

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1579.2020.06.007

一种基于双目视觉的卫星相对位姿测量方法*

邓爽^{1,2}, 王波^{1,2}, 董秋雷^{1,2,3*}

摘要: 卫星位姿测量技术是与航天飞行器相关的空间操控活动中一项核心的支撑技术. 考虑到太空环境中光源单一, 且卫星表面一般为反光材质, 提出了一种基于双目视觉的卫星相对位姿测量方法. 在卫星面板标志点可见时, 本文方法利用卫星对接环外环和卫星面板标志点测量卫星相对位姿. 在卫星距离对接目标较近, 无法观测到卫星面板标志点时, 本文方法利用 ORB 特征点匹配测量位姿. 为了增强鲁棒性, 本方法还利用光流追踪法和卡尔曼滤波器优化位姿测量的结果. 仿真实验结果表明, 本方法能够在光源单一背景下对任意种类的卫星在对接过程中进行准确的位姿测量.

关键词: 卫星; 对接; 双目视觉; 位姿测量

中图分类号: V448.22 + 1

文献标志码: A

文章编号: 1674-1579(2020)06-0050-06

A Binocular Method for Measuring Relative Poses of Satellites

DENG Shuang^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, DONG Qiulei^{1,2,3*}

Abstract: Estimating the relative poses of satellites to spacecrafts is a supporting technology in many space manipulation activities. Addressing the single light source in the space and the light-reflecting surfaces of the satellites, a novel binocular method is proposed for satellite pose estimation in this paper. When the panel landmarks of the satellites can be observed, the proposed method uses the outer docking rings and the panel landmarks for pose estimation, and otherwise, the ORB features are used to measure the satellite poses. In addition, the optical-flow tracker and the Kalman filter are used to optimize the estimation results for improving the robustness of the proposed method. Simulation results demonstrate that this method can calculate the relative poses of the satellites accurately in the single-light-source space.

Keywords: satellites; docking; binocular vision; pose measurement

0 引言

在进行卫星的对接任务时, 对卫星的位姿测量是其中非常重要的一环. 在对卫星进行位姿测量后, 对接目标可以依据卫星位姿调整自己的姿态进

行精准对接. 针对合作型卫星, 可以在卫星上加装定位跟踪装置, 让对接目标能自动追踪卫星的位姿. 非合作型卫星不一定存在定位追踪装置, 所以只能通过对接目标的摄像头拍摄到的图片对卫星进行定位. 由于卫星表面一般覆盖着聚酰亚胺的高性能聚合物材料与金属材料复合而成的薄膜, 这种薄膜是反光材质, 在太空背景中对接目标打出的单一光源下会出现复杂的光照纹理, 并且在不同角度观测下纹理会不同. 传统视觉定位方法依赖 SIFT 特征点^[1]的提取与匹配, 然而在这种背景下会产生大量错误匹配点. 卫星作为一种特殊的设备, 一般在正表面都会存在对接环和安装部件, 目前关于卫星位姿测量的研究主要针对卫星上的特殊装置.

近年来, 研究者开展了大量有关视觉位姿测量的研究工作^[2-5]. 文献[3]利用双目相机拍摄到的卫星图像提取卫星对接环和十字力架, 并直接由对接

收稿日期: 2020-10-19; 录用日期: 2020-11-22.

Manuscript received Oct. 19, 2020; accepted Nov. 22, 2020.

国家自然科学基金资助项目(U1805264, 61991423).

National Nature Science Foundation of China(U1805264, 61991423).

1. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049; 3. 中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心, 北京 100190.

1. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China.

3. Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China.

* 通讯作者. E-mail: qldong@nlpr.ia.ac.cn.

