

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.02.07

复杂光照环境下空间目标相对位姿测量方法研究

丁奕冰, 王海明*, 苏振华, 尹亮, 罗鹰

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 为解决空间复杂光照环境下可见光相机获取的图像照度不一、信息失真、特征不完整导致的目标航天器相对位姿求解困难的问题, 提出了一种基于图像增强和弧段特征的双目视觉相对位姿测量方法。首先通过基于带色彩保留的多尺度Retinex(Multi-scale Retinex with Chromaticity Preservation, MSRCP)自适应图像预处理方法提升空间暗弱光、局部强曝光环境下的图像质量; 然后利用基于边缘弧支撑线段的椭圆检测算法提取目标航天器表面星箭对接环的弧段特征, 并拟合得到椭圆轮廓; 最后利用双目相机搭建了空间相对位姿测量物理仿真实验平台, 建立双目空间椭圆锥测量模型解算目标的六自由度相对位姿, 实现了近距离正常光照和暗弱光照场景下目标航天器相对位姿求解。实验结果显示: 在正常光照场景下, 相对位置平均误差不超过 ± 20 mm, 相对姿态平均误差不超过 $\pm 0.3^\circ$; 在暗弱光照场景下, 相对位置平均误差不超过 ± 30 mm, 相对姿态平均误差不超过 $\pm 1^\circ$ 。研究成果为近距离空间交会对接等在轨服务任务中的目标识别与测量提供了参考, 具有技术借鉴价值。

关键词: 相对位姿; MSRCP; 椭圆检测; 双目视觉; 在轨服务

中图分类号: TP931.41; TB92; V448.25+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 02-0056-14

Research on relative pose measurement method of space target in complex light environment

DING Yibing, WANG Haiming*, SU Zhenhua, YIN Liang, LUO Ying

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: To solve the problems of difficulty in measuring the relative pose of the target spacecraft caused by different illumination, information distortion and incomplete feature of the image obtained by the visible light camera under complex lighting conditions in space, a binocular vision relative pose measurement method based on image enhancement and arc feature was proposed. An adaptive image preprocessing algorithm based on multi-scale Retinex with chromaticity preservation (MSRCP) was applied firstly to improve the image quality in the environment of spatial dim light and local strong exposure. Secondly, an ellipse detection algorithm based on the edge arc support line segment was applied to extract the arc segment features of the docking ring on the surface of the target spacecraft and fit them into an elliptical contour. Finally, a binocular vision camera was used to build a physical simulation platform for relative pose measurement, and a binocular space elliptical conic measurement model was established to calculate the six degrees of freedom relative pose. The relative pose of target spacecraft was achieved in normal and dim light scenes at close range. The experimental results showed that the average error of relative position is less than ± 20 mm and the average error of relative attitude is

收稿日期: 2024-03-30; 修回日期: 2024-04-08

基金项目: 科工局民用航天技术预先研究项目(D010301)

引用格式: 丁奕冰, 王海明, 苏振华, 等. 复杂光照环境下空间目标相对位姿测量方法研究[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 56-69.

Citation: DING Y B, WANG H M, SU Z H, et al. Research on relative pose measurement method of space target in complex light environment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 56-69.



less than $\pm 0.3^\circ$ under normal lighting condition, and the average errors of relative position and pose are less than ± 30 mm and $\pm 1^\circ$, respectively, under dim lighting condition. The research results provide a reference for the identification and measurement of targets in on-orbit service missions such as close-range space rendezvous and docking, and have technical reference value.

Key words: relative pose; MSRCP; ellipse detection; binocular vision; on-orbit service

0 引言

近年来航天发射活动越来越频繁,空间碎片、故障或失效航天器数量也随之增加,根据欧空局空间环境报告,目前记录在册的长度大于 10 cm 的空间碎片已超过 36 500 块^[1],空间环境变得日益拥挤,对新一轮的太空探索产生了严重影响。为了解决上述问题,降低空间碎片影响,在轨服务的概念应运而生。在轨服务通过碰撞规避、主动清理、辅助离轨等方式减少空间碎片对航天器的影响。典型在轨服务近距离引导和逼近阶段往往通过服务航天器携带的视觉相机完成对目标航天器位姿信息的测量。测量方法主要包括两大类:基于模型匹配的方法和基于几何特征的方法。

基于模型匹配的航天器位姿测量方法包括基于库的模型匹配法、深度模型法以及点云模型法等^[2-4]。基于库的模型匹配法由于无法保证预设库模型与目标尤其是空间非合作目标完美匹配,存在一定的误差。深度模型法以及点云模型法需要进行大量计算以得到目标整体三维点云,存在实时性差以及计算复杂的问题。识别目标典型几何结构对于空间近距离在轨服务具有重要意义,例如识别目标太阳帆板、天线等结构可以辅助规划无碰撞的安全抵近路径;识别星箭对接环和发动机喷管等具有特殊形状的结构可以辅助决定潜在的操作点。基于几何特征的航天器位姿测量方法受到了科研工作者的广泛关注。

文献[5]根据星箭对接环和远地点发动机喷嘴的位置关系,提出了一种基于单目视觉的相对导航方法,但是需要提前获得对接环和喷嘴的尺寸等参数信息并且限定了目标只能在一个二维平面内改变相对姿态。文献[6]改进了上述单目相对导航模型,提出了一种基于同心圆特征的双目快速识别和高精度定位模型。文献[7]通过椭圆锥模型求解星间对接环的位姿,引入了半径和位置未知

的发动机喷嘴以消除位姿对偶性。

空间光照条件的剧烈变化以及航天器表面热控多层材料的高反射性容易导致光学相机成像时图像出现“过曝”或“过暗”现象,造成图像模糊、部分细节丢失、关键结构特征难以辨别等,航天器典型几何特征的高精度识别仍然存在很多挑战。文献[8]提出了一种对接环检测方法,首先对星箭对接环的边缘弧段进行提取和分类,之后根据弧段筛选机制进行筛选,然后通过最小二乘拟合得到椭圆参数,最终实现对接环检测。该课题组利用此方法对在轨航天器的真实图像进行了实验测试,但是并没有考虑复杂空间光照条件对图像的影响。文献[9]将低照度增强算法与 ORB-SLAM (Oriented FAST and Rotated BRIEF-Simultaneous Localization and Mapping) 算法结合,提出了一种低照度条件下空间非合作目标的姿态估计方案,解决了低照度条件下的姿态估计问题,但是仅开展了数值仿真实验,缺乏基于航天器真实图像的测试。文献[10]使用随机抽样一致算法筛选图像特征点并进行匹配,使用卡尔曼滤波算法求解航天器相对姿态。该算法精度高,减少了阳光的干扰,但时效性较差。文献[11]针对近距离捕获任务场景下空间高辐射、高光强以及航天器表面热控多层材料导致的图像处理困难问题,提出了一种基于点云灰度图像的对接环位姿估计方法,降低了杂散光的影响,但是三维点云计算时,需要大量的计算资源和训练数据。

目前大多数关于目标相对位姿测量的研究未考虑空间复杂光照的影响;虽然也有少数科研工作者分析了空间复杂光照的影响并提出了相应条件下的目标相对位姿测量方法,但是这些方法或需要使用复杂的测量仪器,或需要占用较高的计算资源。针对上述问题,本文提出了一种复杂光照环境下基于双目视觉相机的目标相对位姿测量方法,利用 MSRCP 自适应图像预处理方法对空间

中不同光照条件下获取的低照度图像或局部过曝光图像进行处理,以调整检测阈值、最大化剔除弱边缘干扰、保留有效边缘,然后采用基于边缘弧支撑线段的椭圆检测算法提取出目标星间对接环的弧形轮廓曲线,并拟合得到完整的椭圆,最后基于双目相机建立的相对位姿测量模型完成对目标相对位置和相对姿态的求解。在不使用复杂测量仪器而仅利用双目可见光相机的情况下,通过图像增强技术提升不同光照环境下的图像质量,为目标位姿测量提供更多有效信息,实现空间复杂光照环境下近距离范围内的目标相对位姿求解。

