

## 空间非合作目标的三目立体视觉测量方法

束安<sup>1,2,3</sup>, 裴浩东<sup>1,3\*</sup>, 段慧仙<sup>3,4</sup><sup>1</sup>中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;<sup>4</sup>中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

**摘要** 针对在轨服务任务如何在近距离处获取空间非合作目标的相对位置和姿态的难题, 提出一种三目立体视觉测量方法。首先利用三台呈等边三角形布置的大视场可见光相机获取图像, 然后采用所提方法对特征点进行匹配; 接着采用 RANSAC 方法解算被测目标在世界坐标系下的位姿参数; 最后通过对非合作卫星模型的静止、位置移动和姿态转动进行实验。实验结果表明, 静止状态下的相对位置精度优于 2.2 mm, 相对角度测量精度优于 0.3°; 当模型位置移动时, 绝对位置精度优于 3 mm; 当模型姿态转动时, 相对位置精度优于 5.6 mm, 相对角度测量精度优于 1.7°, 说明所提方法可以改善双目立体视觉技术在测量角度大的区域易出现测量盲区、特征点定位误差和测量视场有限的不足。

**关键词** 机器视觉; 三目视觉; ORB; 非合作目标; 极线约束; 随机抽样一致性

中图分类号 TP391; V557

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0615001

## Trinocular Stereo Visual Measurement Method for Spatial Non-Cooperative Target

Shu An<sup>1,2,3</sup>, Pei Haodong<sup>1,3\*</sup>, Duan Huixian<sup>3,4</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;<sup>4</sup>Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

**Abstract** Aiming at the problem of how to obtain the relative position and posture of non-cooperative targets in space at close range for on-orbit service mission, a trinocular stereo vision measurement method is proposed. First, three large-field visible light cameras arranged in equilateral triangles are used to acquire images. Then, the proposed method is used to match the feature points. Second, the RANSAC method is used to calculate the pose parameters of the measured target in the world coordinate system. Finally, the static motion, position movement and attitude rotation of the non-cooperative satellite model are tested. Experimental results show that the relative position accuracy is better than 2.2 mm in the static state, and the relative angle measurement accuracy is better than 0.3°; when the model position moves, the absolute position accuracy is better than 3 mm; when the model posture rotates, the relative position accuracy is better than 5.6 mm, the relative angle measurement accuracy is better than 1.7°, indicating that the proposed method can improve the shortcomings of binocular stereo vision technology, such as measurement blind spots, mismatched feature points location and limited measurement field of view.

**Key words** machine vision; trinocular vision; oriented fast and rotated brief; non-cooperative target; epipolar

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-10-15; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: “十三五”国家重点研发计划高光谱红外基准载荷技术研究(Y8K22017N1)

\* E-mail: peihaodong@sina.com

constraint; random sample consensus

OCIS codes 150.0155; 150.1135; 330.1400

## 1 引言

当前,随着空间技术的迅速发展,面向非合作目标的在轨服务(OOS)任务越来越受到各国航天领域研究人员的重视,如空间碎片移除、在轨燃料加注与延寿和在轨维修升级等<sup>[1]</sup>。由于太空环境复杂,早期航天员出舱活动的在轨服务方式存在生理限制和巨大风险,并且随着国际上立体视觉技术的发展,以机械臂代替航天员进行空间在轨服务已成为一种必然趋势<sup>[2]</sup>,而视觉感知系统作为空间机械臂上最主要的传感器之一,其在航天领域具有重要的地位<sup>[3]</sup>。

