椭圆检测失败或最小距离平均值超过阈值  $D_{th}^{(t)}$  (设为 0.05), 则通过  $P_{next}^{(t)}$  点集拟合椭圆, 作为当前帧的对接环外环椭圆。右图雷同, 不再详述。

图 3 和图 4 展示了对接环提取算法在暗室复杂光照条件下的检测结果, 非合作目标在距双目相机 5 m 处的位置, 卤素灯放置于双目相机左侧, 向对接环中心照射。若倾斜照射, 对接环的左边则会被高

光覆盖, 形成较大范围的阴影。阴影部分的圆弧段参与椭圆拟合, 导致左右图上的检测结果均为含有多个椭圆, 如图 3(a) 和图 4(a) 所示, 利用极线约束准则和光流法辅助跟踪方法优化后, 可以准确提取出对应图像上的外环椭圆, 如图 3(b) 和图 4(b) 所示。

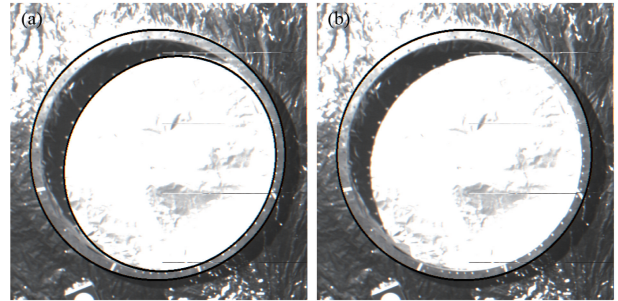


图 3 左图对接环检测示意图。(a) 候选椭圆集合;  
(b) 筛选后的外接椭圆

Fig. 3 Schematic of docking ring detection of left images.  
(a) Set of candidate ellipses; (b) bounding ellipse by filtered

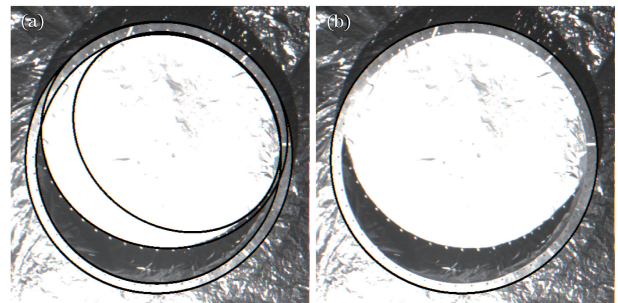


图 4 右图对接环检测示意图。(a) 候选椭圆集合;  
(b) 筛选后的外接椭圆

Fig. 4 Schematic of docking ring detection of right images.  
(a) Set of candidate ellipses; (b) bounding ellipse by filtered

### 2.3.2 规则标志提取

为了准确建立非合作目标坐标系, 需要在重建对接环平面的同时, 稳定提取目标表面的规则标志。由于非合作目标卫星的表面附着有热控包覆层, 凹凸不平, 特征较为稀疏, 且亮度随着太阳入射角和目标表面反射率的变化而变化, 故提取时有一定的困难。但其表面常含有一些形状规则的信息, 且颜色明显区别于周围包覆层, 或亮或暗。所以利用两次遍历法快速标记连通区域, 结合面积和曲率约束, 可以快速识别图像上的标志候选点。以规则标志较暗的情况为例, 设定  $G_{max} = 60, G_{min} = 1$ , 提取算法包括:

1) 提取有效像素区域: 像素值在  $G_{min}$  和  $G_{max}$  之间的点, 像素值设为 1, 其他设为 0。

2) 利用两次遍历法实现连通区域的快速标记

(1) 第一次遍历: 对图像进行逐行扫描, 为每个像素位置设置一个标签  $h$ , 初始值为 -1。对于位置



为  $P(x, y)$  的当前像素,若像素值  $G(x, y)$  为 1,且其左邻和上邻位置的像素值均为 0 时,则赋予  $P$  点一个新的标签  $h = h + 1$ ;如果左邻和上邻位置存在像素值为 1 的像素邻域,则将邻域中的最小值  $h'$  赋予  $P$  点,并记录邻域中各个  $h$  之间的相等关系;

(2) 第二次遍历:根据第一次遍历的结果,将同属于一个区域的连通区域统一编号,记录连通区域数量。

图 5 展示了两次遍历法的标记过程,完成第一次遍历后,图上各连通区域已被标记,但同一区域内存在不同编号的情况,第二次遍历将属于同一区域的编号统一,并按从小到大的顺序排列,得到 4 个连通区域块。

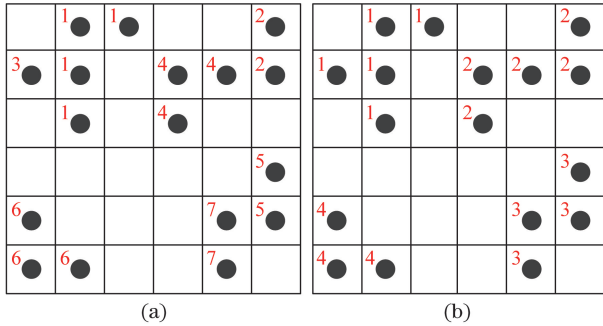


图 5 两次遍历法示意图。(a)第一次遍历;(b)第二次遍历  
Fig. 5 Two-pass algorithm diagram. (a) Primary pass; (b) secondary pass