1 基于MSRCP的自适应图像预处理

1.1 MSRCP图像增强处理

受太空光照环境变化、成像设备性能等因素影响,图像往往会出现细节不清晰、照度不均匀等问题,直接限制了后续处理与计算,对低质量图像进行增强处理可以为目标精确测量提供更多有效特征信息。图像增强算法主要包括基于空域、频域以及基于Retinex理论的增强算法等。1971年, LAND提出了Retinex理论^[12],该理论将待处理图像 S 视为反射图像 R 与照度图像 L 的合成,反射分量包含图像的固有特征并且不同光照下保持一致,照度分量则体现了光照等外界信息。Retinex理论原理图如图1所示。

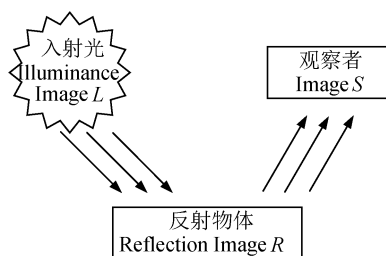


图1 Retinex理论原理图

Fig.1 Schematic of Retinex theory

Retinex算法的核心思想是采用合适的函数估计照度分量以消除其干扰,利用反射分量还原图像的真实色彩。典型的单尺度Retinex算法(Single-scale Retinex, SSR)公式为

$$\lg R_i(x, y) = \lg S_i(x, y) - \lg [S_i(x, y) * G(x, y)] \quad (1)$$
式中: $R_i(x, y)$ 为反射图像分量, $S_i(x, y)$ 为输入

图像, i 为颜色通道 R 、 G 、 B , (x, y) 为像素坐标, $*$ 为卷积运算符号, $G(x, y)$ 为高斯核函数。

多尺度Retinex算法(Mingle-scale Retinex, MSR)采用多个尺度加权求和,解决了SSR难以在局部细节增强和整体色彩效果之间取得较好平衡的问题^[13]。MSR在三个颜色通道上分别进行卷积,但无法保证处理后图像的颜色通道比例关系保持不变,因此处理后的图像可能出现一定的颜色失真现象。带色彩恢复的多尺度Retinex算法(Multi-scale Retinex with Color Restoration, MSRRCR)通过引入一个颜色恢复因子改善了颜色失真现象,但应用该算法处理具有饱和颜色的图像时仍有反转图像颜色的风险;MSRCP通过在强度通道上应用MSR,使处理后的图像色度与原始图像相同,更好地保留颜色^[14-15]。综上所述,本文选用MSRCP对图像进行增强处理。

1.2 滤波处理、阈值分割与边缘检测

图像被增强后仍包含着不同类型的噪声,非线性滤波(例如中值滤波)在去除不同类型的噪声(例如椒盐噪声和斑点噪声)方面具有较显著效果,同时不会模糊图像的边缘细节,故采用非线性滤波对增强后的图像进行处理。

滤波后的图像既包含目标主体部分也包含不相关的背景部分,需要进行图像分割以提取出目标主体部分。常用的图像分割方法包括传统方法和深度学习方法,考虑星载计算资源和训练样本的限制,采用传统方法中应用最为广泛的大津法进行图像分割。大津法无需图像先验知识,可以自动确定分离前景和背景的最佳阈值,并且处理速度较快。光照不均、反光、背景复杂等因素可能导致目标与背景的大小比例悬殊,影响大津法分割效果,但先前的图像增强处理极大改善了图像的质量,有效解决了过曝或过暗时大津法处理不理想的问题。

为识别星箭对接环的椭圆特征,首先要获得对接环边缘点。传统边缘检测方法多采用将图像梯度值与某一个固定的阈值进行比较的方式来识别并剔除多余的边缘点,但是太空剧烈变化的光照条件会影响成像效果,若检测阈值过高,可能会丢失图像的某些关键信息;若检测阈值过低,

则无法有效剔除伪边缘,混淆有效轮廓。本文选用改进的自适应 Canny 边缘检测算法识别对接环特征,该方法通过对幅度梯度直方图进行微分运算,得到高、低两个自适应阈值^[16],然后通过非极大值抑制处理以及双阈值滞后处理,检测出图像的边缘曲线。这种方法充分利用图像自身的特征信息自适应地调整检测阈值,可以更好地保留图像的细节信息,提高检测准确率。

2 基于边缘弧支撑线段的椭圆检测

圆形星箭对接环是航天器的典型表面结构特

征之一,投影到相机像平面时多为椭圆,因此椭圆检测技术是实现空间目标相对位姿测量的关键。

2.1 弧支撑线段提取、筛选与组合

预处理后的图像包含大量边缘曲线,为识别对接环,需从中筛选出属于椭圆的边缘弧段。图像边缘曲线中的线段主要来源于:①某一区域内的各点有着大致相同的水平线角度,并且总体上呈直线分布;②像曲线一样变化的弧支撑区域。弧支撑区域中的线段称为弧支撑线段,其具有凹凸性,体现了椭圆的中心方向。弧支撑线段示意图如图2所示。

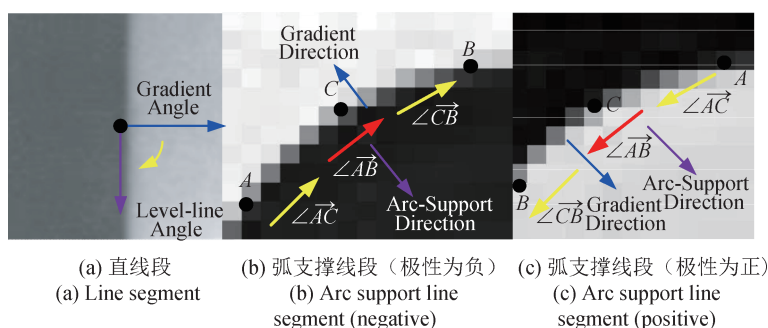


图2 弧支撑线段示意图

Fig.2 Schematic diagram of arc support line segment

灰度图像中局部区域梯度方向体现了明暗变化趋势,当梯度方向与弧支撑方向相同时,定义弧支撑线段的极性为正,否则极性为负。在圆边缘周围,内部区域总是比外部区域更亮或更暗,当内部区域更亮时,相应的弧支撑线段极性为正,否则为负。显然,属于同一个圆的弧支撑线段的极性相同。

理想椭圆弧段应满足3个条件,如图3所示。

① 长度条件:椭圆拟合至少需要5个边缘点,小于5个的弧段剔除;② 角度条件:设定弧支撑区域主角公差为 α ,两个连续弧支撑线段之间的角度偏差应小于 2α ;③ 曲率条件:连续的弧支撑线段应满足凸性条件,即曲率沿同一方向(顺时针或逆时针)改变。根据这些条件筛选出弧支撑线段,并组合为集合。

2.2 轮廓拟合确定初始椭圆

椭圆的轮廓拟合有两类广泛使用的方法,分别是聚类法(例如基于霍夫的方法)和最小二乘拟合法,聚类法的投票机制耗时较长,而最小二乘

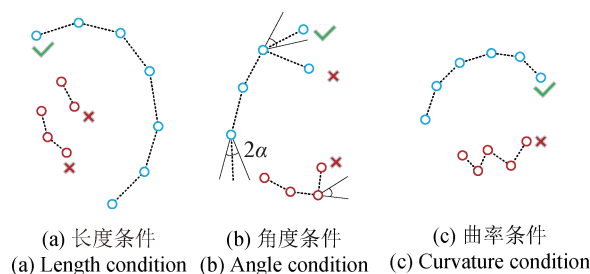


图3 理想椭圆弧段3个条件

Fig.3 Three conditions for an ideal elliptical arc segment

拟合法侧重于求取轮廓最小化点和椭圆之间的残差,因为椭圆拟合问题的约束是二次的,会导致迭代效率低下。基于FITZGIBBON等人^[17]通过求解特征系统正特征向量的非迭代算法进行椭圆拟合,椭圆的圆锥曲线一般方程为

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0 \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 为椭圆一般方程的待求取系数。