长期以来,国际上关于立体视觉的研究主要集中在双目立体视觉上<sup>[4]</sup>,其设计思路是基于立体视差的原理,涉及了目标跟踪定位、姿态估计、三维重建和相机标定等研究领域的关键技术<sup>[5]</sup>,并已取得了大量的研究成果。然而,双目立体视觉也有其自身的局限性。立体视觉方法大多基于图像之间相似性的先验假设,而在实际工程这些假设仅近似成立,为此造成特征点的定位误匹配<sup>[6-7]</sup>。双目系统在某些形状复杂或测量角度大的地区容易存在测量“盲区”<sup>[8-9]</sup>。双目系统的精度依赖于景物深度及基线长度,基线越长,精度越高。当增加基线长度时,图像之间的透视形变也给相似性匹配带来难度<sup>[10]</sup>,而且双目立体视觉方法对于复杂场景中缺乏纹理或深度不连续的目标,匹配效果差<sup>[11]</sup>。另外,在 OOS 任务的近距离处,可以采用双目立体视觉的方法来识别非合作目标表面的对接环和显著标志点,从而解算目标航天器与追踪航天器之间的位姿关系<sup>[12]</sup>,但当目标到达超近距离或旋转角度过大时,则对接环不在相机视场中,所以双目系统难以满足实时位姿解算的需求。

基于上述问题,三目立体视觉测量技术逐渐发展起来。Yachda 等<sup>[13]</sup>提出了构建三目立体视觉系统模型的思想并利用三目系统提供额外的极线约束,用来解决由双目与单目存在候选匹配点的不确定性导致的误匹配,但要求三个摄像机的相对位置适当以便求得极线的交点。Haertel 等<sup>[14]</sup>采用了多相关系数和反三角测量方法并使用了三目视觉系统,检测管道内部的纹理特征并进行三维点云的提取和同名点的匹配,该方法较双目法更稳定。Kahmen 等<sup>[15]</sup>针对膝关节影像首先采用了视觉测程法(OV)对三目位姿进行求解,与 SLAM (Simultaneous

Localization and Mapping)算法对比,虽然 SLAM 算法在纹理丰富的场景效果较好,但对于稀疏场景效果较差,而三目 OV 法提供了强大的密集点云数据处理功能,在医疗领域具有较大优势。Xiong 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于多目立体视觉的自动三维重建方法,采用该方法对莫高窟的兵器雕塑和佛像进行了 3D 重建,可以极大地降低了误匹配率,提高了重建精度。李秀智等<sup>[17]</sup>提出了一种基于边缘线的三目立体匹配方法,通过对改进 Canny 边缘线使用三目系统中的额外极线进行约束,可以提高了算法的匹配正确率。钱萍等<sup>[18]</sup>阐述了三目视觉测量的原理,通过 MATLAB 软件对三目视觉的定位误差与双目视觉进行定量分析,证明了所提方法能够为航天器的相对位姿参数提供更准确的数据,并且测量系统更具安全性和可靠性。另外,美国国防部高级研究计划局(DARPA)提出了“地球静止轨道卫星机器人服务(RSGS)”计划,在抓捕非合作航天器的逼近阶段,采用了三目视觉测量手段来计算非合作目标的位姿,但发射任务已延期至 2022 年或 2023 年<sup>[19]</sup>。

综上所述,针对两航天器在近距离处难以使用双目系统进行位姿解算的问题,本文设计了一种三目立体视觉测量方法。首先采用三台视场为  $60^\circ \times 60^\circ$  和基线为 1.3 m 的可见光相机获取图像;接着基于 FAST (Features from Accelerated Segment Test)算子和 Harris 算子结合的 ORB (Oriented Fast and Rotated Brief)算法,快速检测三目图像的特征点,并采用三目交叉极线约束的方法对特征点进行匹配;然后采用随机抽样一致性(RANSAC)方法解算被测目标的位姿参数;最后通过对非合作卫星模型的静止、位置移动和姿态转动进行三组实验以验证所提方法的有效性。该方法为复杂场景或稀疏特征下的空间非合作目标相对位姿测量提供一种解决方案,采用三目交叉极线约束的方法可以解决双目立体视觉测量中基于图像相似度匹配的误匹配率较高的问题,从而得到较高的位姿解算精度。

## 2 主要方法

### 2.1 坐标系定义

为了方便解算空间非合作目标与三目立体视觉测量系统的位姿关系,建立图像坐标系( $o-uv$ )、目标坐标系( $O_p-X_pY_pZ_p$ )和左相机坐标系( $O_l-X_lY_lZ_l$ ),