### 3) 面积和曲率筛选机制

(1) 统计第一步提取的各个连通区域的像素数目,记为  $N (n = 0, 1, 2, \dots, N)$ ,  $N$  为总连通区域个数。设置合适的阈值将数目过小和过大的区域剔除,本文设置面积阈值为  $s_{\min} = 200, s_{\max} = 3000$ ;

(2) 计算剩余连通区域的曲率和长宽比,即

$$\begin{cases} \rho = \frac{N}{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})} \\ \eta = \frac{(y_{\max} - y_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \end{cases} \quad (6)$$

对于形状规则的矩形或圆形标志信息,其长宽比趋近于 1,曲率也在一定的阈值范围内,通过合理的设置可以提取出有效的候选区域。本文设置的曲率阈值为  $\rho_{\min} = 0.5, \rho_{\max} = 1.0$ ,长宽比阈值为  $\eta_{\min} = 0.7, \eta_{\max} = 1.5$ ;

(3) 提取候选区域的几何中心,作为标志候选点,即

$$\begin{cases} x_{\text{center}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \\ y_{\text{center}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n \end{cases} \quad (7)$$

由于本文算法所设置的阈值具有一般性,经以上步骤提取出左右图像的候选区域后,需要通过极线约束准则剔除不匹配的点,最后在所有的候选匹配点中,选取离对接环中心距离最近的点,作为稳定检测的标志点。图 6 展示了算法检测到的圆形标志点示意图。

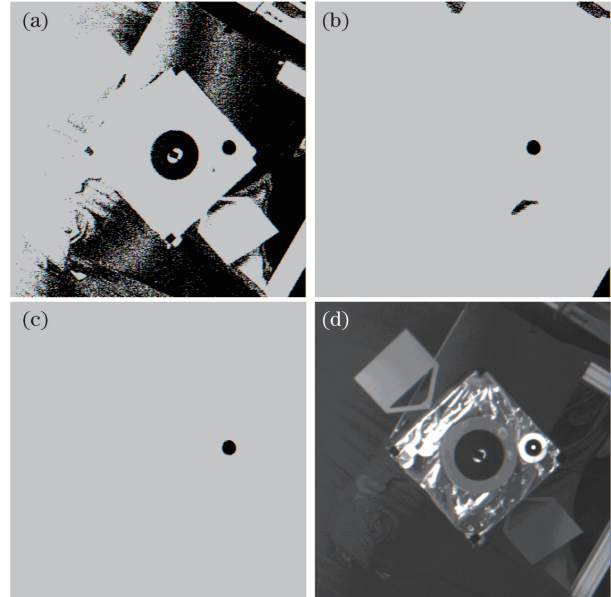


图 6 圆形标志点检测。(a)两次遍历连通区域;(b)面积筛选区域;(c)曲率筛选区域;(d)规则标志点几何中心  
Fig. 6 Detection of circular marking points. (a) Connected regions by two-pass algorithm; (b) regions with area constraints; (c) regions with curvature constraints; (d) geometric centers of the regular marking points

## 2.4 非合作目标姿态测量方法

要解算非合作目标的位姿关系,需给定明确的世界坐标系与目标坐标系。由于项目中的世界坐标系与左相机坐标系只存在刚体变换,为简化计算,本研究定义双目相机的左相机坐标系为系统的世界坐标系  $O_l - X_l Y_l Z_l$ ,目标坐标系的原点  $O_p$  位于对接环的中心,  $Z_p$  轴为对接环平面的法向量,并指向世界坐标系,原点  $O_p$  指向规则标志点的向量为  $X_p$  轴,  $Z_p$  轴和  $X_p$  轴的叉乘为  $Y_p$  轴,如图 7 所示。

假设对接环中心和规则标志点在世界坐标系下的坐标为  $\mathbf{X}_0^{(t)}$  和  $\mathbf{X}_1^{(t)}$ ,  $t$  表示当前帧数,则目标坐标系的单位方向轴  $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y$  和  $\mathbf{n}_z$  表示为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_x = (\mathbf{X}_1^{(t)} - \mathbf{X}_0^{(t)}) / \|\mathbf{X}_1^{(t)} - \mathbf{X}_0^{(t)}\|_2 \\ \mathbf{n}_y = \mathbf{n}_z \times \mathbf{n}_x \\ \mathbf{n}_z = \mathbf{n}_0^{(t)} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{n}_0^{(t)}$  为对接环平面的法向量。则目标系相对