椭圆的中心为 (x_c, y_c) ,半长轴为 a ,半短轴为 b ,半长轴与坐标系 X 轴正方向的夹角为 θ ,则椭圆

的方程也可以由参数 $[a, b, x_c, y_c, \theta]^T$ 构造得出。根据椭圆的一般方程与参数方程之间的转换关系,反解出椭圆的5个参数表达式,即

$$\begin{cases} x_c = \frac{CD - BE}{B^2 - AC} \\ y_c = \frac{AE - BD}{B^2 - AC} \\ a = \sqrt{\frac{2(Ax_c^2 + 2Bx_cy_c + Cy_c^2 - F)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + 4B^2}}} \\ b = \sqrt{\frac{2(Ax_c^2 + 2Bx_cy_c + Cy_c^2 - F)}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + 4B^2}}} \\ \theta = -\frac{1}{2} \arctan \frac{-2B}{A - C} \end{cases} \quad (3)$$

弧段上点 p_i 像素坐标集合为 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 其中 $p_i = (x_i, y_i)$, 定义矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

设 $\mathbf{a} = [A, B, C, D, E, F]^T$ 、 $\mathbf{X} = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]$, 则椭圆的一般方程可表示为 $\mathbf{aX} = 0$ 。

最佳拟合的椭圆即对应 $\sum_{i=1}^N (\mathbf{aX}_i)^2$ 的最小值, 此时存在约束条件 $\Delta = B^2 - 4AC < 0$ 。在适当的缩放尺度下, 上述不等式约束可转化为等式约束 $\Delta = B^2 - 4AC = -1$, 约束条件可改写为

$$\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a} = 1 \quad (5)$$

其中, 常数约束矩阵 $\mathbf{C}$ 为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 2 & 0 & & \\ -1 & 0 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \\ 0 & \dots & & & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

受约束的椭圆拟合问题简化为在上述约束情况下最小化 $\|\mathbf{Da}\|^2 = \mathbf{a}^T \mathbf{D}^T \mathbf{Da}$, 利用秩有效的广义特征系统 $\mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}$ 求解上述最小化, 散布矩阵 $\mathbf{S} = \mathbf{D}^T \mathbf{D}$,

引入拉格朗日乘数 λ 并微分, 得到同步方程组

$$\begin{cases} \mathbf{Sa} = \lambda \mathbf{Ca} \\ \mathbf{a}^T \mathbf{Ca} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

通过求解式(7)的正特征值的特征向量 $\mathbf{a}$, 即可得到相对于集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 的期望椭圆一般方程系数, 再根据式(3)计算得到椭圆参数。

2.3 仿射变换验证候选椭圆

轮廓拟合后得到了若干候选椭圆, 在候选椭圆中可能存在由冗余圆弧产生的虚假椭圆、重复椭圆, 需要从以下两个方面对椭圆进行验证以剔除虚假椭圆、重复椭圆。

1) 仿射变换估计中心误差

仿射变换是一种二维坐标到二维坐标之间的线性变换, 变换过程中直线度(表征形状误差)和平行度(表征位置误差)保持不变。利用仿射变换对中心位置进行估计的主要思路是: 首先寻找可能属于同一椭圆的弧段组合的最大外接矩形, 之后对最大外接矩形进行仿射变换得到对应的正方形, 然后利用霍夫变换拟合出正方形的最大内接圆, 将最大内接圆的圆心位置与椭圆中心位置进行比较, 实现椭圆验证。仿射变换示意图如图4所示。

二维平面中, 仿射变换前的点坐标为 (x, y) , 仿射变换后的点坐标为 (x', y') , 则仿射变换表达式为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: a, b, c, d, m, n 为仿射变换系数。

定义候选椭圆弧段集合为 S_i^1 , 假设其最小外接矩形的顶点坐标为 $(x_i^1, y_i^1), (x_i^2, y_i^2), (x_i^3, y_i^3), (x_i^4, y_i^4)$, 定义顶点 $(x_i^1, y_i^1), (x_i^2, y_i^2)$ 之间的距离为宽。通过定义的宽度可推导出仿射变换后正方形的另外两个新的顶点为 $(x_i^{3'}, y_i^{3'}), (x_i^{4'}, y_i^{4'})$, 将其代入式(8)即可求解出仿射变换系数。

根据仿射变换公式, 将弧段集合 S_i^1 仿射变换为集合 S_i^2 , 再利用霍夫变换将弧段集合 S_i^2 拟合圆, 得到拟合后圆心坐标, 若圆心与椭圆中心距离差值小于设定的阈值, 则认为椭圆有效, 否则剔除。

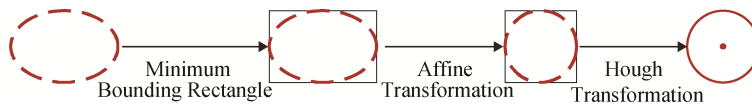


图4 仿射变换示意图

Fig.4 Schematic diagram of affine transformation

2) 边缘采样点估计

统计边缘弧段上的像素点落在拟合得到的椭圆边缘上的数量,落在边缘上的像素点数量越多,说明拟合越精准。对于给定的边缘像素点集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 将每个像素点 p_i 的坐标代入拟合的椭圆方程,理想情况下,代入一般方程后计算结果应该为0,而实际情况下,边缘像素点不可能完全落在边缘上。设定阈值 T_d ,将像素点坐标代入椭圆方程后,如果计算结果的绝对值小于 T_d ,则认为该像素点落在拟合的椭圆边缘上。将集合中的每一个像素点坐标代入椭圆方程计算并与 T_d 进行比较,最后统计集合中像素点落在边缘上的数量,当落在边缘上像素点的数量占总像素点的比例

η 大于设定的比例阈值 T_η 时,认为椭圆真实有效。

3 双目视觉相对位姿测量模型

3.1 平行双目视觉测量原理

在轨服务近距离阶段对目标航天器相对位姿信息的测量,本质上是解算不同时刻目标航天器对应的目标坐标系与服务航天器对应的坐标系之间的旋转矩阵和平移向量^[18]。空间相机成像过程中需要将空间目标投影到相机二维平面上,涉及像素坐标系、图像坐标系、相机坐标系、世界坐标系等坐标系之间的变换。

真实世界坐标系中的物点 P 与像素坐标系中的像点 p 在各个坐标系之间的变换过程如图5所示。

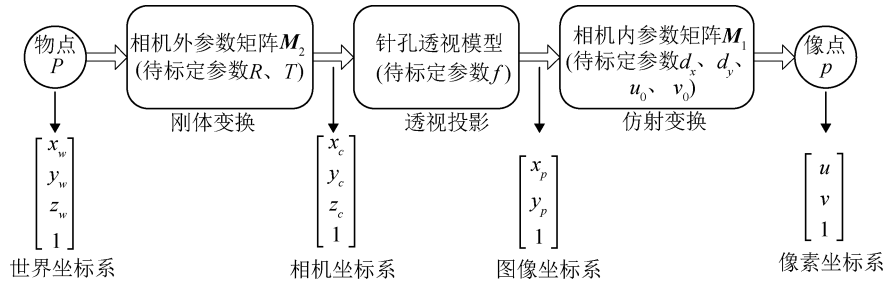


图5 不同坐标系变换过程

Fig.5 Transformation between different coordinate systems

将各坐标系之间的变换关系联立,可推导出

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f/d_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \tilde{\mathbf{X}}_w = \mathbf{M} \tilde{\mathbf{X}}_w \quad (9)$$

式中: $\mathbf{M}_1$ 为相机的内参数,仅与相机焦距 f 、像元尺寸 (d_x, d_y) 、主点 (u_0, v_0) 有关; $\mathbf{M}_2$ 为相机的外参数,表征了相机坐标系与世界坐标系间的旋转和平移关系; $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵,由绕三轴的旋转角所定义; $\mathbf{T}$ 为平移向量; $\mathbf{M}$ 为投影矩阵,它是 3×4 矩阵,反映了像素坐标系与世界坐标系间的变换关系; (x_w, y_w, z_w) 为点在世界坐标系下的坐标; $\tilde{\mathbf{X}}_w$ 为世界坐标的齐次形式; (u, v) 为点在像素坐标系下的坐标。