环和十字力架的交点进行双目重建计算卫星位姿. 文献[4]利用单目摄像头拍摄到的对接环进行重建,并依据已知的卫星轮廓边长筛选得到三维对接环模型,并依此得到卫星姿态. 文献[5]同样利用单目摄像头拍摄到的卫星对接环进行重建,并利用已知的对接环半径筛选得到对接环三维信息. 文献[3-5]都利用了卫星不普遍存在的特征,比如十字力架,已知的轮廓边长和对接环半径. 对于非合作型卫星,这些已知信息是无法得到的. 除此之外,这些方法都利用简单的 Canny 边缘检测方法^[6]提取对接环椭圆特征. 由于卫星表面是反光材质,在单一光源下会产生复杂的纹理,这种复杂纹理会影响 Canny 边缘检测算子,从而无法得到精确的对接环椭圆. 文献[4]利用了卫星的轮廓信息,然而在卫星距离目标较近时,卫星的轮廓会无法观测.

基于上述问题,本方法在双目相机拍摄的图像中利用卫星普遍存在的特征(对接环外环,卫星面板标志点)进行位姿测量. 本方法为解决卫星表面复杂的光照纹理影响对接环识别的问题,利用了一种先进的椭圆识别方案. 由于卫星距离对接目标距离较近时,卫星面板标志点已无法检测,而这时卫星表面的复杂纹理影响较小,所以利用快速的特征检测算子 ORB 特征^[7]进行图像的特征点检测和匹配,以计算卫星的位姿. 除此之外,此方法还利用光流追踪法^[8]和卡尔曼滤波器^[9]优化姿态结果,进一步提升姿态估计的精确度,让卫星和对接目标实现更精确的对接.

1 问题描述与定义

已知双目相机系统中左、右相机的内参数矩阵分别为 K_l 和 K_r , 双目摄像头的畸变参数矩阵 D_l 和

D_r , 以及双目相机之间的旋转矩阵 R 和平移向量 t , 则双目相机的摄像机矩阵 P_l 和 P_r 为:

$$\begin{cases} P_l = K_l [I | \mathbf{0}] \\ P_r = K_r [R | t] \end{cases} \quad (1)$$

双目相机基础矩阵 F 为:

$$F = (K_r^T)^{-1} [t]_{\times} R K_l^{-1} \quad (2)$$

双目相机会在卫星靠近过程中每隔固定时间采样一帧图像对,记图像对中的两幅图像分别为左相机图像和右相机图像,当前帧数为 $k(k \in 1, 2, \dots, N)$,其中 N 为总帧数. 对于每一帧图像对,会依据畸变参数矩阵 D_l 和 D_r 将双目相机拍摄到的图像进行畸变校正. 本方法最终目的是求解卫星坐标系关于左相机坐标系的旋转矩阵 $R_w^k = [n_x^k \ n_y^k \ n_z^k]$ 和平移向量 t_w^k .

2 整体流程

本基于双目视觉的卫星相对位姿测量方法的整体流程如图 1. 首先本方法会判断当前帧是否为初始帧($k = 0$), 如果为初始帧,说明此时卫星距离对接目标较远,则直接检测对接环外环椭圆和面板标志点,并利用双目重建计算卫星位姿,初始化卡尔曼滤波器. 如果不是初始帧($k > 0$), 利用上一帧计算的 t_w^{k-1} 判断是否小于阈值 s^1 , 若不小于阈值 s^1 , 说明此时卫星距离对接目标不是太近,面板标志点完全可以被检测到,则利用光流追踪法辅助检测对接环外环椭圆和面板标志点,并计算卫星位姿. 若 t_w^{k-1} 小于阈值 s^1 , 说明此时面板标志点可能无法检测到,则先利用光流追踪法辅助检测对接环外环椭圆,并判断当前帧是否能看见面板标志点,若能看见,则和之前一样检测面板标志点并计算卫星位姿,但由于下一帧可能出现无法检测到面板标志点

