中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于单相机的空间目标相对位姿测量系统

支帅 丁国鹏 韩世豪 张永合 朱振才

Monocular camera-based relative position and orientation estimation system for space targets

ZHI Shuai, DING Guo-peng, HAN Shi-hao, ZHANG Yong-he, ZHU Zhen-cai

引用本文:
支帅, 丁国鹏, 韩世豪, 张永合, 朱振才. 基于单相机的空间目标相对位姿测量系统[J]. 中国光学, 2025, 18(5): 1111−1123. doi: 10.37188/CO.2025−0057
ZHI Shuai, DING Guo-peng, HAN Shi-hao, ZHANG Yong-he, ZHU Zhen-cai. Monocular camera-based relative position and orientation estimation system for space targets[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1111-1123. doi: 10.37188/CO.2025-0057

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2025−0057

文章编号 2097-1842(2025)05-1111-13

基于单相机的空间目标相对位姿测量系统

支 帅[1,2,3*], 丁国鹏[1,2*], 韩世豪[1,2], 张永合[1,2], 朱振才[1]
（1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201304;
2. 中国科学院卫星数字化技术重点实验室, 上海 201210;
3. 中国科学院大学, 北京 100049）

摘要: 为提高测量系统的稳定性及精度, 实现航天器超近距离高精度对接, 本文提出了一种基于单相机及合作靶标的相对位姿测量系统, 用于双星间相对位置及姿态的高精度测量。通过设计追踪星视觉相机及目标星 LED 合作靶标, 在双星距离为 50 米到 0.4 米的范围内, 实现了高精度的相对位姿测量。通过设计远近场 LED 靶标, 实现了相机与靶标间的协同工作, 保证在 50 米到 0.4 米的距离均能清晰成像; 根据设计的靶标特性, 提出了多尺度质心提取算法, 利用斜率一致性约束与间距比筛选, 在复杂光照下能稳定获取特征目标; 最后, 结合靶标几何约束的初值估计, 实现了目标星相对于追踪星的位姿解算, 为进一步提高测量精度, 引入非线性优化方法对位姿结果进行迭代优化, 有效降低了测量误差。试验结果表明, 系统测量精度由远及近逐渐提高, 在距离为 0.4 m 时, 位置测量精度优于 1 mm, 姿态测量精度优于 0.2°, 满足超近距离对接任务需求。本方案为空间在轨目标相对位姿测量提供了高精度、高稳定性的技术支撑, 具有重要的工程应用价值。

关 键 词: 单相机; LED 合作靶标; 多尺度质心提取; 非线性优化; 相对位姿测量
中图分类号: TP394.1;TH691.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2025-0057 **CSTR:** 32171.14.CO.2025-0057

Monocular camera-based relative position and orientation estimation system for space targets

ZHI Shuai[1,2,3*], DING Guo-peng[1,2*], HAN Shi-hao[1,2], ZHANG Yong-he[1,2], ZHU Zhen-cai[1]
(1. *Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201304, *China*;
2. *Key Laboratory of Satellite Digitization Technology*, *CAS*, *Shanghai* 201210, *China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *zhis@microsate.com*; *dinggp@microsate.com*

Abstract: To enhance the stability and accuracy of estimation systems for ultra-close high-precision docking of spacecrafts, this article proposes a system for high-precision estimation of relative position and orientation between two satellites. Through vision cameras on the chaser satellite and co-designed LED targets on the target satellite, precise relative pose measurement is achieved within 0.4−50 meters. To ensure clear imaging within the effective range, both far-field and near-field LED targets were designed. A multi-scale centroid ex-

收稿日期: 2025-03-31; **修订日期:** 2025-05-14
基金项目: “十四五”国家重点研发计划(No. 2024YFB3909400)
Supported by the National Key Research and Development Program during the 14th Five-Year Plan (No. 2024YFB3909400)

traction algorithm was proposed based on target characteristics, while slope consistency constraints and spacing ratio screening were employed to guarantee target feature acquisition under complex illumination conditions. Pose estimation utilizes target geometric constraints as initial values, employing iterative nonlinear optimization to refine results and effectively reduce measurement errors. Test results demonstrate progressively improving measurement accuracy from far to near distances. At 0.4 meters, position estimation achieves sub-millimeter precision while orientation estimation maintains sub-degree accuracy, meeting ultra-close-range docking requirements. This solution provides high-precision, high-stability technical support for relative position and orientation estimation between on-orbit space targets, demonstrating significant engineering application value.

Key words: monocular camera; LED cooperative targets; multi-scale centroid extraction; non-linear optimization; relative pose measurement

1 引 言

随着空间交会对接、在轨维修等技术的快速发展，在轨近距离测量在空间科学中占据越来越重要的位置。在保证精度的前提下，双目测量系统在甚短基线情况下，影响测量结果的稳定性及精度，相反，若基线较大又会导致系统近距离无法测量，且在保证精度的前提下对立体视觉测量系统的机械结构设计、加工等也提出非常高的要求。结构光测量难以获取高精度目标表面的三维数据，且存在测量范围小，数据处理量大，误差源多等问题，在空间环境下很难实现高精度实时定位。基于单相机的测量系统具有结构简单、成本低、数据更新率高及抗干扰能力强等优点[1-2]，同时，在复杂任务下具有较强的自主性，将在未来空间任务中起到越来越重要的作用。

目前，国内外针对空间目标测量技术展开了深入研究，也存在巨大的挑战。基于空间合作目标的视觉测量系统是应用最早也是应用最广泛的测量设备，具有代表性的是美国先进视频制导器（AVGS）[3]，2007 年成功完成 DARPA 进行的轨道快车试验中的自主交会对接任务。欧空局研制的视频测量系统 (VDM) 利用相机及合作靶标，实现 300 m~30 m 范围航天器间相对位姿测量。俄罗斯的光电测量系统 (OES) 最后几十米逼近阶段利用相机及合作靶标实现了相对位姿测量。日本接近敏感器 (PXS)[4] 在距离 0.3~10 m 利用相机及合作标识实现相对位姿的测量。在自主对接领域，单目视觉测量技术展现了巨大的应用潜力。Yan Kun[5] 在 2019 年开发了一种结合激光跟踪器和单目视觉的高精度姿态测量系统，在 3 m 距离，−25°到 25°范围内实现了小于 2°的误差。Mao Jiafa[6] 在 2020 年提出了一种使用单目视觉的目标距离测量方法，该方法数据需求少且能有效测量目标距离。2020 年，屈也频[7] 分析了单目视觉中方形和圆形目标的特征点提取，提出了一种角点提取算法，提高了测量的准确性。董永英[8] 在 2021 年则提出了一种改进的正交迭代算法，通过消除平移向量并使用平行透视模型加速计算过程。2024 年，Rondao D[9] 提出了一种基于人工智能的单目姿态估计算法，应用于太空自主加油任务中，通过相机实现精确的位置和姿态估计。

本文利用单相机及合作靶标实现 50 m~0.4 m 距离下，两航天器间相对位姿的测量。首先，针对 50 m~5 m 距离设计了远场相机及大光源靶标，针对 5 m~0.4 m 距离设计了近场相机及小光源靶标，在不同距离下协同工作。根据靶标 LED 间已知的安装位置，提出了多尺度质心提取算法，结合靶标约束，实现了靶标相对于相机的相对位姿解算，为提高测量精度，引入非线性优化方法对位姿结果进行迭代优化，有效降低了测量误差。

2 测量系统设计及坐标系定义

空间环境下，由于环境的不确定性及拍摄角度的变化，会导致相机的成像效果不佳，从而使测量不准确。因此，本文设计了具有一定发散角度的 LED 光源作为靶标，由于测量距离变化范围较大（0.4 m~50 m），单相机无法实现在 0.4 m−50 m 测