利用棋盘格标定法获得相机的内外参数,完成相机标定后选取某一标定图像的原点作为世界坐标系的原点,然后对目标成像,得到目标某一特征点在像素坐标系中的二维坐标,通过坐标系

世界坐标系与像素坐标系之间的变换关系,即

间的变换关系即可推导出特征点在世界坐标系中的三维坐标。

平行双目视觉测量原理如图6所示,相机基线为 b ,空间中的一点 P 在左右相机两幅图像中的像素坐标分别为 $P_l(u_l, v_l)$ 、 $P_r(u_r, v_r)$,理想情况下有 $v_l = v_r$ 。

根据像素坐标系与相机坐标系之间的关系可推导相机坐标系下的坐标,即

$$\begin{cases} x_c = b \cdot \frac{u_l - u_0}{u_l - u_r} \\ y_c = b \cdot \frac{d_y}{d_x} \cdot \frac{v_l - v_0}{u_l - u_r} \\ z_c = b \cdot \frac{f}{d_x} \cdot \frac{1}{u_l - u_r} \end{cases} \quad (10)$$

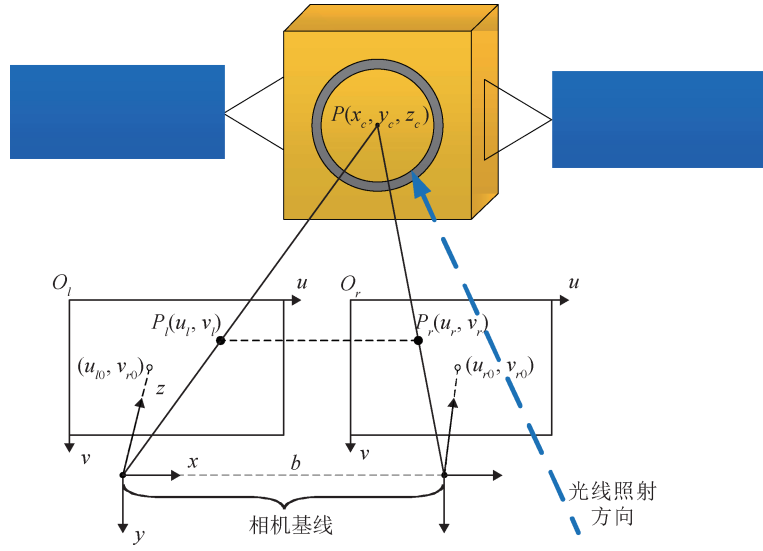


图6 平行双目视觉测量原理

Fig.6 Parallel binocular vision measurement principle

式中： d 为视差，即空间点 P 在左右像平面中的像素差， $d = u_l - u_r$ 。通过视差可以计算出空间点 P 在相机坐标系下的三维坐标。

3.2 空间目标相对位姿测量

利用双目相机对目标进行立体匹配，得到左右相机拍摄的目标特征点像素坐标，利用已知的相机与世界坐标系之间的关系、特征点与相机之间的关系，即可推导出目标在世界坐标系中的三维位姿。空间中圆形特征的三维位姿估计可分解为三维方向估计和三维位置估计两部分，首先估计圆形特征的三维方向（即圆面的法向量方向），然后根据所估计的方向计算圆心三维位置。

3.2.1 单目空间圆锥位姿求解

根据二维像平面上的像素点 (x, y) 与空间目标点在相机坐标系中的坐标 (X, Y, Z) 的变换关

系，可以推导出空间圆锥一般方程，但是由上述变换推导出的一般方程形式复杂。为简化计算，建立一个使圆锥一般方程无交叉项的新坐标系 $\sum X'Y'Z'$ ，相机坐标系 $\sum XYZ$ 与新坐标系之间有着齐次变换关系 $\sum XYZ = P \sum X'Y'Z'$ ，其中 P 为齐次变换矩阵。简化后的圆锥一般方程为

$$\lambda_1 X'^2 + \lambda_2 Y'^2 + \lambda_3 Z'^2 = 0 \quad (11)$$

式中： λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为系数。可计算得到式(11)的闭式解析解。

根据数学关系可知，圆锥曲线的所有平行平面截面都是相似且位置相近的圆锥。因此，寻找交线为圆的平面的方程系数的问题可以用数学方法表示为寻找 l 、 m 和 n ，使得圆锥面与平面 $lX + mY + nZ = 0$ （其中， $l^2 + m^2 + n = 1$ ）的交点为圆。

当椭圆一般方程表示为圆时，有

$$\begin{cases} 2(\lambda_1 - \lambda_2) \frac{lmn}{l^2 + m^2} = 0 \\ \frac{1}{l^2 + m^2} (\lambda_1 m^2 + \lambda_2 l^2) = \frac{\lambda_1 l^2 n^2}{l^2 + m^2} + \frac{\lambda_2 m^2 n^2}{l^2 + m^2} + \lambda_3 (l^2 + m^2) \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)与 $l^2 + m^2 + n = 1$ 联立，假设 $\lambda_1 > \lambda_2 > 0 > \lambda_3$ ，则圆锥的主轴与 Z' 轴重合，求解结果为

$$\begin{cases} l = \pm \sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}} \\ m = 0 \\ n = \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}} \end{cases} \quad (13)$$

此时目标圆面在相机坐标系中的两个不同方向的法向量可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_1 = P \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}} & 0 & \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{n}_2 = P \cdot \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}} & 0 & \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (14)$$

式中： P 为齐次变换矩阵，

$$P = \begin{bmatrix} \frac{-m}{\sqrt{l^2 + m^2}} & \frac{-ln}{\sqrt{l^2 + m^2}} & l \\ \frac{l}{\sqrt{l^2 + m^2}} & \frac{-mn}{\sqrt{l^2 + m^2}} & m \\ 0 & \sqrt{l^2 + m^2} & n \end{bmatrix} \circ$$

求得目标圆面法向量后，将椭圆锥和两个空间圆所在截平面分别投影到 $X'Z'$ 平面，根据投影直线相交关系，求出圆心在相机坐标系下的坐标为

$$\begin{cases} [X_{c1} & Y_{c1} & Z_{c1}]^T = \\ P \cdot \begin{bmatrix} R \sqrt{\frac{\lambda_3(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1(\lambda_1 - \lambda_3)}} & 0 & R \sqrt{\frac{\lambda_3(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1(\lambda_1 - \lambda_3)}} \end{bmatrix}^T \\ [X_{c2} & Y_{c2} & Z_{c2}]^T = \\ P \cdot \begin{bmatrix} -R \sqrt{\frac{\lambda_3(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1(\lambda_1 - \lambda_3)}} & 0 & R \sqrt{\frac{\lambda_3(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1(\lambda_1 - \lambda_3)}} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (15)$$

3.2.2 双目空间椭圆锥位姿确定

通过单目空间椭圆锥测量模型得出的圆面法向量和圆心坐标都不是唯一的，并且圆心坐标中还包含了圆面半径 R 这一未知量。需要根据双目相机之间的相对位置关系，建立左右相机测量结果的对应关系，从而求解出圆的半径以及唯一的法向量和圆心位置。双目空间椭圆锥测量原理如图7所示。