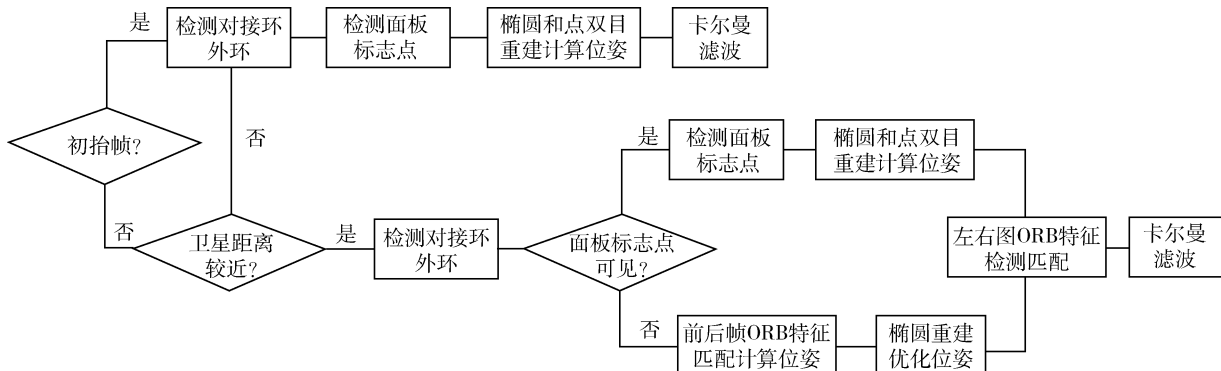


图 1 本文方法流程图

Fig. 1 The flowchart of the proposed method

的情况,则当前帧会检测和匹配 ORB 特征点以备用.若当前帧不能看见面板标志点,则依据左相机当前帧图像检测到的 ORB 特征点和左相机上一帧图像 ORB 特征点的匹配来进行位姿测量,并且会利用检测到的对接环外环椭圆优化位姿结果.对于非初始帧都会在计算完卫星位姿后利用卡尔曼滤波器优化位姿结果.

3 卫星特征检测

3.1 对接环外环检测

图 2 为卫星面板示意图.由于卫星面板为反光材质,对接环外环边缘会被高光覆盖,所以需要从高光区域中正确检测出椭圆.本方法采用文献[10]提出的高稳定性椭圆检测方法.此方法首先对图像计算每个像素的梯度垂直方向,作为像素的边缘方向,并将边缘方向能形成弧线的区域记为弧线像素区域,拟合出弧线像素区域的局部直线线段,记为弧支撑线段.然后连接潜在地属于同一椭圆的弧支撑线段并分组,得到弧支撑线段组.之后采用两种方法拟合初始椭圆:选择具有显著椭圆形状特征的弧支撑线段组拟合初始椭圆和全局搜索能匹配的多个弧支撑线段组拟合初始椭圆,通过初始椭圆在参数空间的聚类将初始椭圆合并得到椭圆候选集.最后在椭圆候选集中剔除质量不高的椭圆并对剩下椭圆的参数进行优化.

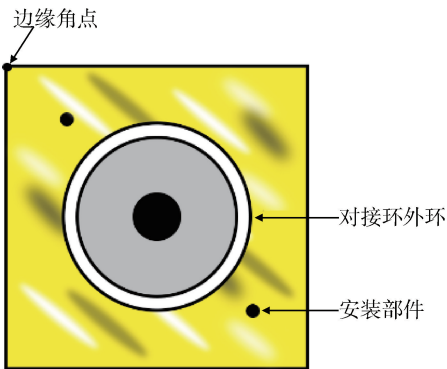


图 2 卫星面板示意图

Fig. 2 The diagram of the satellite panel

在初始帧($k=0$)直接对双目相机拍摄到的图像进行上述的椭圆检测,得到所有候选椭圆.然后选取椭圆长短轴之和最大的椭圆作为左相机图像和右相机图像对接环外环椭圆 E_l^0 和 E_r^0 .最后在椭圆上等距选取 16 个点作为追踪前点.在第 k 帧($k>0$),首先利用光流追踪法追踪 $k-1$ 帧追踪前点在第 k

帧的追踪点位置.然后对第 k 帧进行椭圆检测.由于卫星一般是缓慢接近摄像头,在所有检测到的候选椭圆中选择和追踪点的距离平均值最小的椭圆作为对接环外环椭圆 E_l^k 和 E_r^k .若在第 k 帧椭圆检测失败或者和追踪点的最小距离平均值超过阈值 s^2 ,则直接通过光流追踪点拟合椭圆得到 E_l^k 和 E_r^k .