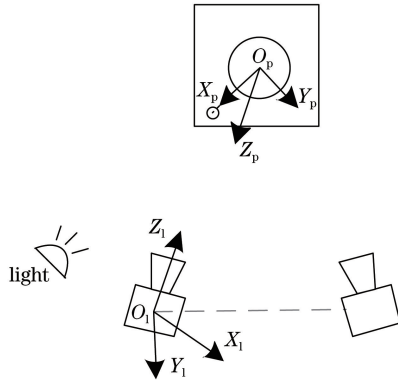


图 7 目标坐标系与左相机坐标系的位姿关系图

Fig. 7 Pose diagram of the target coordinate system and the left camera coordinate system

于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_w^{(t)} = [\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z] \\ \mathbf{T}_w^{(t)} = \mathbf{X}_0^{(t)} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} \theta_x = \arctan(r_{32}, r_{33}) \\ \theta_y = \arctan(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}), \\ \theta_z = \arctan(r_{21}, r_{11}) \end{cases}, \quad (10)$$

其中,  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  和  $\theta_z$  分别为目标的三轴角度变化,  $r_{ij}$  ( $i=1, \dots, 3; j=1, \dots, 3$ ) 为旋转矩阵  $\mathbf{R}_w^{(t)}$  的对应元素。所以解算非合作目标位姿关系的本质就是计算(9)式中的  $\mathbf{R}_w^{(t)}$  和  $\mathbf{T}_w^{(t)}$ 。根据 2.3.1 节和 2.3.2 节的对接环和规则标志点提取方法, 可以计算出  $\mathbf{X}_0^{(t)}$  和  $\mathbf{X}_1^{(t)}$ 。所以还需要三维重建出非合作目标的对接环平面, 以计算对接环平面的法向量  $\mathbf{n}_0^{(t)}$ 。

首先, 利用双目相机参数重建出左右图像对接环椭圆  $e_l^{(t)}$  和  $e_r^{(t)}$  在左右相机坐标系下的三维圆: 将  $e_l^{(t)}$  和  $e_r^{(t)}$  反投影得到两个  $3 \times 3$  的二次锥面矩阵  $\mathbf{Q}_l^{(t)}$  和  $\mathbf{Q}_r^{(t)}$ , 对其进行特征分解可得对应的特征向量  $\lambda_\alpha^{(1)}$ 、 $\lambda_\alpha^{(2)}$ 、 $\lambda_\alpha^{(3)}$  (且  $\lambda_\alpha^{(1)} > \lambda_\alpha^{(2)} > \lambda_\alpha^{(3)}$ ) 和特征向量  $\xi_\alpha^{(1)}$ 、 $\xi_\alpha^{(2)}$ 、 $\xi_\alpha^{(3)}$ , 其中  $\alpha=1, r$ , 则两个椭圆反投影后的三维圆截面的单位法向量  $\zeta_\alpha^{(t)}$  ( $i=1, 2$ ) 为

$$\zeta_\alpha^i = \sqrt{\frac{\lambda_\alpha^{(1)} - \lambda_\alpha^{(2)}}{\lambda_\alpha^{(1)} - \lambda_\alpha^{(2)}}} \xi_\alpha^{(1)i-1} + (-1)^i \sqrt{\frac{\lambda_\alpha^{(2)} - \lambda_\alpha^{(3)}}{\lambda_\alpha^{(1)} - \lambda_\alpha^{(3)}}} \xi_\alpha^{(3)} \quad (11)$$

对应的两个三维圆截面法向量为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_l^{(i)} = \zeta_l^{(i)} \\ \mathbf{n}_r^{(j)} = \mathbf{R} \zeta_r^{(j)} \end{cases}, \quad (12)$$

其中:  $i=1, 2; j=1, 2; \mathbf{R}$  表示右相机相对于左相机的旋转矩阵。由于两个平面椭圆反投影得到的三维圆截面需要一致, 故需要从  $\|\mathbf{n}_r^{(j)} - \mathbf{n}_l^{(i)}\|_2$  选择最小的一对  $\mathbf{n}_r^{(j)}$  和  $\mathbf{n}_l^{(i)}$ , 取其平均值作为三维圆的单位法向量  $\mathbf{n}_0^{(t)}$ 。

此外, 当双目视觉测量算法未检测到对接环时, 无法通过重建对接环平面来求解目标的位姿信息, 故需在检测规则标志点部分, 提取 3 组满足极线约束的规则标志点  $\mathbf{b}_0^l$  和  $\mathbf{b}_0^r$ 、 $\mathbf{b}_1^l$  和  $\mathbf{b}_1^r$ 、 $\mathbf{b}_2^l$  和  $\mathbf{b}_2^r$ , 解算其在世界坐标系下的三维点  $\mathbf{B}_0^{(t)}$ 、 $\mathbf{B}_1^{(t)}$  和  $\mathbf{B}_2^{(t)}$ , 此时定义目标坐标系的原点为  $\mathbf{B}_0^{(t)}$ ,  $z$  轴为规则标志点平面的法向量, 并指向世界坐标系,  $\mathbf{B}_0^{(t)}$  指向  $\mathbf{B}_1^{(t)}$  的向量为  $x$  轴,  $z$  轴和  $x$  轴叉乘为  $y$  轴, 则目标坐标系的单位方向轴  $\mathbf{n}_x$ 、 $\mathbf{n}_y$  和  $\mathbf{n}_z$  为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_x = (\mathbf{B}_1^{(t)} - \mathbf{B}_0^{(t)}) / \|\mathbf{B}_1^{(t)} - \mathbf{B}_0^{(t)}\|_2 \\ \mathbf{n}_y = \mathbf{n}_z \times \mathbf{n}_x \\ \mathbf{n}_z = \mathbf{n}_x \times [(\mathbf{B}_2^{(t)} - \mathbf{B}_0^{(t)}) / \|\mathbf{B}_2^{(t)} - \mathbf{B}_0^{(t)}\|_2] \end{cases}. \quad (13)$$