利用单目相机进行测量，之后计算得到两个

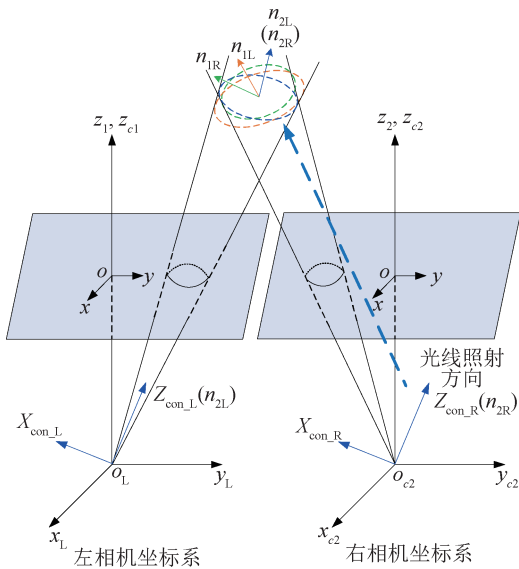


图7 双目空间椭圆锥测量原理

Fig.7 Binocular spatial elliptical conic measurement

方向的法向量，左右相机估计的法向量分别为 ${}^L n_{1L}$ 、 ${}^L n_{2L}$ 和 ${}^R n_{1R}$ 、 ${}^R n_{2R}$ ，变量中的左上标分别表示在左、右相机坐标系下，将左、右相机坐标系下的法向量通过标定得到的内参和外参转换到世界坐标系下，即

$$\begin{cases} {}^W n_{1L} = {}^W A_L \cdot {}^L n_{1L} \\ {}^W n_{2L} = {}^W A_L \cdot {}^L n_{2L} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} {}^W n_{1R} = {}^W A_R \cdot {}^R n_{1R} \\ {}^W n_{2R} = {}^W A_R \cdot {}^R n_{2R} \end{cases} \quad (17)$$

式中： ${}^W A_L$ 和 ${}^W A_R$ 分别为左右相机坐标系到世界坐标系的变换，已通过提前标定得到。由于圆面的法向量方向是唯一的，左右两个摄像头观察同一个圆面特征时必然存在共同的解(考虑实际误差，应存在两个十分接近的解)，即圆面法向量可以唯一确定，有

$${}^W n_c = \begin{cases} \frac{{}^W n_{1L} + {}^W n_{1R}}{2}, & \text{如果 } \angle({}^W n_{1L}, {}^W n_{1R}) \leq \varepsilon \\ \frac{{}^W n_{1L} + {}^W n_{2R}}{2}, & \text{如果 } \angle({}^W n_{1L}, {}^W n_{2R}) \leq \varepsilon \\ \frac{{}^W n_{2L} + {}^W n_{1R}}{2}, & \text{如果 } \angle({}^W n_{2L}, {}^W n_{1R}) \leq \varepsilon \\ \frac{{}^W n_{2L} + {}^W n_{2R}}{2}, & \text{如果 } \angle({}^W n_{2L}, {}^W n_{2R}) \leq \varepsilon \\ \text{不存在, 其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中， $\angle(n_1, n_2)$ 为向量 n_1 、 n_2 之间的夹角， $\angle(n_1, n_2) = \arcsin[\|n_1 \times n_2\| / (\|n_1\| \times \|n_2\|)]$ ； ε 为确定两向量平行水平的阈值。

确定圆面的法向量 ${}^W n_c = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ 后，可得到从世界坐标系到椭圆锥坐标系的齐次变换为

$${}^W T_{Con} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & d_x \\ n_y & o_y & a_y & d_y \\ n_z & o_z & a_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

圆心相对于椭圆锥坐标系的坐标为

$${}^{Con} p_o = \begin{bmatrix} X'_o \\ Y'_o \\ Z'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ 0 \\ B \end{bmatrix} R \quad (20)$$

式中： R 为半径， A 、 B 为由 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 决定的系数，表达式为

$$\begin{cases} A = \sqrt{\frac{|\lambda_3| (|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \\ B = \sqrt{\frac{|\lambda_1| (|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_3| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \end{cases} \quad (21)$$

将式(20)表示的齐次坐标改写为实际坐标, 可得

$${}^w p_o = \begin{bmatrix} n_x A + a_x B \\ -n_y A + a_y B \\ -n_z A + a_z B \end{bmatrix} R + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = kR + d \quad (22)$$

分别对左右相机进行式(22)表示的变换, 得到

$$\begin{cases} {}^w p_{oL} = k_L R_L + d_L \\ {}^w p_{oR} = k_R R_R + d_R \end{cases} \quad (23)$$

根据左右相机估计的圆心坐标位于世界坐标系中的同一点, 因此有

$${}^w p_{oL} = {}^w p_{oR} \quad (24)$$

联立式(23)、式(24)进而得到如下方程组

$$\begin{bmatrix} k_L & -k_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_L \\ R_R \end{bmatrix} = d_L - d_R \quad (25)$$

使用最小二乘法求解方程组, 得到

$$\begin{bmatrix} R_L \\ R_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_L & -k_R \end{bmatrix}^+ \cdot (d_L - d_R) \quad (26)$$

式中: $\begin{bmatrix} k_L & -k_R \end{bmatrix}^+$ 为 $\begin{bmatrix} k_L & -k_R \end{bmatrix}$ 的彭若斯广义逆矩阵。

然后将 R_L 和 R_R 代入式(22)即可估计出圆心相对于世界坐标系的坐标, 即

$${}^w p_o = \frac{{}^w p_{oL} + {}^w p_{oR}}{2} \quad (27)$$

4 实验及分析

4.1 实验系统搭建

地面仿真实验系统包括用于模拟空间目标的物理模型、已完成标定的双目视觉相机、用于数据采集的工控机和动作捕捉系统、用于数据处理的计算机以及相关软件。目标航天器模型主体为立方体箱型结构, 表面覆有真实航天器的热控多层材料, 主体棱长为 50 cm, 含星箭对接环、发动机喷管以及太阳帆板等结构; 星箭对接环直径为 30 cm, 实际测量时假设目标的尺寸不可知。双目视觉相机模组型号为 HBVCAM-4M2214HD-2 V11, 像元尺寸为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, 实际焦距为 3.114 mm, 左右相机平行, 实际基线为 60.137 mm。数据采集工控机硬件系统型号为 NVIDIA Jetson Orin Nano Developer Kit, CPU 型号为 Arm Cortex-A78AE, GPU 型号为 NVIDIA Ampere (1024 CUDA 核心), 软件系统型号为 Ubuntu 22.04 LTS。采用 NOKOV (度

量) MARS 系列 1 200 万像素动作捕捉相机进行测量, 频率为 300 Hz, 3D 测量精度在 mm 级。动作捕捉系统测量精度极高, 实际实验中以动作捕捉系统测量得到的位姿信息作为真值, 双目相机测量得到的位姿作为测量值, 从而求解测量误差。数据处理计算机硬件的平台为 Intel(R) Core(TM) i7-12700 (主频为 3.40 GHz), 软件系统架构为 Windows 11 x64。实验系统组成如图 8 所示。

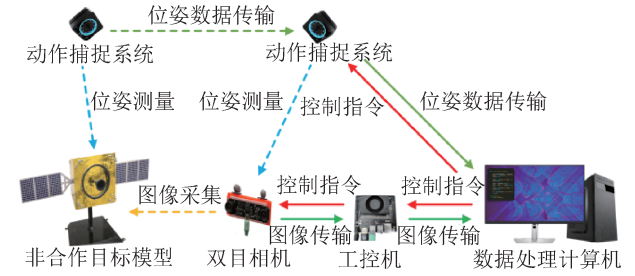


Fig.8 Diagram of experimental system composition

4.2 图像预处理与特征检测实验

实验条件设置如下: 目标模型静态放置, 相机光轴垂直于目标模型星箭对接环所在平面, 利用双目相机分别在正常光照条件、低照度(暗弱光)条件、局部过曝光条件下采集距离目标不同距离的图像。其中正常光照定义为白天实验室内自然光照场景, 暗弱光照定义为夜晚实验室中关闭各种灯光的场景, 不均匀照度(局部过曝光)定义为使用 LED 手电筒从特定角度照射星箭对接环所在平面的场景。利用双目相机采集三种光照场景下不同距离、不同角度的目标模型图像, 其中距离定义为相机光心与星箭对接环环心的连线距离(相机与对接环中心在同一水平高度)、角度定义为相机光轴与对接环环心处的平面法向量的夹角。相机距离目标模型 1 m 且夹角为 0° 时, 不同算法的图像处理效果如图 9 所示, 不同算法耗时如表 1 所示。