3.2 面板标志点检测

如图 2 所示,卫星面板普遍存在的标志点主要为边缘角点和安装部件中心点.

1) 边缘角点提取:首先利用霍夫直线法^[11]检测两幅图中直线参数累加器值最大的各 4 条直线,作为卫星面板轮廓的 4 条边.然后计算 4 条边相交的 4 个交点.在左相机图像中选定 4 个交点的其中一个点作为面板标志点 p_l ,并利用基础矩阵计算此点在右相机图像中对应的对极线 l_r :

$$l_r = Fp_l \quad (3)$$

并在右相机图像 4 个交点中选取离 l_r 最近的点作为面板标志点 p_r .

2) 安装部件中心点提取:由于安装部件一般是比较小的黑色斑点,所以利用加入颜色筛选,面积筛选和曲率筛选的斑点检测法[12]检测两幅图中的候选斑点.在左相机图像的候选斑点中选取一个作为面板标志点 p_l ,与上述一样计算此点在右相机图像中对应的对极线 l_r ,选取右相机图像中距离 l_r 最近的候选斑点,作为右相机图像面板标志点 p_r .

在初始帧($k=0$),当边缘角点可见时提取边缘角点作为面板标志点 p_l^0 和 p_r^0 ,否则提取安装部件中心点作为面板标志点 p_l^0 和 p_r^0 .在第 k 帧($k>0$),首先利用光流追踪法得到 $k-1$ 帧面板标志点 p_l^{k-1} 和 p_r^{k-1} 在第 k 帧的追踪点 p'_l 和 p'_r .若在第 k 帧检测到多个候选点,则选取离 p'_l 和 p'_r 最近的候选点作为第 k 帧的面板标志点 p_l^k 和 p_r^k .若 p_l^k 和 p_r^k 离 p'_l 和 p'_r 的距离超过阈值 s^3 ,则取 p'_l 和 p'_r 作为第 k 帧的面板标志点 p_l^k 和 p_r^k .

4 卫星位姿测量

4.1 椭圆和点匹配重建

当检测到左相机图像和右相机图像的对接环外环椭圆 E_l^k 和 E_r^k 和面板标志点 p_l^k 和 p_r^k 后,利用双目重建方法重建三维圆和三维点并计算 R_w^k 和 t_w^k .

利用 p_l^k 和 p_r^k 重建三维点 X_p^k 首先计算矩阵 A :

$$\mathbf{A}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_l^k \cdot \mathbf{x} \times \mathbf{P}_l^3 - \mathbf{P}_l^1 \\ \mathbf{p}_l^k \cdot \mathbf{y} \times \mathbf{P}_l^3 - \mathbf{P}_l^2 \\ \mathbf{p}_r^k \cdot \mathbf{x} \times \mathbf{P}_r^3 - \mathbf{P}_r^1 \\ \mathbf{p}_r^k \cdot \mathbf{y} \times \mathbf{P}_r^3 - \mathbf{P}_r^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

然后将 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 进行特征分解得到特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 和对应的特征向量 $\xi_i (i = 1, 2, 3, 4)$. 从 λ_i 中选取最小值 $\lambda_{\min} = \min(\lambda_i)$, 并得到 λ_{\min} 对应的特征向量 ξ_{\min} , 则:

$$\mathbf{X}_p^k = \begin{bmatrix} \xi_{\min}^1 / \xi_{\min}^4 \\ \xi_{\min}^2 / \xi_{\min}^4 \\ \xi_{\min}^3 / \xi_{\min}^4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用 \mathbf{E}_l^k 和 \mathbf{E}_r^k 重建三维圆法向量 \mathbf{n}_c^k 和圆心 \mathbf{X}_c^k . 先将 \mathbf{E}_l^k 和 \mathbf{E}_r^k 投影得到两个在各相机坐标系下的椭圆锥面 $\mathbf{S}_l^k = \mathbf{K}_l^T \mathbf{E}_l^k \mathbf{K}_l$ 和 $\mathbf{S}_r^k = \mathbf{K}_r^T \mathbf{E}_r^k \mathbf{K}_r$. 然后对 $\mathbf{S}_q^k (q = l, r)$ 进行特征分解得到特征值 $\lambda_q^1, \lambda_q^2, \lambda_q^3 (\lambda_q^1 \geq \lambda_q^2 > 0 > \lambda_q^3)$ 和对应的特征向量 $\xi_q^1, \xi_q^2, \xi_q^3$. 单个圆锥有两种不平行圆截面, 圆截面的单位法向量 $\xi_q^i (i = 1, 2)$.