根据(9)式和(10)式即可解算出非合作目标的位姿信息。

## 2.5 双目视觉测量平台

本研究选取 DSP STM320C6678 作为双目视觉测量算法处理的主要芯片, 其含有 8 个 CorePac 核, 主频较高, 可以达到 1 GHz, 内部集成了丰富的外设接口和专用的浮点运算指令集, 是较为常用的信息处理平台<sup>[21]</sup>。双目视觉位姿测量算法编写完成后, 需要根据 DSP 的编译环境进行移植, 摆脱了对计算机视觉库(如 OpenCV)的依赖, 并针对 DSP 结构进行优化, 动态分配内存资源, 提高了算法的运行效率。

本文的双目视觉测量平台由头部和信息处理器组成, 如图 8 所示。头部由两台  $60^\circ$  视场的可见光相机组成, 每台可见光相机主要包括光学系统、机械结构、探测器及其驱动组件和遮光罩组件。信息处理器由机械结构和信息处理电路组成, 其中信息处理电路包括电源模块、图像处理模块、图像存储传输模块、外部通信模块和遥测遥控模块等。信息处理电路用于获取和处理图像信息, 负责与导航计算机通信, 传递指令和数据, 输出可见光图像和非合作目标位姿信息。最终优化后的算法可以在测量平台上实现对空间非合作目标的实时位姿测量。

## 3 分析与讨论

为了验证空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法的有效性, 设置了 3 组不同工况下的小卫星模型实验。实验一: 实验室灯光环境下, 在距双目相机约 3.45 m 处绕目标坐标系  $z$  轴匀速旋转, 共得 111 frame 图像; 实验二: 暗室环境下, 用室内灯光照明, 目标在距双目相机约 7.5 m 处静止, 共得 102 frame 图像; 实验三: 暗室环境下, 用卤素灯倾斜照射目标, 目标从 5.2 m 处匀速移动到 10 m 处, 并