量距离内清晰成像, 因此设计了远场、近场两套成像系统, 如图 1(彩图见期刊电子版)所示。相机坐标系为$O_c-X_cY_cZ_c$, 坐标原点为相机光心位置O_c, Z_c轴为相机光轴, 垂直于成像平面, X_c轴与Y_c轴与成像平面的两个轴平行, 相机坐标系下的点表示为(x_c,y_c,z_c)。同时, 靶标根据距离设计为远场、近场靶标, 如图 2 所示。靶标坐标系为$O_t-X_tY_tZ_t$, X_t与Y_t轴分别平行于卫星安装面, Z_t垂直于卫星安装面, 相机与靶标根据任务要求协同工作[10-13]。

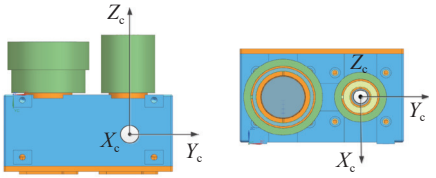


图 1　测量相机及坐标系定义

Fig. 1　Measurement camera and coordinate system definitions

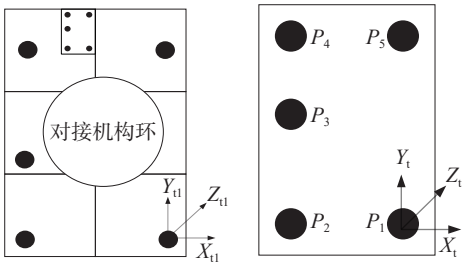


图 2　LED 靶标及坐标系定义

Fig. 2　LED targets and coordinate system definitions

建立可描述相机与空间目标的基准坐标系, 确定整个系统的测量坐标系, 即世界坐标系$O_w-X_wY_wZ_w$, 其坐标系下的点可表示为(x_w,y_w,z_w)。相机成像模型可用针孔成像模型表示, 如图 3 所示。其中, X_c与Y_c轴分别与图像 U 轴与 V 轴平行, 光轴与图像平面相交且垂直, P_{wi}为目标在世界坐标系下的坐标, $p(u_i,v_i)$为目标在图像上的图像点坐标。

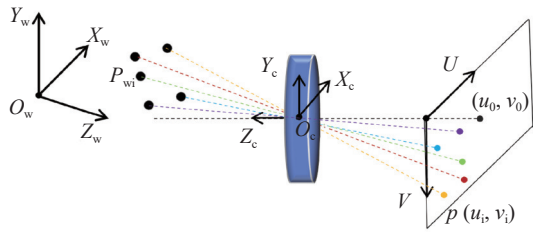


图 3　针孔成像模型

Fig. 3　Pinhole Optics model

由于(u,v)是以像素为单位的图像坐标系, 表示像素位于数组中的列数与行数, 需建立以物理单位表示的图像坐标系, 如图 4 所示。

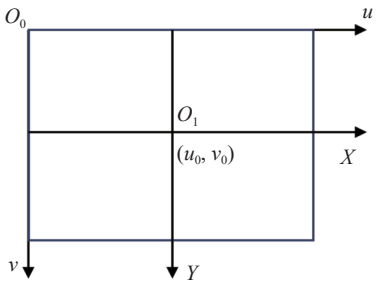


图 4　图像坐标系

Fig. 4　Image coordinate frame

在 XY 坐标系中, O_1为原点, 是相机光轴与图像平面的交点。该点一般位于图像中心, 在uv坐标系中坐标为(u_0,v_0)。像素在 X 轴与 Y 轴上的物理尺寸为dX、dY, 则图像中任一个像素在两坐标系下的坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\mathrm{d}X} & 0 & u_0 \\ 0 & \dfrac{1}{\mathrm{d}Y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} . \tag{1}$$

空间点 P 在世界坐标系与相机坐标系下的齐次坐标分别表示为$(x_w,y_w,z_w,1)^{\mathrm{T}}$和$(x_c,y_c,z_c,1)^{\mathrm{T}}$, 两者的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ \boldsymbol{o}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} , \tag{2}$$

其中, $\boldsymbol{RT}$为世界坐标系与相机坐标系间的旋转矩阵, 为 3×3 正交单位矩阵, $\boldsymbol{T}$为平移矩阵, 为三维向量。

空间点 P 在图像上的投影为 p, 为光心与 P 点连线与图像平面的交点, 有如下比例关系:

$$\begin{cases} X = \dfrac{fx}{z} \\ Y = \dfrac{fy}{z} \end{cases} , \tag{3}$$

其中(X,Y)为 p 点的图像坐标, (x,y,z)为空间点 P 在相机坐标系下的坐标, 用齐次坐标表示为:

$$s\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 s 为比例因子，将式 (1) 与式 (2) 带入式 (4)，得到世界坐标系下 P 点与成像点 p 间的关系：

$$s\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}= \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathrm{d}X} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{\mathrm{d}Y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ \mathbf{o}^{\mathrm{T}} & \mathbf{1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_{\mathrm{w}} \\ Y_{\mathrm{w}} \\ Z_{\mathrm{w}} \\ 1 \end{bmatrix}= \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ \mathbf{o}^{\mathrm{T}} & \mathbf{1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_{\mathrm{w}} \\ Y_{\mathrm{w}} \\ Z_{\mathrm{w}} \\ 1 \end{bmatrix}= \boldsymbol{M}_1\boldsymbol{M}_2P_W, \quad (5)$$

其中，$\alpha_x=f/\mathrm{d}X$、$\alpha_y=f/\mathrm{d}Y$分别为 u 轴和 v 轴上的尺度因子，$\boldsymbol{M}_1$为相机内参矩阵，$\boldsymbol{M}_2$为相机外部参数。

据此，完成相关坐标系及测量模型的建立，表征图像集合向三维场景集合的映射，即目标在成像坐标系到世界坐标系的转换。

3 单相机相对位姿测量关键算法

3.1 多尺度质心提取算法

多尺度质心提取算法通过融合交叉投影算法与加权质心法确定光斑质心，结合几何约束条件，即质心斜率一致性及距离比约束剔除干扰[14-15]，得到靶标光源的质心。首先，对输入灰度图像进行滤波去噪与均衡化，沿图像列方向进行投影运算，检测投影灰度值大于灰度阈值的坐标区间，确定光斑水平分布范围。在此区间范围内，沿行方向进行水平投影检测，确定该坐标区间内各光斑的纵坐标范围，经过竖直和水平投影检测，确定光斑外接四边形 4 个顶点坐标，确定光斑的分布范围。如图 5(彩图见期刊电子版)所示。最后，对每个候选光斑采取加权质心法确定中心位置，完成质心提取。

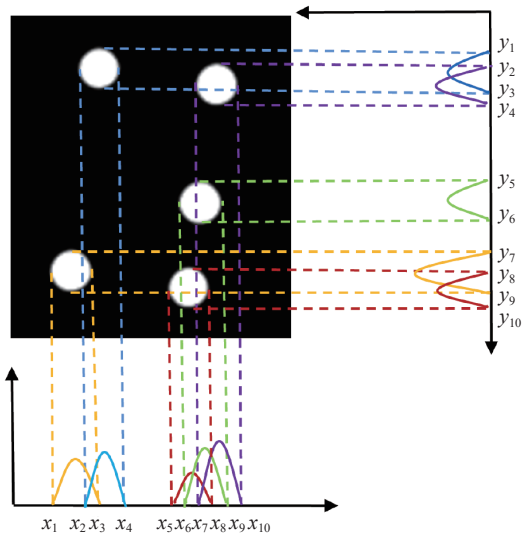


图 5 交叉投影法原理图

Fig. 5 Schematic diagram of cross-projection method

针对提取出的质心存在异常点干扰的问题，提出基于几何约束条件的筛选机制，利用斜率一致性约束，根据 LED 光源预设的线阵拓扑结构，相邻有效光斑满足斜率一致性条件，对于相邻质心p_i, p_j，其连线斜率偏差满足：

$$\left|k_{ij}-k_{\mathrm{design}}\right|<\Delta k_{\mathrm{th}}, \quad (6)$$

其中，k_{design}为理论设计斜率，Δk_{th}是经验阈值，为 0.05。

经过初筛后，进行二次筛选，利用 LED 光源间距的标称比值进行约束，进一步剔除异常点干扰。5 个质心(分别为p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)的相对位置如图 2 所示。间距比值满足：

$$\begin{aligned} &\left|\frac{\|p_1-p_2\|}{\|p_4-p_5\|}-R_{\mathrm{design1}}\right|<\Delta R_{\mathrm{th}} \\ &\left|\frac{\|p_1-p_5\|}{\|p_2-p_4\|}-R_{\mathrm{design1}}\right|<\Delta R_{\mathrm{th}} \\ &\left|\frac{\|p_3-p_2\|}{\|p_4-p_3\|}-R_{\mathrm{design2}}\right|<\Delta R_{\mathrm{th}}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中，R_{design1}=1，R_{design2}=1.4，均为设计的理论比值，ΔR_{th} = 5% 为容许偏差。