为:

$$\xi_q^i = \sqrt{\frac{\lambda_q^1 - \lambda_q^2}{\lambda_q^1 - \lambda_q^3}} \xi_q^1 + (-1)^{i-1} \sqrt{\frac{\lambda_q^2 - \lambda_q^3}{\lambda_q^1 - \lambda_q^3}} \xi_q^3 \quad (6)$$

在左相机坐标系下, 两个椭圆锥面的圆截面单位法向量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_l^i = \xi_l^i \\ \mathbf{n}_r^j = \mathbf{R}_q^j \xi_r^j \end{cases} \quad (7)$$

其中 $j = 1, 2$. 由于两个平面椭圆投影得到的圆截面需要一致, 则从 $\|\mathbf{n}_l^i - \mathbf{n}_r^j\|_2$ 中找到最小的一对 i 和 j , 记为 i_m 和 j_m , 则 $\mathbf{n}_l^{i_m}$ 和 $\mathbf{n}_r^{j_m}$ 取均值为三维圆法向量 \mathbf{n}_c^k . 之后计算 ξ_q^i 到单位 Z 向量的旋转矩阵 \mathbf{R}_q^i , 得到椭圆矩阵 $\mathbf{C}_q^i = \mathbf{R}_q^i \mathbf{S}_q^i \mathbf{R}_q^{iT}$ 及其圆心 \mathbf{c}_q^i , 则 \mathbf{c}_q^i 的齐次坐标 $\hat{\mathbf{c}}_q^i$ 经过旋转 \mathbf{R}_q^{iT} 和反投影后的图像坐标 $\hat{\mathbf{x}}_q^i$ 为:

$$\hat{\mathbf{x}}_q^i = \mathbf{K}_q \mathbf{R}_q^{iT} \hat{\mathbf{c}}_q^i \quad (8)$$

$\hat{\mathbf{x}}_l^{i_m}$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_r^{j_m}$ 进行点的双目重建得到空间平面圆的圆心 \mathbf{X}_c^k .

最后得到卫星位姿为:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_x = (\mathbf{X}_p^k - \mathbf{X}_c^k) / \|\mathbf{X}_p^k - \mathbf{X}_c^k\|_2 \\ \mathbf{n}_y = \mathbf{n}_z \times \mathbf{n}_x \\ \mathbf{n}_z = \mathbf{n}_c^k \\ \mathbf{t}'_w = \mathbf{X}_c^k \end{cases} \quad (9)$$

4.2 ORB 特征点匹配重建

当第 k 帧得到的 t_w^{k-1} 小于阈值 s^1 时, 存在卫星的面板标志点无法被观测到的情况. 则此时对左相

机图像提取 ORB 特征点, 与左相机上一帧图像已知三维坐标的 ORB 特征点进行暴力匹配和单应匹配. 然后利用 EPNP 方法^[13] 从左相机图像特征点和对应的三维坐标中计算卫星坐标系相对于左相机坐标系的初始位姿 $\mathbf{R}'_w = [\mathbf{n}'_x \ \mathbf{n}'_y \ \mathbf{n}'_z]$ 和 \mathbf{t}'_w . 为了得到更精确的位姿结果, 利用由左右相机当前帧图像的对接环椭圆三维重建得到的三维圆法向量 \mathbf{n}_c^k 和圆心 \mathbf{X}_c^k 来计算最终的位姿:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_x = \mathbf{n}'_x \\ \mathbf{n}_y = \mathbf{n}_z \times \mathbf{n}_x \\ \mathbf{n}_z = (\mathbf{n}_c^k + \mathbf{n}'_z) / \|\mathbf{n}_c^k + \mathbf{n}'_z\|_2 \\ \mathbf{t}'_w = (\mathbf{X}_c^k + \mathbf{t}'_w) / 2 \end{cases} \quad (10)$$