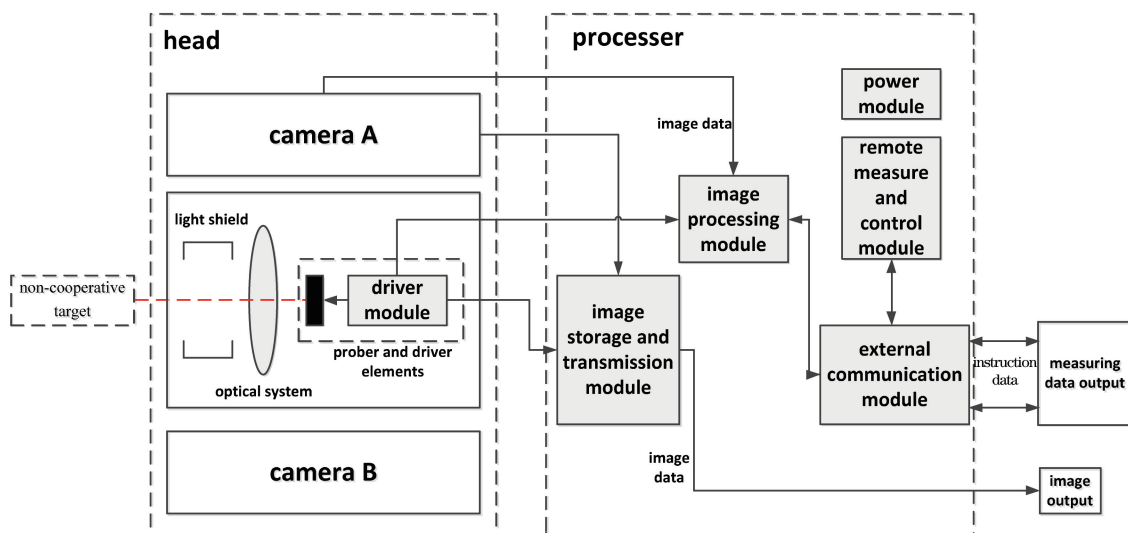


图 8 双目视觉测量平台示意图

Fig. 8 Binocular visual measurement platform diagram

伴随章动,共得 186 frame 图像。本文通过前后帧的相对运动姿态进行精度评价。所有的工况实验中,两台双目视觉相机同时采集图像,图像深度为

8 bit,所有的双目视觉算法均在 DSP6678 信息处理平台上完成。3 组实验中非合作目标的位姿变化如图 9~11 所示。

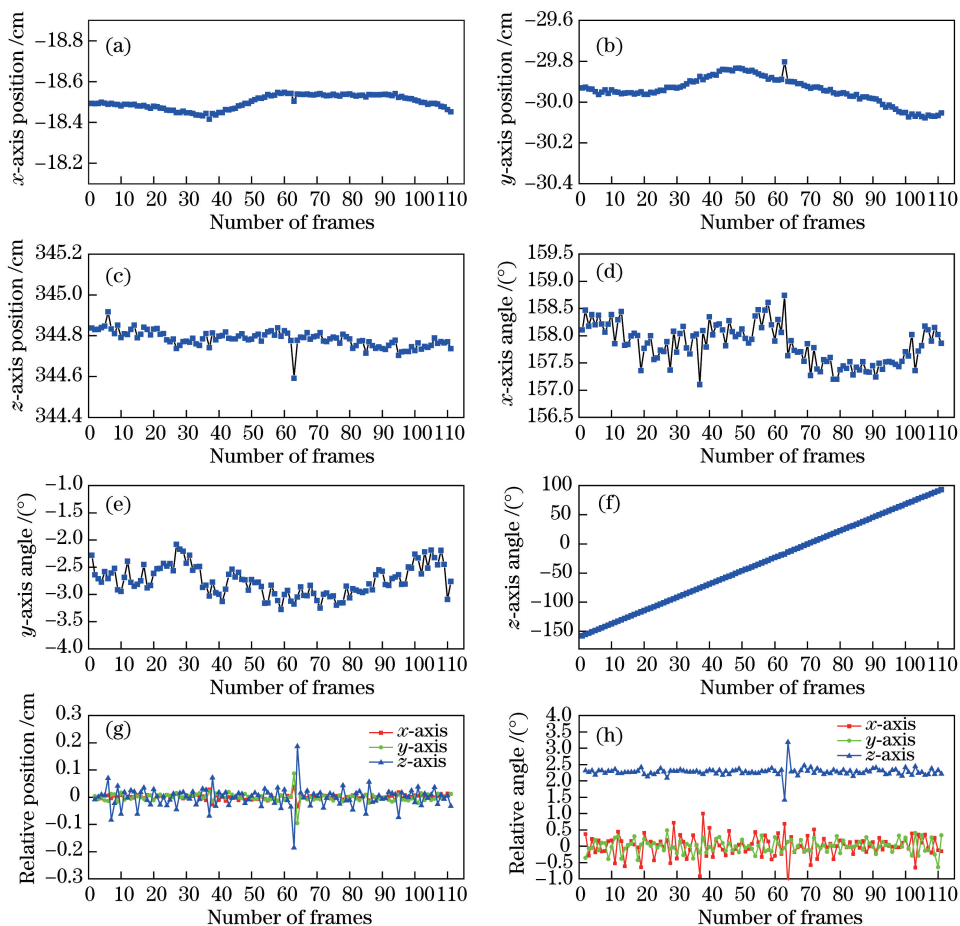


图 9 实验一的卫星模型位置姿态。(a)(b)(c) $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴绝对位置;(d)(e)(f) $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴绝对角度;(g)(h)三轴相对位置和相对角度

Fig. 9 Position and attitude in experiment 1. (a)(b)(c) Absolute positions of  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes; (d)(e)(f) absolute angles of  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes; (g)(h) relative positions and angles of three axes