根据图 9 和表 1 可知, MSRCP 算法的增强效果显著优于其他基于中心/环绕的 Retinex 算法。对暗弱光照图像、局部过曝光图像应用 MSRCP 算法进行增强处理时, 由于是在强度通道上应用 MSR, 每种颜色都会按增强强度与正常强度值之间的比率成比例地变化, 在局部和全局上保持了周围颜色之间的相对强度, 比 MSRCR 的处理效果更好。

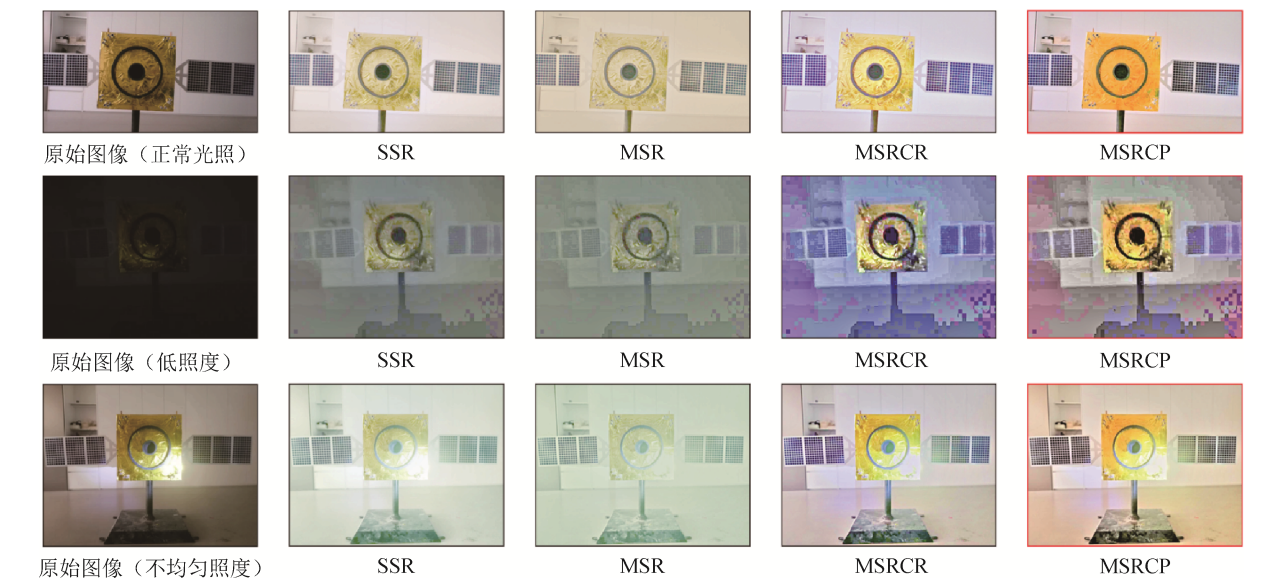


图9 不同算法的图像处理效果对比

Fig.9 Comparison of different algorithms for image processing effects

表1 不同算法耗时

Tab.1 Running time of different algorithms 单位: s

实验条件	SSR	MSR	MSRCR	MSRCP
正常光照	0.701	1.573	2.303	0.840
暗弱光照	0.637	1.531	2.176	0.850
局部过曝	0.694	1.636	2.434	0.859

SSR算法耗时最短，但是其处理效果不佳。MSRCP算法耗时相较MSRCR更短，在保证处理效果的同时兼具效率优势。

根据图像本身的客观参数进一步评价MSRCP算法对于图像质量的增强效果，结果如表2所示。三种光照场景下的图像经过处理后其亮度均值、图像标准差和对比度以及信息熵均有提升。尤其是暗弱光照场景下的图像，其亮度均值从9.90提升到了87.02，标准差从13.87提高到了61.02，图像对比度从19.62提高到了54.53，信息熵从5.43提高到了7.71，各项指标均有明显提升，证明该算法在图像质量增强尤其是暗弱光等复杂光照场景下图像质量增强方面具有较好效果。

为检测预处理后的椭圆特征，选用公开的卫星数据集图片(Satellite Images Dataset)以及本文实验过程中采集的不同光照下的航天器模型图像进行测试。对比测试方法包括随机霍夫变换(Randomized Hough Transform, RHT)^[19]、ELSDc(Ellipse

表2 MSRCP算法对图像质量增强效果客观评价

Tab.2 Objective evaluation of image quality enhancement effect of MSRCP algorithm

图像条件		亮度均值	标准差	对比度	信息熵
正常光照	原始	116.40	67.90	51.59	6.50
	增强	171.32	77.85	55.71	7.47
暗弱光照	原始	9.90	13.87	19.62	5.43
	增强	87.02	61.02	54.53	7.71
局部过曝光	原始	105.41	52.45	45.57	6.46
	增强	167.29	55.50	49.15	7.59

and Line Segment Detector, with Continuous validation)^[20]、Fornaciari^[21]、JiaQi^[22]以及人工标注好的Ground Truth，结果如图10所示。不同算法应用于不同数据集时的平均运行时间如表3所示。

根据图10和表3可知，本文的特征检测算法(即Our)应用于测试数据集以及实验图片时均取得了不错的效果，检测到的有效椭圆的数量与Ground Truth非常接近，显著优于其他算法，并且椭圆的完整度与平滑度均有保证。本文算法的平均运行时间也低于其他算法，实时性较高。

4.3 相对位姿测量实验

相对位姿测量实验目的是模拟空间在轨服务近距离交会对接前直线跟飞过程中的目标相对位姿测量。实验基准坐标系建立如下：以双目相机

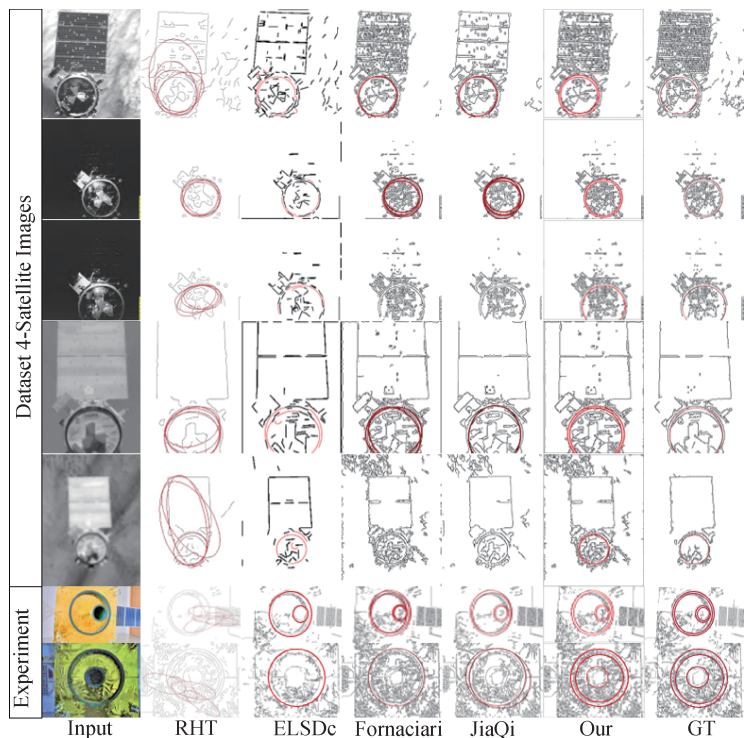


图10 不同椭圆检测算法在测试数据集上的结果对比

Fig.10 Comparison of results of different ellipse detection algorithms on test dataset

表3 不同算法应用于不同数据集时的平均运行时间
Tab.3 Average running time of different algorithms on different datasets 单位: ms

数据集	RHT	ELSDc	YEAD	JiaQi	Our
Satellite Images Dataset	2 678.6	21.5	14.5	12.8	3.6
实验图像	2 464.5	8.6	6.7	5.9	2.4