为了得到此帧 ORB 特征点的三维坐标, 首先对左相机图像和右相机图像分别进行 ORB 特征点检测, 将两幅图像的 ORB 特征点通过暴力匹配得到初始匹配特征点. 然后对所有初始匹配特征点进行双目重建得到初始匹配点三维坐标. 由于 ORB 特征点在卫星面板上, 依此条件筛选三维点, 并将三维点和与之对应的图像 ORB 匹配点一并保存用于下一帧的处理.

4.3 卡尔曼滤波模型

由于太空环境中卫星一般为匀速运动, 所以在每一帧计算完卫星位姿后利用匀速卡尔曼滤波模型优化 \mathbf{R}_w^k 和 \mathbf{t}_w^k .

5 仿真分析

5.1 实验条件

为模拟卫星在太空中对接场景, 本实验在一个密闭黑暗空间中进行. 卫星为模拟人造卫星, 并被固定在机械滑轨装置的滑块上. 双目相机被固定在滑轨一端, 正向面对卫星面板. 双目相机中间有单一光源打向卫星面板. 在实验过程中, 卫星将从距离双目相机中心 7 m 处匀速运动到距离双目相机中心 3 m 处, 且卫星在移动过程中做绕卫星中心轴匀角速度自旋转运动. 这样能检验定位方法在卫星位移和旋转上的估计精度. 双目相机会在每隔 5 s 采样一帧图像对, 每两帧之间卫星移动大约 5 cm, 旋转 10°. 双目相机会将采样的图像对输入个人电脑以供计算位姿.

本实验采用的个人电脑型号为 MECHREVO NX6, 处理器为 Intel i7-8700, 内存为 16 GB, 操作系统为 Windows10 64 位. 本方法采用 c 语言编写, 并

用 Visual Studio 2017 执行。

5.2 定位精度分析

表 1 显示了卫星从距离双目相机中心 7 m 处匀速运动到距离双目相机中心 3 m 处所有帧位姿(距离和旋转角)平均误差,以及前后帧间相对位姿的平均误差.由于当卫星在距离双目相机较远时比距离双目相机较近时特征纹理更为模糊,所以卫星位姿测量精度在卫星距离双目相机较远时会更差.所以在实验中,本方法不仅测量所有帧位姿的平均误差之外,还会测量在卫星距离双目相机不同距离阈值内的位姿平均误差.图 3 和图 4 分别展示了卫星在 7~5 m 间和在 5~3 m 间真实距离和计算距离的逐帧对比折线图.图 5 和图 6 分别展示了卫星在 7~5 m 间和在 5~3 m 间真实旋转角和计算旋转角的逐帧对比折线图.表 2 展示了卫星在 7 米到 5 米间和在 5 米到 3 米间位姿平均误差和前后帧间相对位姿的平均误差.从表 1 中可以看出本方法在估计卫星对接过程中的位姿中能够保证较高的精度,并且前后帧的相对位姿估计准确且稳定.图 3~图 6 和表 2 说明了卫星距离双目相机越近,位姿测量会越准确.在卫星距离对接目标较远时对接目标只需要了解卫星的大致方位,所以此时对卫星位姿的精度要求不高.