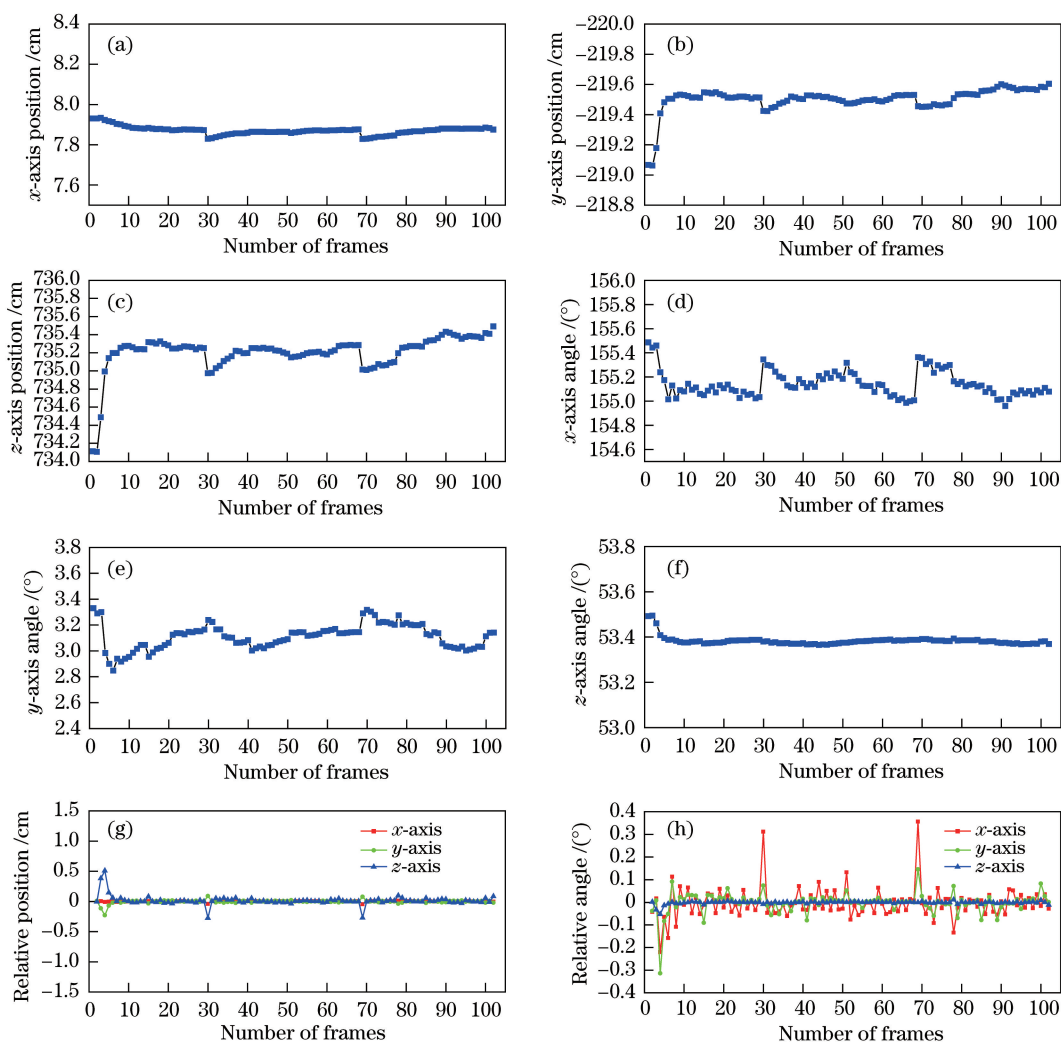


图 10 实验二的卫星模型位置姿态。(a)(b)(c) $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴绝对位置;(d)(e)(f) $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴绝对角度;(g)(h)三轴相对位置和相对角度

Fig. 10 Position and attitude in experiment 2. (a)(b)(c) Absolute positions of  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes; (d)(e)(f) absolute angles of  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes; (g)(h) relative positions and angles of three axes

如图 9~11 所示:实验一中,  $x$  轴绝对位置在  $-18.6\text{ cm}$  到  $-18.4\text{ cm}$  之间,前后帧相对位置标准差为  $0.009\text{ cm}$ ;  $y$  轴绝对位置在  $-29.8\text{ cm}$  到  $-30.1\text{ cm}$  之间,前后帧相对位置标准差为  $0.015\text{ cm}$ ;  $z$  轴绝对位置在  $344.6\text{ cm}$  到  $345.0\text{ cm}$  之间,前后帧相对位置标准差为  $0.038\text{ cm}$ ,由于  $x$  轴和  $y$  轴未进行旋转,所以三轴的相对角度变化主要体现在对接环平面的法向量上,即  $z$  轴,三轴的相对角度变化基本稳定在  $(-0.002^\circ, 0.004^\circ, 2.28^\circ)$ ,与实际运动速度一致,计算出的标准差为  $\sigma=(0.324^\circ, 0.200^\circ, 0.137^\circ)$ ;实验二中,由于目标处于静止状态,且暗室光照稳定,双目测量算法可以准确检测出对接环和规则标志点,解算出的目标相对位姿精度较高,三轴的相对位置标准差为

$\sigma=(0.007, 0.031, 0.079)\text{ cm}$ ,相对角度标准差为  $\sigma=(0.071^\circ, 0.047^\circ, 0.007^\circ)$ 。上述两种工况由于光照稳定,前后帧图像的亮度变化不大,且对接环和规则标志点可以清晰成像,双目位姿测量算法的相对位置精度优于  $0.08\text{ cm}$ ,相对姿态精度优于  $0.4^\circ$ 。

实验三中,由于卤素灯存在频闪,且斜照目标导致双目相机的成像质量较差,含有部分高亮和阴影边缘,椭圆检测算法不能稳定跟踪图像上的对接环,通过极线约束和光流法辅助跟踪的方法优化后可以得到较好的结果,三轴的相对位置标准差为  $\sigma=(0.006, 0.040, 0.174)\text{ cm}$ ,相对角度标准差为  $\sigma=(0.408^\circ, 0.422^\circ, 0.187^\circ)$ ,所以相对位置精度优于  $0.18\text{ cm}$ ,相对姿态精度优于  $0.5^\circ$ ,但