本文算法依据先验知识驱动，充分利用靶标设计的几何参数，通过“粗筛→精筛”两级架构平衡效率与精度，同时设定的阈值参数可进行动态调整，可适应性强。多尺度质心提取算法流程如图 6 所示。

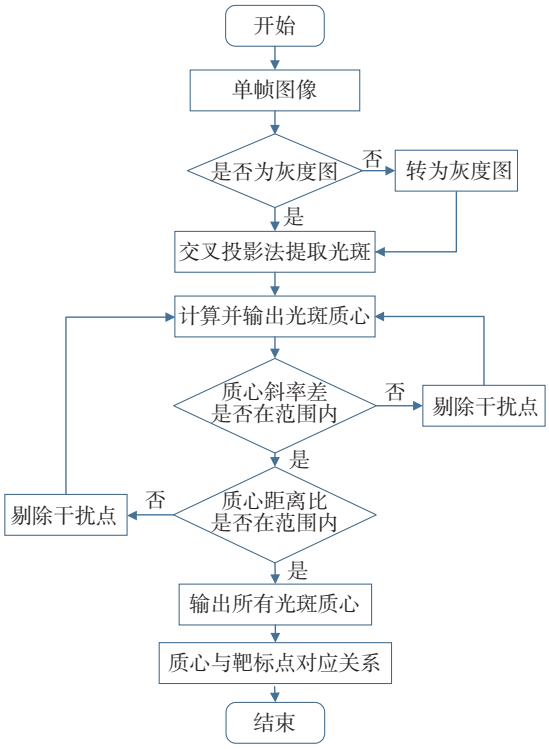


图 6　质心提取算法流程图

Fig. 6　Flowchart of centroid extraction algorithm

3.2　相对位置与姿态解算算法

空间目标在相机坐标系下的位置与姿态用平移矩阵$\boldsymbol{T}$与旋转矩阵$\boldsymbol{R}$来描述, 合作靶标位于目标星, 相机位于追踪星, 相对位置指目标坐标系原点相对于视觉相机坐标原点的平移矩阵, 相对姿态指目标坐标系相对于视觉坐标系三个轴的旋转角度, 如图 7(彩图见期刊电子版)所示。

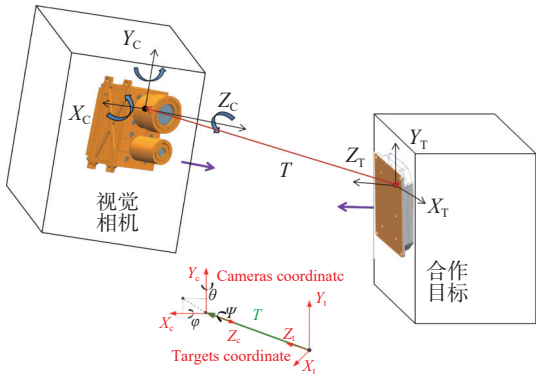


图 7　航天器间相对位姿示意图

Fig. 7　Schematic diagram of relative pose between spacecrafts

本节将介绍相对位姿解算算法原理。将世界坐标系定义在目标坐标系, 特征点在目标坐标系下的坐标表示为$p_{\mathrm{w}}=(x_{\mathrm{w}},y_{\mathrm{w}},z_{\mathrm{w}})$, 在相机坐标系下的坐标为$p_{\mathrm{c}}=(x_{\mathrm{c}},y_{\mathrm{c}},z_{\mathrm{c}})$, 则有:

$$p_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{R}p_{\mathrm{w}}+\boldsymbol{T}\quad,$$

同时有:

$$p_{\mathrm{c}}=d_n\boldsymbol{v}_n\quad,$$

其中d_n为特征点到其成像点间的距离; $\boldsymbol{v}_n$为成像点到特征点的单位方向向量, 则有:

$$\boldsymbol{R}p_{\mathrm{w}}+\boldsymbol{T}-d_n\boldsymbol{v}_n=0\quad.\tag{8}$$

位姿求解问题可以归结为利用最小二乘法求解最小值, 定义ε_k^2为重投影均方差[16], 优化目标是使重投影误差最小:

$$\varepsilon_k^2=\min\sum_{n-1}^{N}\|\boldsymbol{R}p_{\mathrm{w}}+\boldsymbol{T}-d_n\boldsymbol{v}_n\|^2\quad.\tag{9}$$

迭代步骤主要包括: 初值计算、非线性优化、收敛判定。首先进行初值计算, 基于靶标的几何约束, 求解初始d_n、$\boldsymbol{R}_0$和T_0, 其中$\boldsymbol{R}_0,T_0$为初始旋转矩阵与平移矩阵, 则位姿解算问题转化为求解d_n, 使其最小, 即:

$$\{d_n^*\}=\arg\min(d_n)\sum_{n=1}^{N}\|\boldsymbol{R}p_{\mathrm{w}}+\boldsymbol{T}-d_n\boldsymbol{v}_n\|^2\quad.\tag{10}$$

通过多次迭代精确计算d_n, 具体包括两步。第一步: 利用当前估算值d_n^k计算旋转矩阵和平移向量使重投影均方差最小, 即:

$$\{\boldsymbol{R}_k^*,\boldsymbol{T}_k^*\}=\underset{\boldsymbol{R}_k,\boldsymbol{T}_k}{\arg\min}\sum_{n=1}^{N}\|d_n^k\boldsymbol{v}_n-(\boldsymbol{R}_kp_{\mathrm{w}k}+\boldsymbol{T}_k)\|^2,\tag{11}$$

其中, $\boldsymbol{R}_k,\boldsymbol{T}_k$为迭代 k 次后的旋转矩阵和平移矩阵, $\{\boldsymbol{R}_k^*,\boldsymbol{T}_k^*\}$为 k 次迭代后的重投影方差, 第二步: 采用 Levenberg-Marquardt 算法对上述解算进行非线性优化, 每次迭代后都将确定新的估算值d_n^{k+1}:

$$d_n^{k+1}=\frac{(\boldsymbol{R}_kp_{\mathrm{w}k}+\boldsymbol{T}_k)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_n}{\boldsymbol{v}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_n}\quad.\tag{12}$$

根据计算出的d_n^{k+1}, 重新计算旋转矩阵和平移矩阵, 直至均方差满足收敛条件, 即将式(12)代入式 (9), 重新计算ε_{k+1}^2。$\Delta\varepsilon_{\mathrm{MAX}}^2$定义为允许的均方差范围, 如果:

$$\varepsilon_k^2-\varepsilon_{k+1}^2<\Delta\varepsilon_{\mathrm{MAX}}^2\quad,\tag{13}$$

则输出$\boldsymbol{R}_k,\boldsymbol{T}_k$; 否则返回继续计算$d_n^{k+2}$。循环计算, 直到式 (13) 满足收敛条件为止。一般收敛判