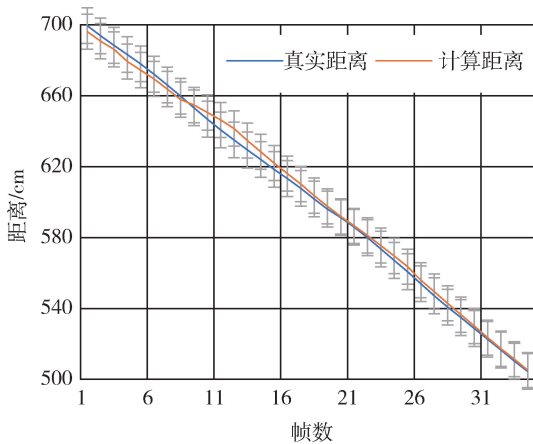


图 3 7~5 m 阈值内的真实距离和计算距离

Fig. 3 The real distance and the calculated distance in 7~5 m

表 1 卫星位姿测量的平均误差

Tab. 1 The average errors of satellite pose measurement

		平均误差		
7~3m	距离/cm	旋转角/(°)	帧间距离/cm	帧间旋转角/(°)
	1.74	0.94	0.41	0.20

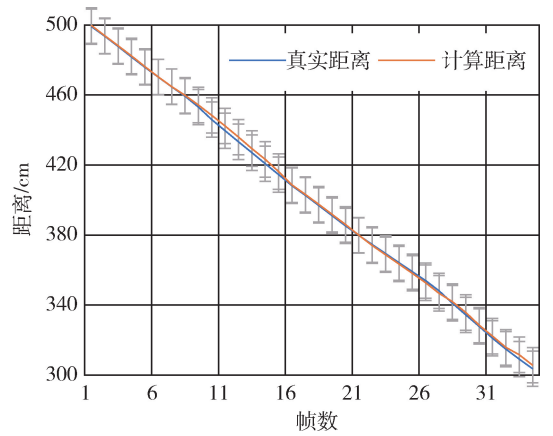


图 4 5~3 m 阈值内的真实距离和计算距离

Fig. 4 The real distance and the calculated distance in 5~3 m

5.3 运行时间分析

表 3 显示了卫星从距离双目相机中心 7 m 处匀速运动到距离双目相机中心 3 m 处所有帧位姿测量的平均运行时间.由于当卫星在距离双目相机较远时在图像中显示区域较小,所以位姿测量运行时间在卫星距离双目相机较远时会更短.所以在实验中,本方法不仅测量所有帧卫星位姿测量的平均运行时间之外,还会测量在卫星距离双目相机不同距离阈值内位姿测量的平均运行时间.表 4 展示了卫星在 7~5 m 间和在 5~3 m 间位姿测量的平均运行时间.表 3 说明了本方法运行较为高效.在每一帧位姿测量的过程中,主要花费时间集中在处理图像和检测椭圆中,其余算法运行时间较短.表 4 说明了在卫星距离双目相机距离越近,位姿测量平均时间会越长,其中检测卫星对接环椭圆和标志点的运行时间显著加长.但是这个运行时间仍大幅小于每两帧之间的采样间隔时间,所以本方法的运行时间不会影响对接任务的效率.

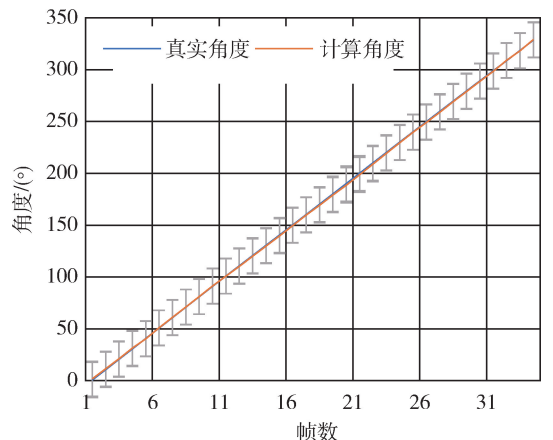


图 5 7~5 m 阈值内的真实角度和计算角度

Fig. 5 The real angles and the calculated angles in 7~5 m

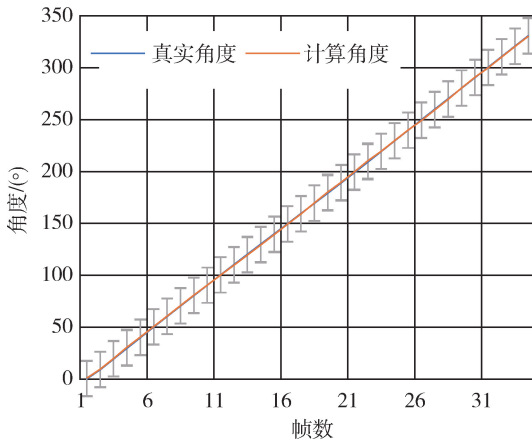


图 6 5~3 m 阈值内的真实角度和计算角度

Fig. 6 The real angles and the calculated angles in 5~3 m

表 2 在不同距离阈值中卫星位姿测量的平均误差

Tab. 2 The average errors of satellite pose measurement under different distance thresholds