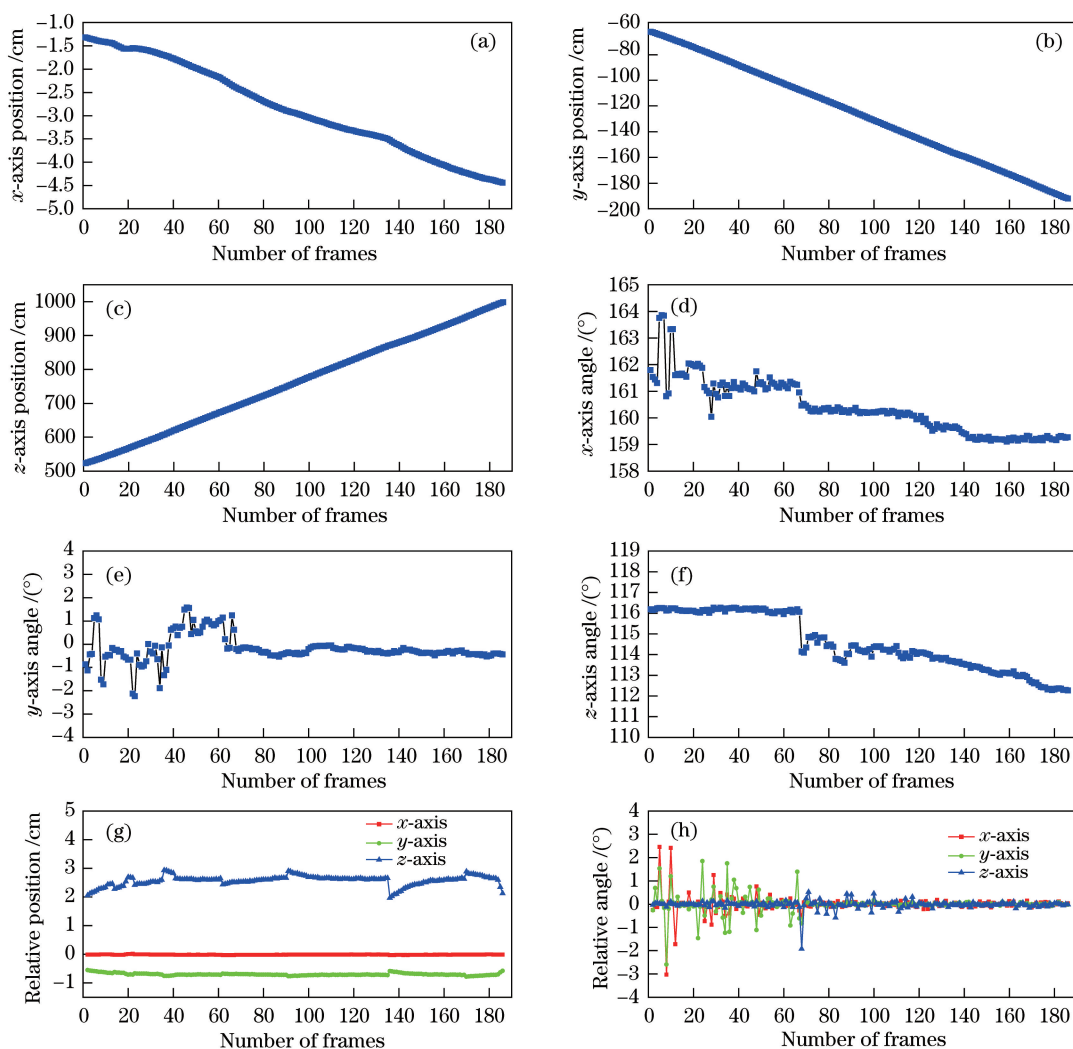


图 11 实验三 的卫星模型位置姿态。(a)(b)(c)  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴绝对位置;(d)(e)(f)  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴绝对角度;  
(g)(h)三轴相对位置和相对角度

Fig. 11 Position and attitude in experiment 3. (a)(b)(c) Absolute positions of  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes;  
(d)(e)(f) absolute angles of  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes; (g)(h) relative positions and angles of three axes

绝对角度存在累积误差。实验中 DSP6678 主控板每帧的处理时间在 1.5 s 以内,上述结果验证了空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法的有效性。

## 4 结 论

针对清理空间非合作目标任务中,如何获取空间非合作目标的相对位置和姿态的难题,提出一种双目视觉位姿测量方法,该方法可以在复杂环境下,实时识别非合作目标的对接环和规则标志,并通过极线约束准则和光流法辅助跟踪椭圆上的点,提高算法的位姿测量精度。利用三维重建出的对接环平面和标志点,建立非合作目标坐标系,解算与世界坐标系的相对位姿信息。最终将所有算法移植到实验