定设定阈值$\Delta\varepsilon^2_{\mathrm{MAX}}=1\times10^{-6}$。至此，完成了空间目标点（目标星）相对于相机（追踪星）所在坐标系的相对位置与姿态的解算。

通过目标点在世界坐标系及图像坐标系构建向量夹角来计算d_n的初值[17]，如图 8 所示，以点p_i,p_j为例。

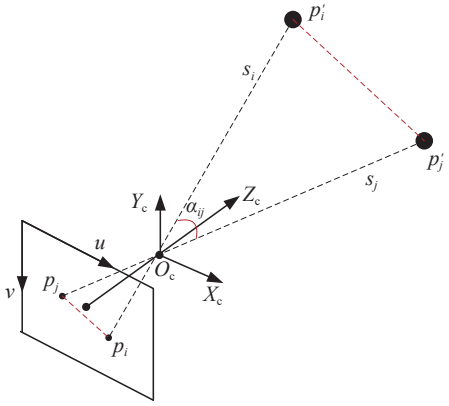


图 8 相对距离解算示意图

Fig. 8 Diagram of relative range solution

图 8 中，α_{ij}为特征点p_i，p_j过光心后成像的夹角，可表示为：$\cos\alpha_{ij}=\boldsymbol{v}_i\cdot\boldsymbol{v}_j$，其中$\boldsymbol{v}_i,\boldsymbol{v}_j$为单位向量，并有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}_i=\dfrac{1}{\sqrt{x_i^2+y_i^2+f^2}}[x_i,y_i,f]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{v}_j=\dfrac{1}{\sqrt{x_j^2+y_j^2+f^2}}[x_j,y_j,f]^{\mathrm{T}}\end{cases}. \tag{14}$$

在已知特征点图像坐标的前提下，相机坐标系 D 下的坐标可表示为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{P}_i=d_i\boldsymbol{v}_i\\ \boldsymbol{P}_j=d_j\boldsymbol{v}_j\end{cases}. \tag{15}$$

根据式 (15)，对于$\Delta O_cP_iP_j$，利用余弦定理可得：

$$p_{ij}^2=d_i^2+d_j^2-2d_id_j\cos\alpha_{ij}\ , \tag{16}$$

其中，d_i,d_j为待计算的特征点到成像面的距离。

采用 5 个特征点，则有 10 个关于$d_i(i=1\sim5)$的二次约束方程，即：

$$\begin{cases}p_{12}^2=d_1^2+d_2^2-2d_1d_2\cos\alpha_{12}\\ p_{13}^2=d_1^2+d_3^2-2d_1d_3\cos\alpha_{13}\\ \vdots\\ p_{45}^2=d_4^2+d_5^2-2d_4d_5\cos\alpha_{45}\end{cases}. \tag{17}$$

利用消元法对式 (17) 中的d_i进行求解，结合式 (14)~式 (16) 完成p_{ij}的求解[18-19]，进而计算特征点在相机坐标系下的坐标p_c，最后通过 SVD 分解法，计算两坐标系下的旋转矩阵和平移矩阵。

相对位姿算法流程如图 9 所示。

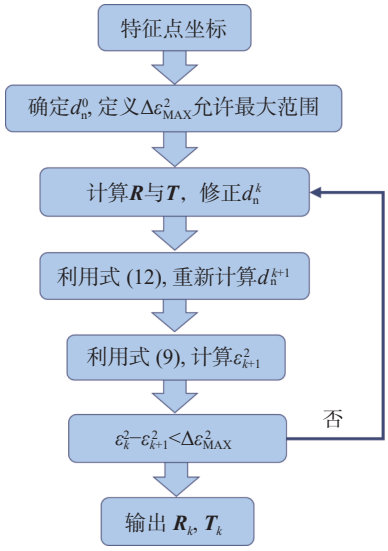


图 9 相对位姿解算算法流程图

Fig. 9 Flowchart of relative pose solution algorithm

经过上述计算可得到$\boldsymbol{R}_k,\boldsymbol{T}_k$，其中平移向量$\boldsymbol{T}_k=[x_{\mathrm{wc}},y_{\mathrm{wc}},z_{\mathrm{wc}}]^{\mathrm{T}}$，旋转矩阵$\boldsymbol{R}_k$为：

$$\boldsymbol{R}_k=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&r_{13}\\ r_{21}&r_{22}&r_{23}\\ r_{31}&r_{32}&r_{33}\end{bmatrix}, \tag{18}$$

旋转矩阵$\boldsymbol{R}_k$满足 6 个约束条件，有：

$$\begin{cases}r_{11}^2+r_{12}^2+r_{13}^2=1\\ r_{21}^2+r_{22}^2+r_{23}^2=1\\ r_{31}^2+r_{32}^2+r_{33}^2=1\\ r_{11}r_{21}+r_{12}r_{22}+r_{13}r_{23}=0\\ r_{21}r_{31}+r_{22}r_{32}+r_{23}r_{33}=0\\ r_{31}r_{11}+r_{32}r_{12}+r_{33}r_{13}=0\end{cases}. \tag{19}$$

同时，$\boldsymbol{R}_k$可采用绕$z-y-x$旋转的旋转角进行表示：

$$\boldsymbol{R}_k=\boldsymbol{R}_z(\psi)\boldsymbol{R}_y(\theta)\boldsymbol{R}_x(\varphi)\ ,$$

$$R_k=\begin{bmatrix}\cos\psi&-\sin\psi&0\\ \sin\psi&\cos\psi&0\\ 0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta&0&\sin\theta\\ 0&1&0\\ -\sin\theta&0&\cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0\\ 0&\cos\varphi&-\sin\varphi\\ 0&\sin\varphi&\cos\varphi\end{bmatrix},$$

于是有：

$$\begin{cases} r_{11}=\cos\psi\cos\theta \\ r_{12}=\cos\psi\sin\theta\sin\varphi-\sin\psi\cos\varphi \\ r_{13}=\cos\psi\sin\theta\cos\varphi+\sin\psi\cos\varphi \\ r_{21}=\sin\psi\cos\theta \\ r_{22}=\sin\psi\sin\theta\sin\varphi+\cos\psi\cos\varphi \\ r_{23}=\sin\psi\sin\theta\sin\varphi-\cos\psi\sin\varphi \\ r_{31}=-\sin\theta \\ r_{32}=\cos\theta\sin\varphi \\ r_{33}=\cos\theta\cos\varphi \end{cases}, \quad (20)$$

得到:

$$\begin{cases} \theta=\arcsin(-r_{31}) \\ \varphi=\arctan 2(r_{21}/\cos\theta, r_{11}/\cos\theta) \\ \psi=\arctan 2(r_{32}/\cos\theta, r_{33}/\cos\theta) \end{cases}. \quad (21)$$

据此, 完成目标相对于相机坐标系的相对位置与姿态的解算。

4　测量实验与结果

4.1　测量系统硬件构成

系统中光学成像组件包括近场相机及远场相机, 两相机探测器相同, 分辨率均为 1 280×1 024, 像元尺寸为 5.2 μm, 最大帧频为 60 fps。近场相机对角线视场角不小于 37.8°, 光学焦距为 12.5 mm, 光学畸变<0.1%; 远场相机对角线视场角不小于 14°, 光学焦距为 35 mm, 光学畸变<0.1%, 实物如图 10 所示。为适配微纳卫星平台, 满足平台小包络需求, 将两相机并行安置, 并装配在同一机械机构内。这样可以在减小安装误差的同时, 实现小包络需求。靶标组件由近场小光源及远场大光源(5 个) 组成, 由驱动器共同驱动, 实物如图 11 所示。