的左相机坐标系为相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$, 其 Z 轴沿相机的光轴方向, X 轴沿水平方向, Y 轴沿竖直方向; 图像坐标系为 $O_p - X_p Y_p$, 其 X 、 Y 轴分别与相机的 X 、 Y 轴同向; 目标航天器星箭对接环坐标系为 $O_d - X_d Y_d Z_d$, 原点在环心, 其 Z 轴垂直于星箭对接环平面, X 、 Y 轴在星箭对接环凸起的最外侧所在平面。

实验场景设定如下: 双目相机初始位置为距离目标航天器星箭对接环中心 4 m 远处, 相机光轴(相机坐标系的 Z 轴)垂直于星箭对接环所在平面。控制相机沿着光轴即 Z 轴所在直线匀速接近目标模型, 至距离星箭对接环中心 0.5 m 远(一般为在轨服务停泊点)处停止, 目标航天器保持静止。相机在接近目标的过程中, 动作捕捉系统同步采集相

机和目标模型的位姿信息作为相对位姿数据真值。设置正常光照和暗弱光照两种光照场景, 利用基于椭圆特征的位姿解算方法求解位姿。

相机沿直线移动过程中, 双目系统与动作捕捉系统测量的 Z 轴相对位置如图 11 所示, 其中, 蓝色实线为动作捕捉系统的测量值, 红色虚线为双目系统的测量值。纵坐标为相机与目标航天器

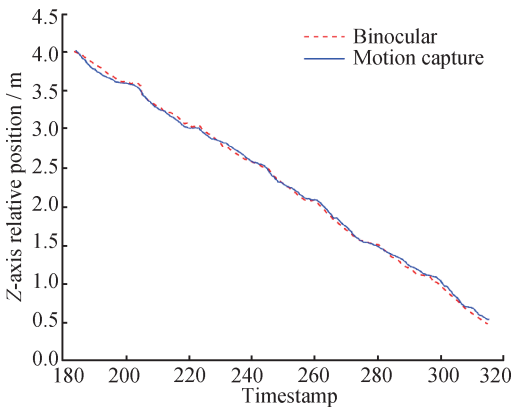


图11 相机沿直线移动过程中双目系统与动作捕捉系统测量的 Z 轴相对位置(正常光照条件下)

Fig.11 Relative position of Z -axis measured by binocular camera and motion capture system during camera movement along a line (in normal light environment)

在Z轴方向上的相对距离，横坐标轴为动作捕捉系统的时间戳，数值仅表示时间变化趋势，不表示实际时间。双目系统的测量值与动作捕捉系统测量值整体都呈现线性变化的趋势，表明相机与目标的距离均匀减小。

需要注意的是，由于动作捕捉系统测量频率为300 Hz，远高于相机20帧/秒的成像帧率，因此在数据处理时以测量开始和结束时的时间戳以及双目系统拍摄到的图像数量为基准，将动作捕捉系统测量的数据在横坐标轴上进行了缩放，估计相对位置和姿态误差时，选取0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 m位置的数据进行分析计算，结果如表4所示。正常光照下的X轴位置误差、Y轴位置误差、Z轴位置误差、X轴角度误差、Y轴角度误差、Z轴角度误差如图12所示，可知三轴平均相对位置误差为15.4 mm，三轴平均相对姿态误差为0.26°，在有效测量距离内随着测量距离的增加，相对位置和相对姿态的绝对误差呈现逐渐增大的趋势。

表4 正常光照下相对位姿误差测量结果
Tab.4 Measurement result of relative pose error in normal light environment

距离 / m	相对位置误差 / mm			相对姿态误差 / (°)		
	ε_x	ε_y	ε_z	$\varepsilon_{\theta x}$	$\varepsilon_{\theta y}$	$\varepsilon_{\theta z}$
0.5	-4.2	-3.7	9.4	0.09	0.11	0.14
1.0	6.2	5.7	13.5	0.20	0.18	0.18
1.5	9.7	8.9	18.7	-0.23	-0.26	-0.21
2.0	-12.3	-11.4	-20.8	0.21	-0.22	0.24
2.5	15.7	13.8	19.2	0.27	0.31	-0.25
3.0	17.4	18.1	-23.4	-0.34	-0.29	0.28
3.5	-20.6	-21.6	-21.1	-0.35	0.33	-0.33
4.0	22.8	22.6	29.2	0.40	0.42	0.45
平均误差	13.6	13.2	19.4	0.26	0.27	0.26
三轴平均	15.4			0.26		

表5和图13为暗弱光照下不同距离处的相对位姿测量误差，其中三轴平均相对位置误差为25.2 mm，三轴平均相对姿态误差为0.841°，在有效测量距离内相对位姿绝对误差随着测量距离增

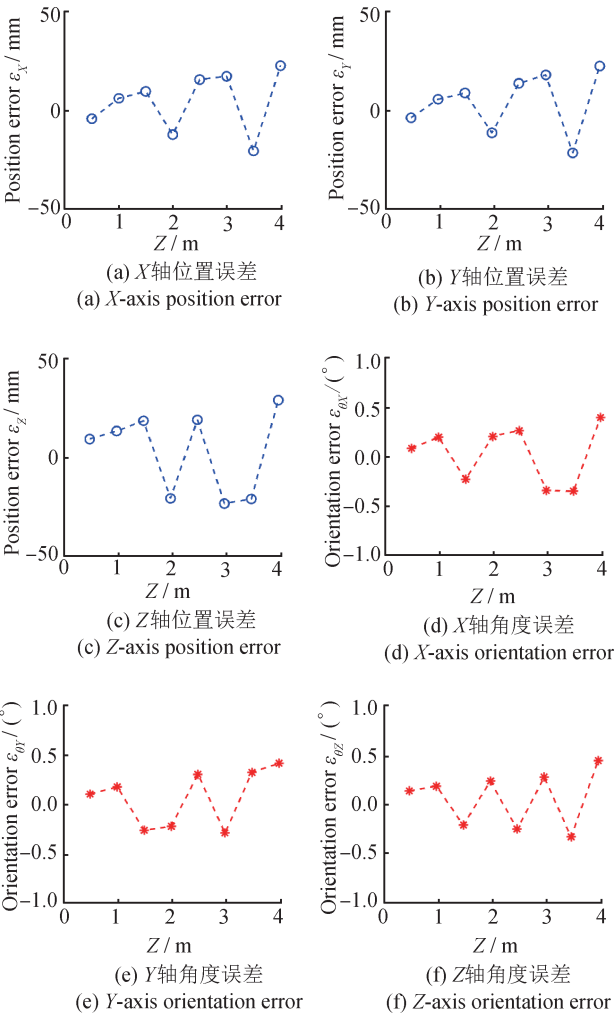


图12 正常光照下的相对位姿误差
Fig.12 Relative pose error in normal light environment

表5 暗弱光照下相对位姿误差测量结果
Tab.5 Measurement result of relative pose error in low light environment

距离 / m	相对位置误差 / mm			相对姿态误差 / (°)		
	ε_x	ε_y	ε_z	$\varepsilon_{\theta x}$	$\varepsilon_{\theta y}$	$\varepsilon_{\theta z}$
0.5	-9.6	8.9	12.8	0.15	0.17	0.21
1.0	13.7	-14.1	-18.9	0.44	-0.38	-0.52
1.5	-17.9	18.3	25.6	-0.59	-0.61	0.69
2.0	22.8	-23.4	-29.7	0.84	0.79	-0.88
2.5	-28.1	27.7	-34.8	-1.07	-0.96	1.12
3.0	32.9	-33.1	38.8	-1.35	1.22	-1.30
3.5	-37.1	36.9	43.9	1.52	-1.41	1.45
平均误差	23.2	23.2	29.2	0.85	0.79	0.88
三轴平均	25.2			0.84		

加逐渐增大。与正常光照场景相比,在暗弱光照下,相对位置和相对姿态的测量误差均有所增加。正常光照场景下的三轴平均相对位置误差不超过 ± 20 mm,三轴平均相对姿态误差不超过 $\pm 0.3^\circ$,暗弱光场景下的三轴平均位置误差不超过 ± 30 mm,三轴平均相对姿态误差不超过 $\pm 1^\circ$ 。