室设计的 DSP C6678 嵌入式信息处理平台,完成了对双目视觉位姿测量算法的验证。验证的结果表明,在实验光照稳定的场景下,对接环和规则标志可以清晰成像,双目位姿测量算法的相对位置精度优于 0.08 cm,相对姿态精度优于 0.4°;当非合作目标由于强光照射,对接环边缘部分高亮,且含有阴影时,算法的相对位置测量精度优于 0.18 cm,相对姿态精度优于 0.5°,光流法对前后帧的灰度依赖性较大,绝对角度存在累积误差。算法的测量数据更新时间在 1.5 s 以内,验证了该方法的有效性。但是面对更为复杂的场景,对接环的检测精度较差。为了提升双目视觉测量算法的稳定性和适应性,对复杂场景下椭圆的检测和利用多个目标表面的标志点解算位姿,将成为今后的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] Bill Chappell. NASA: debris from India's anti-satellite test raised threat to space station [EB/OL]. (2019-04-02) [2020-03-18]. <https://www.npr.org/2019/04/02/709032198/nasa-debris-from-indias-anti-satellite-test-raised-threat-to-space-station.html>.
- [2] Yi Y C. Studies on the movement state estimation and the capture path planning of the spatial non-cooperative targets [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.  
易钰驰. 空间非合作目标的运动状态估计与捕获路径规划研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [3] Wang X H. Development and trend of space on-orbit servicing technology [J]. *Satellite & Network*, 2016 (3): 70-76.  
王晓海. 空间在轨服务技术及发展现状与趋势 [J]. *卫星与网络*, 2016(3): 70-76.
- [4] Liu X. Non-cooperative target pose estimation based on stereo vision [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.  
刘祥. 基于双目视觉的空间非合作目标位姿测量方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [5] Nathan S. Space: DARPA wants a robotic satellite mechanic launched by 2022 [EB/OL]. (2019-10-03) [2020-03-18]. <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2019/10/03/darpa-wants-a-robotic-satellite-mechanic-launched-by-2022/>.html.
- [6] Sandra E. DARPA's satellite-servicing robot to get another shot [EB/OL]. (2019-07-31) [2020-03-18]. <https://www.space.com/darpa-satellite-servicing-robot-another-shot.html>.
- [7] Reintsema D, Thaeter J, Rathke A, et al. Deos-the German robotics approach to secure and de-orbit malfunctioned satellites from low earth orbits [C] // Proceeding of the i-SAIRAS. Sapporo: JAXA, 2010: 244-251.
- [8] Jia P, Liu H Y, Li H. Development of Deutsche orbitale service mission [J]. *Aerospace China*, 2016 (6): 24-29.  
贾平, 刘海印, 李辉. 德国轨道任务服务系统发展分析 [J]. *中国航天*, 2016(6): 24-29.
- [9] Kimura S, Nagai Y, Yamamoto H, et al. Approach for on-orbit maintenance and experiment plan using 150 kg-class satellites [C] // 2005 IEEE Aerospace Conference, March 5-12, 2005, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2005: 837-845.
- [10] Xu W F, Liang B, Li C, et al. The approach and simulation study of the relative pose measurement between space-crafts based on stereo vision [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(4): 1421-1428.  
徐文福, 梁斌, 李成, 等. 基于立体视觉的航天器相对位姿测量方法与仿真研究 [J]. *宇航学报*, 2009, 30(4): 1421-1428.
- [11] Cai H. Experiment research of non-cooperative space target relative measurement based on binocular vision [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.  
蔡哈. 基于双目视觉的非合作目标相对测量实验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [12] Yan K. Research on pose measurement of space non cooperative target based on binocular vision [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.  
颜坤. 基于双目视觉的空间非合作目标姿态测量技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [13] Wang C S. Research on binocular vision measurement based on ORB algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.  
王昌盛. 基于 ORB 算法的双目视觉测量研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [14] Da J, Qu H M, Tao T Y, et al. Real-time three-dimensional measurement composite of epipolar constraint and speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1012003.  
笄健, 屈惠明, 陶天阳, 等. 结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1012003.
- [15] Zhang Q, Dong Y, Li H B, et al. Underwater curve constraint model based on non-parallel binocular vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (3): 0315001.  
张强, 董玉, 李海滨, 等. 非平行双目视觉系统水下成像的极线约束模型 [J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0315001.
- [16] Hough V, Paul C. Method and means for recognizing complex patterns: US069654 [P]. 1962-12-18.
- [17] Lu C S, Xia S Y, Shao M, et al. Arc-support line segments revisited: an efficient high-quality ellipse detection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 4352(29): 768-781.
- [18] von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J M, et al. LSD: a line segment detector [J/OL]. *Image Processing on Line*, 2012: 35-55 [2020-03-18]. <http://dx.doi.org/10.5201/ipol.2012.gjmr-lsd>.
- [19] Luo H, Wang F, Chen Z Q, et al. Infrared target detecting based on symmetrical displaced frame difference and optical flow estimation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1715-1720.  
罗寰, 王芳, 陈中起, 等. 基于对称差分法和光流估计的红外弱小目标检测 [J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1715-1720.
- [20] Li X Z, Yin X L, Jia S M, et al. Improved TV-L1 algorithm for smooth optical flow [J]. *Acta Optica*



- Sinica, 2013, 33(10): 1015002.  
李秀智, 尹晓琳, 贾松敏, 等. 改进的 TV-L1 平滑光流估计[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1015002.
- [21] Dong Y W, Zhang Y J, Gao X L, et al. Distributed communication system based on multicore DSP TMS320C6678[J]. Microcomputer & Its Applications, 2014, 33(13): 74-76.  
董渊文, 张永军, 高晓亮, 等. 基于 TMS320C6678 多核 DSP 的分布式通信系统[J]. 微型机与应用, 2014, 33(13): 74-76.