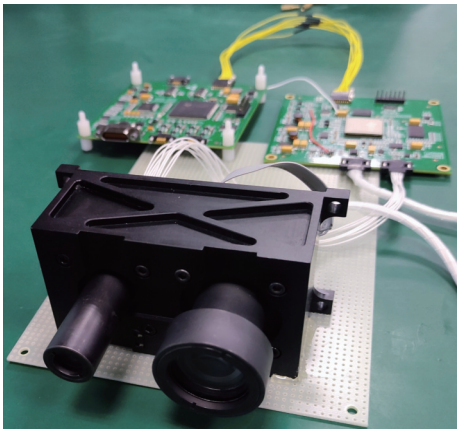


图 10　光学成像组件实物图

Fig. 10　Photograph of optical imaging assembly

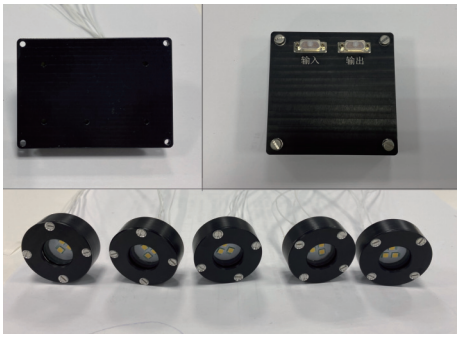


图 11　靶标组件实物图

Fig. 11　Photograph of cooperative target assembly

LED 靶标发射白光, 灯光发散角为 10°左右, 驱动电压恒定为 12 V。将追踪星固定, 将目标星置于行星车上, 通过移动行星车实现追踪星与目标星间的相对位姿测量, 实验温度为室温。当两航天器相距约 50 m 时, 开启远场相机, 对大光源靶标进行成像; 相距 5 m 左右时, 开启小光源靶标, 远场相机成像; 到 2 m 左右, 开启近场相机对小光源靶标成像。整个过程中, 持续输出两航天器间的相对位姿。图 12 为装星后相机组件与靶标组件实物图。

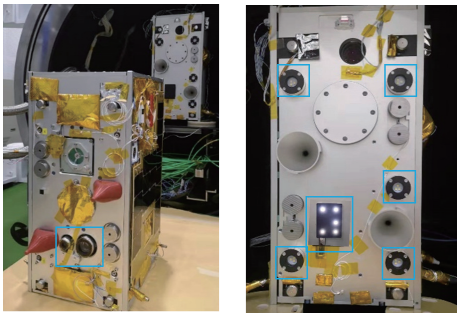


图 12　光学成像组件与靶标组件装星图

Fig. 12　Flight integration diagram of optical imaging assembly and cooperative target assembly

4.2　多尺度质心提取算法结果

可见光相机在空间成像时, 受多种复杂环境因素影响, 导致图像噪点多, 成像质量下降, 本文提出的多尺度质心提取算法能够有效解决以上问题。原始图像如图 13(a) 所示, 靶标左侧的杂散光是卫星表面隔热膜反光的结果, 有较强的影响。该干扰光源属于非均匀光, 且光强度与靶标本身发光强度相当。可见, 在该情况下, 利用本文方法仍能对靶标进行提取。首先, 通过交叉投影法及加权质心法对图像进行处理, 得到 15 个初始质心点, 其中包含反光点、噪点等, 提取出的

质心点明显多于光源靶标点，如图 13(b) 所示。利用斜率一致性约束进行初级筛选，将 15 个质心点降到 8 个，有效剔除了不满足斜率要求的杂散噪点，如图 13(c) 所示。对质心点进行排序后，再利用光源间距标称比值进行二次筛选，成功提取出 5 个靶标光源点，如图 13(d) 所示。至此完成整体提取。为便于显示，将质心点目标进行放大处理。

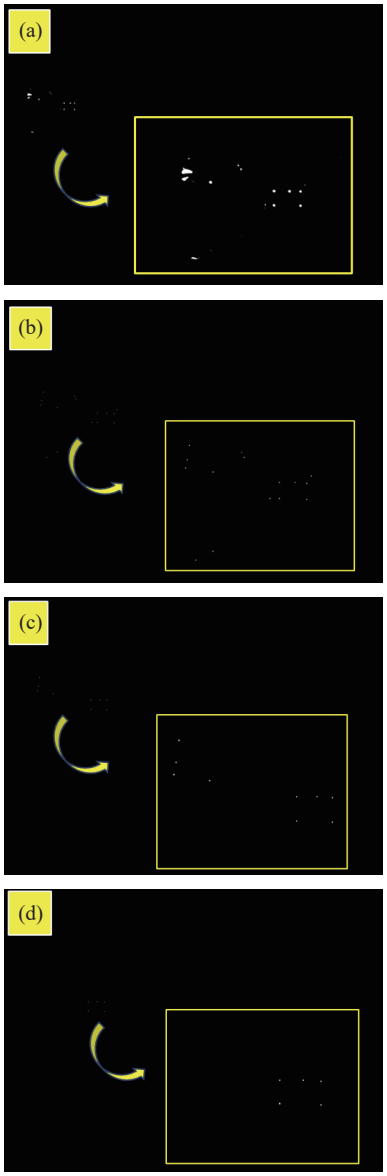


图 13 多尺度质心提取算法结果

Fig. 13 Multi-scale centroid extraction algorithm results

由图 13 可知，本文算法在有强反光等情况的影响下通过“粗筛→精筛”两级筛选能够有效提取靶标质心，对周边环境造成的反光及噪声等进行很好的抑制，同时能很好地平衡算法的效率与精度。

4.3 位姿解算结果

根据任务要求，为验证测量系统的稳定性，对带有光源靶标的目标星与带有相机的追踪星在不同距离下进行测试。选取相对位置分别为 50.6 m、20.7 m、5.6 m、1.7 m 和 0.4 m 的情况进行测试。实验过程中追踪星保持稳定，通过控制目标星的移动实现相对位姿测量。通过分析数据的标准差及均值，确定数据分布情况及准确度。

在双星大约距离 50 m 的情况下，对 300 组数据进行分析，结果如表 1 所示。表中 Std 为标准差，Std=$\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_{mv})}$，其反应数据在平均值附近的分布情况，标准差越小，越接近均值。Mean-Value 为数据均值，$x_{mv}=\sum_{i=1}^{n}x_i/N$，Max-v 为数据中的最大值，Min-v 为最小值。T_x, T_y, T_z 是两坐标系间的相对位置，φ，θ，ψ为相对旋转角度。

表 1 双星距离 50 m 时的相对位置与姿态测量结果

Tab. 1 Relative position and orientation estimation results at a distance of 50 m between two satellites

Parameters	Std	Mean-value	Max-value	Min-value
T_x/mm	1.2015	−1013.5044	−1010.9075	−1016.7402
T_y/mm	3.9683	−276.5156	−267.5542	−285.0395
T_z/mm	52.8736	−50780.0293	−50652.7305	−50832.2031
φ/(°)	0.081	−0.05188	−0.0176	−0.0672
θ/(°)	0.0154	0.07840	0.1064	0.0238
ψ/(°)	0.0010	−0.0046	−0.0027	−0.0079

两坐标系间相对位置的结果中，Z 轴数据波动最大，为 52.8736 mm，最大值与最小值之间的差值为 179.4726 mm，Y 轴和 X 轴的标准差分别为 3.9683 mm 和 1.2015 mm，最大值与最小值之间的差值分别为 17.4853 mm 和 5.8327 mm。在解算的相对姿态中 Z 轴最稳定，X 轴和 Y 轴稳定性控制在 0.1°以内，其中 Y 轴最大，与理论计算结果一致。