	平均误差				
	距离/cm	旋转角/ (°)	帧间距离/ cm	帧间旋转 角/(°)	
距离	7-5	2.29	1.14	0.46	0.23
范围/m	5-3	1.19	0.73	0.35	0.16

表 3 卫星位姿测量的平均运行时间

Tab. 3 The average running time of satellite pose estimation

总运行/ ms	处理图像/ ms	检测椭圆/ ms	检测标志点/ ms	计算位姿/ ms
1739	1344	222	55	119

表 4 在不同距离阈值中卫星位姿测量的平均运行时间

Tab. 4 The average running time of satellite pose estimation under different distance thresholds

距离范围/ m	总运行/ ms	处理图像/ ms	检测椭圆/ ms	检测标志 点/ms	计算位姿/ ms
7-5	1680	1312	201	46	121
5-3	1798	1375	243	64	116

6 结 论

由于太空环境中光源单一,且卫星表面一般为反光材质,在对接任务中对卫星进行准确的位姿测量是较为困难的.本文提出了一种高效且稳定的卫星双目位姿测量方法.本方法利用卫星固有的特征(对接环以及面板标志点)进行位姿测量,并且引入 ORB 特征点、光流追踪法和卡尔曼滤波模型以增强算法鲁棒性.仿真实验结果验证了本文方法的有效性.

参 考 文 献

[1] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. New York:IEEE, 1999.

[2] 胡庆雷,解静洁,奚勇.基于拉盖尔函数的卫星姿态预测控制方法[J].飞控与探测,2019,2(1):1-7.

HU Q L, XIE J J, XI Y. Method of the satellite attitude predictive control based on the laguerre function [J]. Flight Control & Detection, 2019, 2 (1) : 1-7.

[3] 胡海东,何英姿,魏春岭,等.一种失稳卫星星箭对接环双目测量方法,CN201810352872.2[P].2018-04-19.

[4] 曹妹清,卢山,刘宗明,等.基于目标特征的单目视觉快速相对位姿测量系统及方法:中国,CN201711242992.9[P].2017-11-30.

[5] 张铁毅,薛建平,孙超姣,等.卫星空间对接位置视觉测量方法[J].飞行力学,2016,34(1):68-71.

ZHANG T Y, XUE J P, SUN C J, et al. A vision-based location method for spacecraft docking [J]. Flight Dynamics, 2016, 34 (1) : 68-71.

[6] CANNY J. A computational approach for edge detection [J]. PAMI, 1986, 8 (6) : 679-698.

[7] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C] // 2011 International conference on computer vision. New York: IEEE, 2011.

[8] BOUGUET J Y. Pyramidal implementation of the lucas kanade feature tracker description of the algorithm [J]. Cité en, 2007: 69.

[9] WELCH G. Kalman Filter [M]. Siggraph Tutorial, 2001.

[10] LU C, XIA S, SHAO M, et al. Arc-support line segments revisited: an efficient high-quality ellipse detection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29: 768-781.

[11] BALLARD D H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes [J]. Pattern recognition, 1981, 13 (2) : 111-122.

[12] KONG H, AKAKIN H C, SARMA S E. A generalized Laplacian of Gaussian filter for blob detection and its applications [J]. IEEE transactions on cybernetics, 2013, 43 (6) : 1719-1733.

[13] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: efficient perspective-n-point camera pose estimation [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81 (2) : 155-166.

作者简介:邓爽(1995—),男,博士研究生,研究方向为三维计算机视觉;王波(1984—),男,副研究员,研究方向为摄像机定位、基于图像的三维重构;董秋雷(1980—),男,研究员,研究方向为模型分类、视觉定位与三维建模.