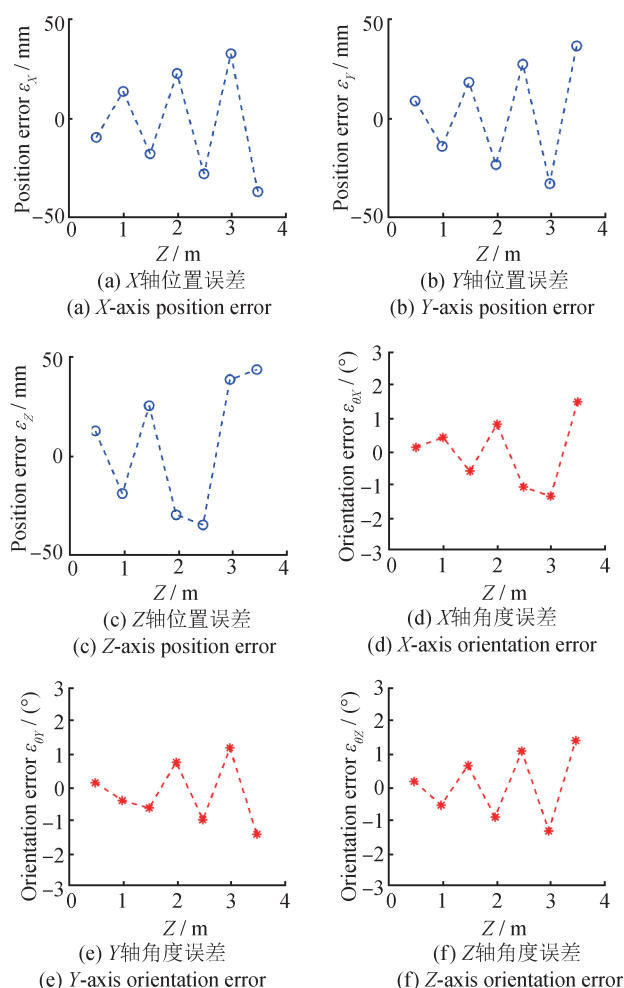


图13 暗弱光照下的相对位姿误差

Fig.13 Relative pose error in low light environment

5 结论

太空环境中光照条件变化剧烈,导致可见光相机成像时易出现过曝或过暗现象,造成图像信息失真和目标细节丢失,给目标航天器相对位姿测量带来挑战。针对该问题,研究并提出了基于双目视觉的目标航天器相对位姿求解方法,利用基于MSRCP的自适应图像预处理算法处理低照度图像,大幅提升了空间暗弱光、局部强曝光环境下的图像质量。之后设计了基于边缘弧支撑线段

的椭圆特征检测算法,在不同测试数据集上进行了对比测试,结果显示该算法具有较高的精确性和优良的实时性。搭建了地面仿真实验系统,并开展了近距离条件下目标航天器相对位姿测量实验,结果表明正常光照场景下目标航天器相对位置平均误差不超过 ± 20 mm,相对姿态平均误差不超过 $\pm 0.3^\circ$;暗弱光照场景下目标航天器相对位置平均误差不超过 ± 30 mm,相对姿态平均误差不超过 $\pm 1^\circ$ 。本文提出的方法无需占用较多计算资源,且无需使用复杂测量仪器即可完成航天器相对位姿测量,具有便捷、高效的优点,为航天装备近距离空间识别提供了技术参考,对于推动我国在轨服务技术发展具有积极意义。

参考文献

- [1] Esa Space Debris Office. ESA's annual space environment report[R]. Germany: ESA, 2023: 124.
- [2] WINGO D R. Orbital recovery's responsive commercial space tug for life extension missions[C]// Space 2004 Conference and Exhibit. 2004: 1-8.
- [3] 李永飞,王仕成,杨东方,等. 基于单目三维重构的空间非合作目标相对测量[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(5): 48-56.
- LI Y F, WANG S C, YANG D F, et al. Aerial relative measurement based on monocular reconstruction for non-cooperation target[J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(5): 48-56. (in Chinese)
- [4] 桂力,郑顺义,曹姝清,等. 基于点云的非合作航天器位姿测量方法研究[J]. 上海航天, 2016, 33(6): 122-128.
- GUI L, ZHENG S Y, CAO S Q, et al. Research of pose and altitude measurement for non-cooperative spacecraft based on 3D point clouds[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(6): 122-128. (in Chinese)
- [5] SABATINI M, PALMERINI G B, GASBARRI P. A test-bed for visual based navigation and control during space rendezvous operations[J]. Acta Astronautica, 2015, 117: 184-196.
- [6] 王珂,陈小梅,韩旭. 具有同心圆特征的非合作目标超近距离姿态测量[J]. 光电工程, 2018, 45(8): 86-94.
- WANG K, CHEN X M, HAN X. Research on pose measurement between two non-cooperative spacecrafts in close range based on concentric circles[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(8): 86-94. (in Chinese)
- [7] ZHANG D, YANG G, JI J, et al. Pose measurement and

- motion estimation of non-cooperative satellite based on spatial circle feature [J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(3): 1721-1734.
- [8] ZHANG L, PAN W, MA X. Real-time docking ring detection based on the geometrical shape for an on-orbit spacecraft [J]. *Sensors*, 2019, 19(23).
- [9] 周朋博, 刘晓峰, 蔡国平. 基于ORB-SLAM的低照度空间非合作目标的姿态估计[J]. *动力学与控制学报*, 2021, 19(1): 68-74.
- ZHOU P B, LIU X F, CAI G P. Attitude estimation of an non-cooperative spacecraft in low-light condition based on ORB-SLAM algorithm [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(1): 68-74. (in Chinese)
- [10] 邢艳军, 王浩, 叶东, 等. 基于单目视觉的非合作目标相对位姿测量[J]. *中国空间科学技术*, 2022, 42(4): 36-44.
- XING Y J, WANG H, YE D, et al. Relative pose measurement for non-cooperative target based on monocular vision [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(4): 36-44. (in Chinese)
- [11] ZHANG S, LI J, ZHANG W, et al. Research on docking ring pose estimation method based on point cloud gray-scale image [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 70(11): 3466-3477.
- [12] LAND E H. The retinex theory of color vision [J]. *Scientific American*, JSTOR, 1977, 237(6): 108-128.
- [13] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODDELL G A. Multi-scale retinex for color image enhancement [C]// *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE, 1996, 3: 1003-1006.
- [14] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center / surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, IEEE, 1997, 6(3): 451-462.
- [15] JOBSON D J. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Journal of Electronic Imaging*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004, 13(1): 100-110.
- [16] XUAN L, HONG Z. An improved canny edge detection algorithm [C]// *2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*. 2017: 275-278.
- [17] FITZGIBBON A, PILU M, FISHER R B. Direct least square fitting of ellipses [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 476-480.
- [18] 束安. 空间非合作目标的三目立体视觉位姿测量技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- SHU A. Research on trinocular visual position and attitude measurement technique for non-cooperative target [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [19] MCLAUGHLIN R A. Randomized Hough Transform: improved ellipse detection with comparison [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1998, 19(3-4): 299-305.
- [20] PĂTRĂUCEAN V, GURDJOS P, VON GIOI R G. A parameterless line segment and elliptical arc detector with enhanced ellipse fitting [C]// FITZGIBBON A, LAZEBNIK S, PERONA P, et al. *Computer Vision — ECCV 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 572-585.
- [21] FORNACIARI M, PRATI A, CUCCHIARA R. A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications [J]. *Pattern Recognition*, 2014, 47(11): 3693-3708.
- [22] JIA Q, FAN X, LUO Z, et al. A fast ellipse detector using projective invariant pruning [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(8): 3665-3679.

(本文编辑: 刘圣晨)

第一作者: 丁奕冰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器总体设计。



通信作者: 王海明(1981—), 男, 研究员, 中国空间技术研究院硕士生导师, 科技部导航与遥感重大专项专家组专家。先后参与国家重大专项、“863计划”重点项目10余项, 参与制定国家标准5项, 申请国家发明专利10余项, 发表论文10余篇。主要研究方向为卫星总体设计等。