6 个参数的具体分布如图 14 所示。数据整体集中在均值附近，满足控制系统要求，姿态的稳定度较高。

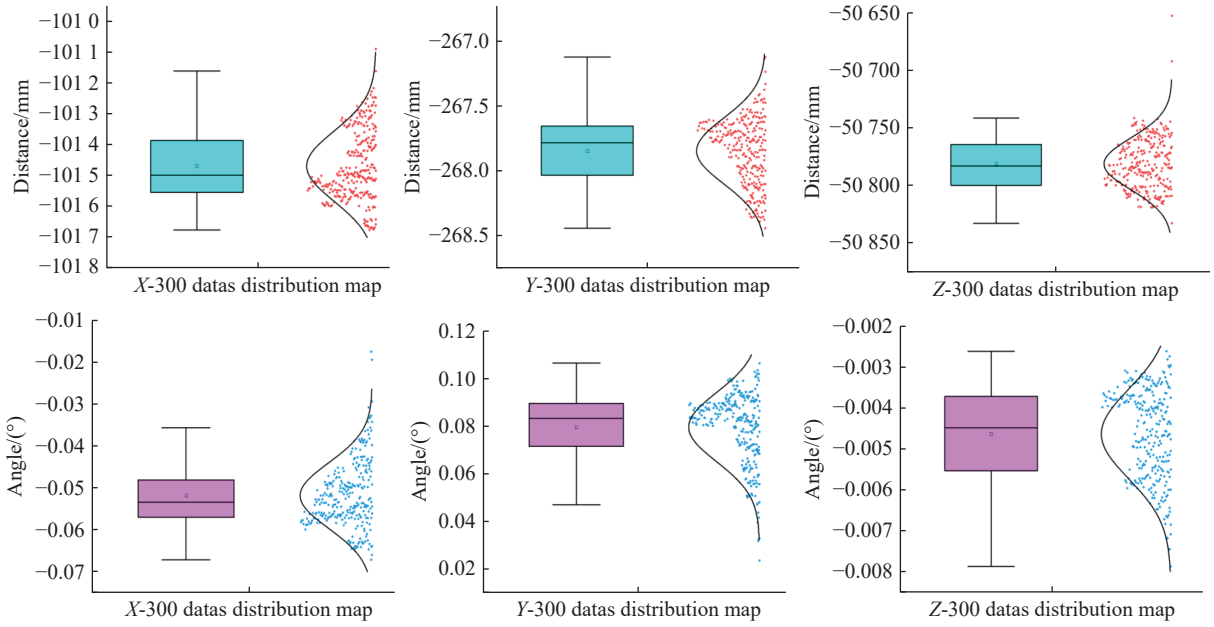


图 14　双星距离 50 m 时的相对位置与姿态数据分布图

Fig. 14　Relative position and orientation distribution map at 50 meters between two satellites

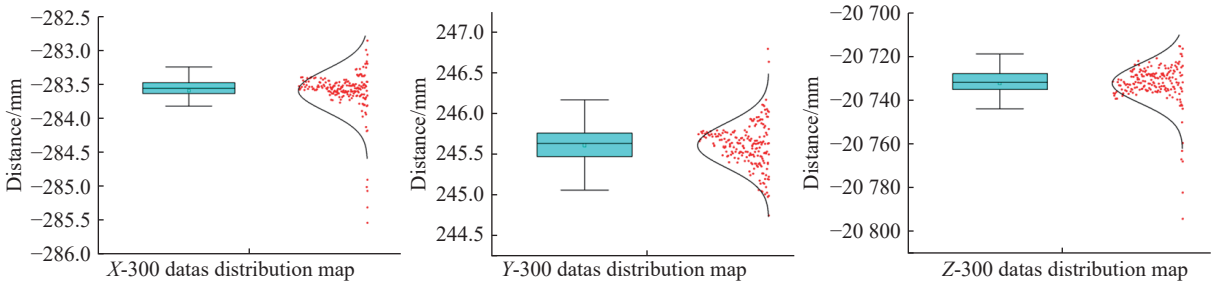
将目标星移至大约 20 m 左右的距离暂停对目标星的拍摄, 对其中任意的 300 组数据进行分析, 结果如表 2 所示。根据上文对视觉相机的定义, Z 轴为相机光轴, 垂直于成像平面, X 轴、Y 轴与成像平面平行。相对位置中, Z 轴的数据波动最大, 在 4.4 mm 左右, 最大值与最小值之间的差值为 27.3 mm, Y 轴和 X 轴的标准差均在 1 mm 以内, 最大值与最小值之间的差值分别为 2.04 mm 和 2.331 mm。在解算的相对姿态中 Z 轴最稳定, X 轴和 Y 轴的稳定度也控制在 0.02°以内。

表 2　双星距离 20 m 时的相对位置与姿态测量结果

Tab. 2　Relative position and orientation estimation at a distance of 20 m between two satellites

Parameters	Std	Mean-value	Max-vaule	Min-vaule
T_x/mm	0.3180	−283.5990	−283.2110	−285.5420
T_y/mm	0.2050	245.5650	246.7930	244.7530
T_z/mm	4.3640	−20730.6000	−20715.2000	−20742.5000
φ/(°)	0.0107	−0.0645	−0.0052	−0.0827
θ/(°)	0.0108	0.0595	0.0807	−0.0091
ψ/(°)	0.0011	−0.0079	−0.0054	−0.0111

6 个参数的具体分布如图 15(彩图见期刊电子版)所示。从图 15 可以看出数据整体集中在均值附近, 解算数据有效且合理, 算法稳定可靠, 能够提供稳定且精确的相对位置与姿态信息。



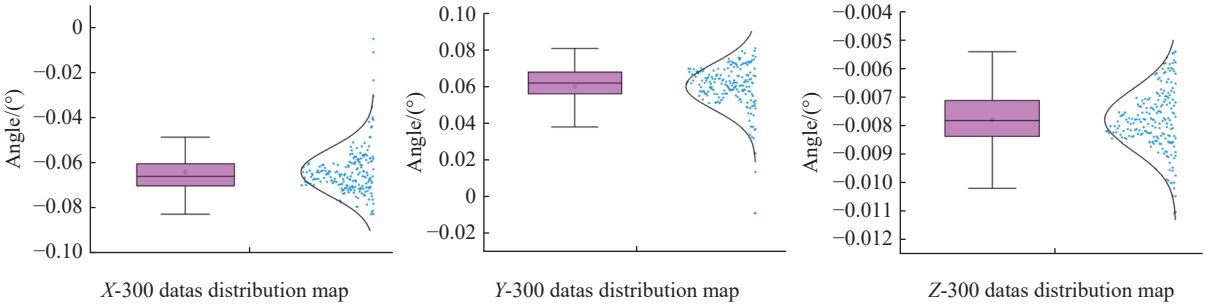


图 15　双星距离 20 m 时的相对位置与姿态数据分布图

Fig. 15　Relative position and orientation distribution map at 20 m between two satellites

将目标星移近至大约 5.6 m 处暂停进行拍摄，从中选择 300 组数据进行分析，结果如表 3 所示。根据表 3 可知，相对位置 Z 轴的数据波动可控制在 2 mm 内，最大值与最小值之间的差值为 15.711 mm，X 轴的标准差小于 0.2 mm，最大值与最小值之间的差值为 1.377 mm。相对姿态中三轴均很稳定。

表 3　双星距离 5.6 m 时的相对位置与姿态测量结果

Tab. 3　Relative position and orientation estimation at a distance of 5.6 m between two satellites

Parameters	Std	Mean-value	Max-v	Min-v
T_x/mm	0.1450	36.2800	36.5910	36.0940
T_y/mm	0.9140	118.6200	119.2630	117.8860
T_z/mm	1.6290	−5583.1500	−5576.1830	−5591.8940
φ/(°)	0.0230	−0.0080	0.0716	−0.0676
θ/(°)	0.0250	−0.0020	0.1047	−0.0843
ψ/(°)	0.0011	−0.0149	−0.0128	−0.0192

6 个参数的具体分布如图 16 所示。可见，数据整体集中在均值附近，同样，相对位置中 Z 轴相对波动较大，X 轴和 Y 轴整体稳定且集中，姿态的稳定度较高。

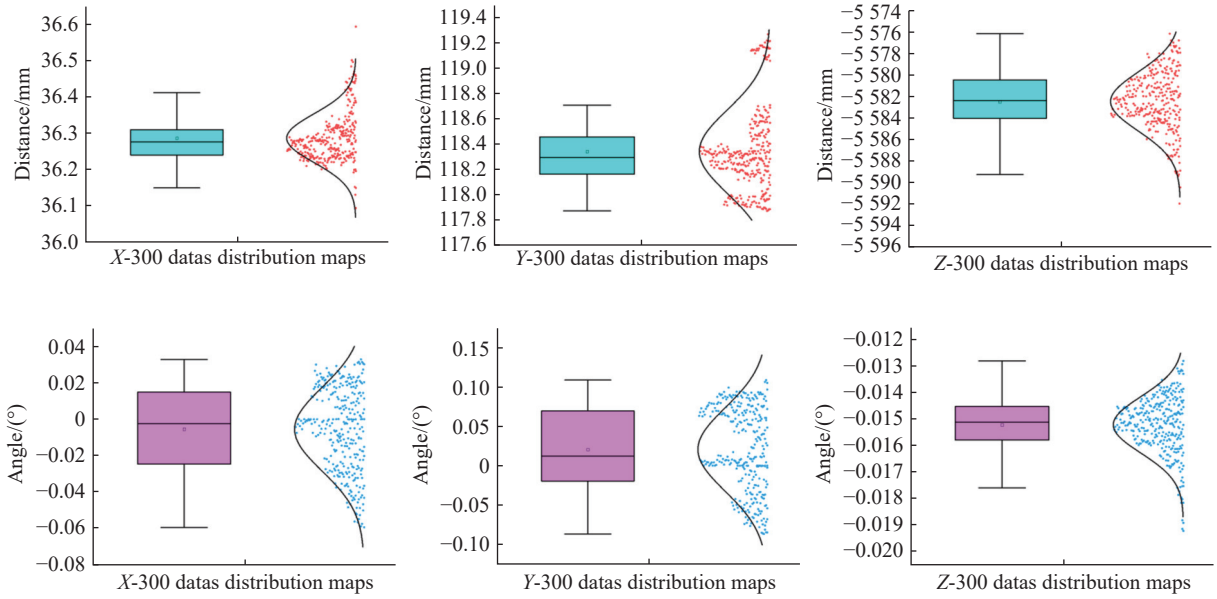


图 16　双星距离 5.6 m 时的相对位置与姿态数据分布图

Fig. 16　Relative position and orientation distribution map at 5.6 m between two satellites

再将目标星移近至大约 1.7 m 左右的距离暂停进行图像拍摄, 对其中任意的 300 组数据进行分析, 如表 4 所示。相对位置中, 三轴数据波动均在 0.3 mm 以内, Z 轴相对稳定度最高, 为 0.187 mm, 三轴最大值与最小值之间的差值分别为 1.081 mm, 0.796 mm 和 0.777 mm; 相对姿态中三轴均非常稳定。

6 个参数的具体分布如图 17 所示。数据整体集中在均值附近, 位置 X 和 Y 的方向在某一时段有一定偏移, 初步判断为某一时刻行星车的浮动造成的影响, 但整体偏移量在 0.5 mm 以内。

表 4　双星距离 1.7 m 时的相对位置与姿态测量结果

Tab. 4　Relative position and orientation estimation at a distance of 1.7 m between two satellites

Parameters	Std	Mean-value	Max-v	Min-v
T_x/mm	0.2270	11.8730	12.4530	11.6760
T_y/mm	0.2810	65.3370	65.7950	64.9990
T_z/mm	0.1870	−1654.8800	−1654.3430	−1655.4240
φ/(°)	0.0020	−0.0032	0.0078	−0.0029
θ/(°)	0.0036	−0.0691	−0.0792	−0.0574
ψ/(°)	0.0002	−0.0197	−0.0192	−0.0201

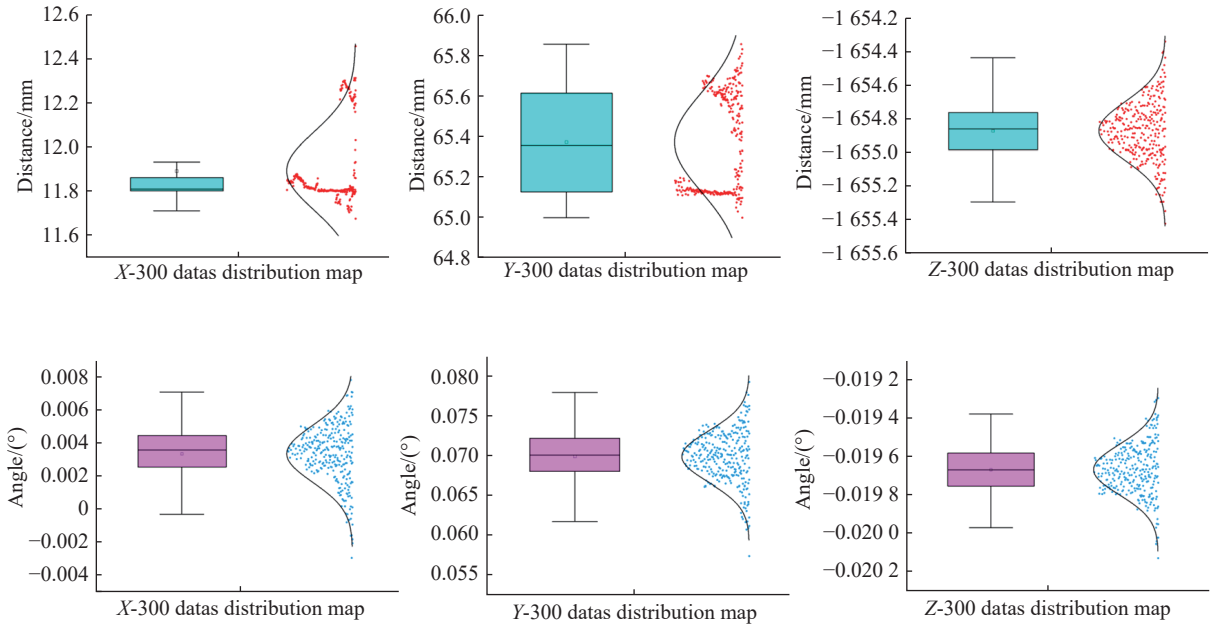


图 17　双星距离 1.7 m 时的相对位置与姿态数据分布图

Fig. 17　Relative position and orientation distribution map at 1.7 m between two satellites

再将目标星移近至大约 0.4 m 左右的距离暂停进行拍摄, 对其中任意的 300 组数据进行分析, 如表 5 所示。位置三轴的数据波动均在 0.1 mm 以内, 最大值与最小值之间的差值分别为 2.968 mm、0.078 mm 和 0.09 mm; 相对姿态中三轴均非常稳定。

6 个参数的具体分布如图 18 所示。数据整体仍集中在均值附近, 且相对位置和姿态的数据的稳定性较高, 0.4 m 情况下目标星相对于追踪星的相对位姿解算精度满足控制需求。

上述 7 组由远及近的测量数据结果可以看出, 追踪星与目标星间的相对位置和姿态随距离的接近精度逐渐提升, 在 0.4 m 时, 精度最高。5 组数据相对位置测量中, X 轴和 Y 轴的位置稳定度较高, Z 轴随距离的接近逐步提升; 在姿态测量中, Z 轴的稳定度一直较高, 其次是 X 轴, Y 轴相较其他两轴精度略低, 满足控制系统要求。

表 5　双星距离 0.4 m 时的相对位置与姿态测量结果

Tab. 5　Relative position and orientation estimation at a distance of 0.4 m between two satellites

Parameters	Std	Mean-value	Max-v	Min-v
T_x/mm	0.08	−58.63	−58.3670	−58.72
T_y/mm	0.003	45.41	45.478	45.40
T_z/mm	0.10	−405.79	−402.922	−405.89
φ/(°)	0.003	−0.041	0.0009	−0.043
θ/(°)	0.006	−0.184	−0.046	−0.07
ψ/(°)	0.0003	−0.0157	−0.007	−0.0161

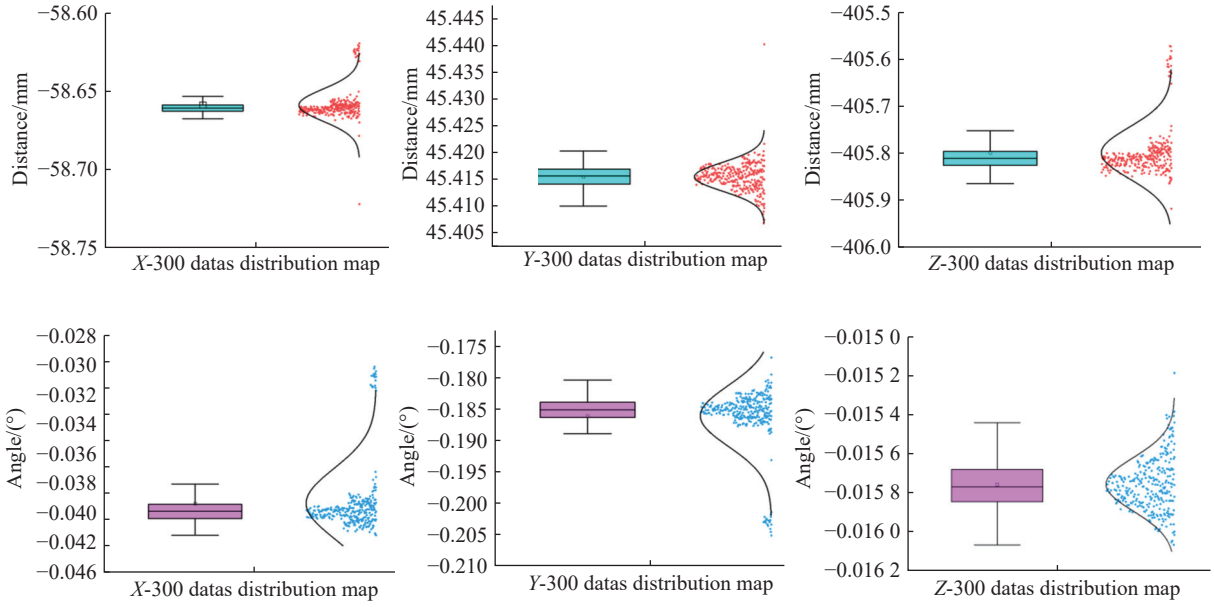


图 18　双星距离 0.4 m 时的相对位置与姿态数据分布图

Fig. 18　Relative position and orientation distribution map at 0.4 m between two satellites

5　结　论

本文围绕单相机与合作靶标构建的测量系统，开展空间超近距离相对位置与姿态的测量算法研究，重点对光源靶标、质心提取及位姿解算进行了详细的理论分析、算法设计及实验验证，得出以下结论：根据靶标设计特性，针对质心提取，提出了多尺度质心提取算法，在稳定提取质心的同时有效剔除杂散光等影响；针对位姿解算算法，利用设计约束解算初始位姿后，利用非线性优化完成高精度计算。实验结果表明，系统测量精度由远及近逐渐提高，在距离为 0.4 米时，三轴的位置测量精度优于 1 毫米，姿态测量精度优于 0.2 度，满足航天器超近距离对接的任务需求。本文所提出的系统及算法为空间在轨目标相对位姿测量提供了一种高精度、高稳定性的解决方案，具有重要工程应用价值。同时，系统的灵活设计也对其他多目标空间任务具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] ZHANG H F, WU J X, LIU D L, *et al*.. Research on rocket engine pose measurement technology based on monocular vision[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12934: 129340I.

[2] SEO C T, KANG S W, CHO M. Three-dimensional free view reconstruction in axially distributed image sensing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(8): 081102.

[3] HEATON A F, HOWARD R T, PINSON R M. Orbital express AVGS validation and calibration for automated rendezvous[C]. *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, AIAA, 2008.

[4] KAWANO I, MOKUNO M, KASAI T, *et al*.. Result of autonomous rendezvous docking experiment of engineering test Satellite-VII[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2001, 38(1): 105-111.

[5] YAN K, XIONG ZH, LAO D B, *et al*.. Attitude measurement method based on 2DPSD and monocular vision[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11338: 113382L.

[6] MAO J F, HUANG W, SHENG W G. Target distance measurement method using monocular vision[J]. *IET Image Processing*, 2020, 14(13): 3181-3187.

[7] 屈也频, 刘坚强, 侯旺. 单目视觉高精度测量中的合作目标图形设计[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1315001.
QU Y P, LIU J Q, HOU W. Graphics design of cooperative targets on monocular vision high precision measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1315001. (in Chinese).

[8] 董永英, 张高鹏, 常三三, 等. 一种基于单目视觉的空间目标位姿测量算法及其精度定量分析[J]. 光子学报, 2021,

50(11): 1112003.
DONG Y Y, ZHANG G P, CHANG S S, *et al*.. A pose measurement algorithm of space target based on monocular vision and accuracy analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1112003. (in Chinese).

[9] RONDAO D, HE L, AOUF N. AI-based monocular pose estimation for autonomous space refuelling[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 220: 126-140.

[10] 高豆豆, 董登峰, 邱启帆, 等. 面向激光跟踪测量的大范围高精度姿态测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(07): 976-986.
GAO Doudou, DONG Dengfeng, QIU Qifan, *et al*.. Large range automatic attitude measurement method for laser tracking measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(07): 976-986.

[11] SANSONE F, FRANCESCONI A, OLIVIERI L, *et al*. . Low-cost relative navigation sensors for miniature spacecraft and drones[C]. *2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, IEEE, 2015: 389-394.

[12] PIRAT C, ANKERSEN F, WALKER R, *et al*.. Vision based navigation for autonomous cooperative docking of CubeSats[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 146: 418-434.

[13] BUI M T, DOSKOCIL R, KRIVANEK V. Distance and angle measurement using monocular vision[C]. *2018 18th International Conference on Mechatronics*, IEEE, 2018: 1-6.

[14] 路荣, 张高鹏, 曹剑中, 等. 基于单目视觉的火箭回收高度测量技术研究[J]. 光学精密工程, 2024, 32(14): 2166-2188.
LU Rong, ZHANG Gaopeng, CAO Jianzhong, *et al*.. Research on measurement technology of rocket recovery height based on monocular vision[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(14): 2166-2188.

[15] 宋力夺, 姚凯男, 徐志强等. 全天时中高轨目标探测系统恒星移除[J]. 光学精密工程, 2024, 32(23): 3436-3445.
SONG Liduo, YAO Kainan, XU Zhiqiang, *et al*.. Stars removal of all day time mid-high orbit target detection system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(23): 3436-3445.

[16] 陈天择, 葛宝臻, 罗其俊. 重投影优化的自由双目相机位姿估计方法[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1400-1409.
CHEN T Z, GE B ZH, LUO Q J. Pose estimation for free binocular cameras based on reprojection error optimization[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1400-1409. (in Chinese).

[17] CAPUANO V, KIM K, HARVARD A, *et al*.. Monocular-based pose determination of uncooperative space objects[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 166: 493-506.

[18] ZHANG ZH, BIN W, KANG J H, *et al*.. Dynamic pose estimation of uncooperative space targets based on monocular vision[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(26): 7876-7882.

[19] PIAZZA M, MAESTRINI M, DI LIZIA P. Monocular relative pose estimation pipeline for uncooperative resident space objects[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2022, 19(9): 613-632.

作者简介:

支　帅(1989—), 女, 辽宁锦州人, 博士研究生, 2012 年于湖南大学获得学士学位, 2015 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 现于中国科学院微小卫星创新研究院, 主要从事智能测量系统研究等相关工作。E-mail: zhis@microsate.com