如图 1 所示。

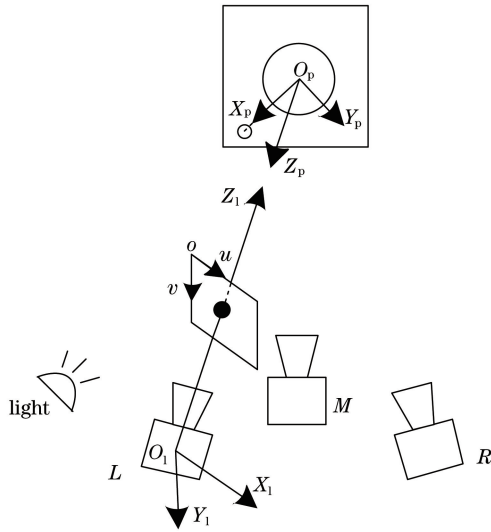


图 1 三目测量系统中坐标系的相互关系

Fig. 1 Interrelation of coordinate system in trinocular vision measuring system

图像坐标系( $o-uv$ ):相机采集的图像经过数模转换为数字图像,定义图像平面的左上角为原点 $o$ ,任一像素点的坐标 $(u, v)$ 表示该像素在图像中的列数和行数。

目标坐标系( $O_p-X_pY_pZ_p$ ):该坐标系建立在非合作目标的表面,目标坐标系的原点 $O_p$ 位于对接环的中心, $Z_p$ 轴为对接环平面并指向世界坐标系,原点 $O_p$ 指向规则标志点的为 $X_p$ 轴, $Z_p$ 轴和 $X_p$ 轴的叉乘为 $Y_p$ 轴。

左相机坐标系( $O_l-X_lY_lZ_l$ ):原点 $O_l$ 定义为左相机的光心, $X_l$ 轴和 $Y_l$ 轴分别与图像坐标系的 $u$ 轴和 $v$ 轴平行, $Z_l$ 轴为左相机的光轴并与图像平面垂直。由于世界坐标系与左相机坐标系之间只存在刚体变换,为了简化计算,所以定义三目立体视觉系统的左相机坐标系为系统的世界坐标系。

## 2.2 ORB 特征点的检测

视觉测量系统中,立体匹配的前提是对图像上的特征点进行提取。目前,常用的特征点提取方法有 Harris 算子、SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 算子、SURF (Speeded Up Robust Features) 算子和 FAST 算子等。由于 Harris、SIFT 以及 SURF 算法都是基于自相关矩阵响应值的方法,其是通过图像(加权)的灰度值平方和来计算,所以往往涉及到卷积运算,因此特征点提取的计算量较大<sup>[20-21]</sup>。

相比之下,FAST 算子的特征点提取准确、高效且实时性好。在速度方面,FAST 算子比 SIFT 和

SURF 等算子提升了一个数量级<sup>[22]</sup>,所以采用基于 FAST 算子和 Harris 算子结合的 ORB 特征点检测方法。首先使用 FAST 算子对特征点进行检测,然后采用 Harris 角点检测方法对特征点进行排序,最后选取效果最好的前  $N$  个特征点。实验中左图像的特征点检测结果如图 2 所示。从图 2 可以看到,由于目标表面纹理信息并不显著,特征点主要集中在边框部分和光照强度较大的区域。

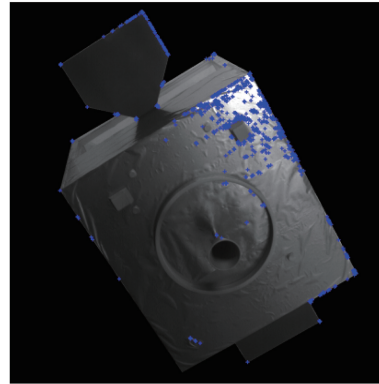


图 2 非合作目标结构的模拟图

Fig. 2 Simulation diagram of non-cooperative target structure

## 2.3 三目立体视觉的交叉极线约束

立体视觉测量的关键在于特征点的定位与匹配,其常受限于目标表面的纹理信息是否丰富<sup>[23]</sup>。对于太空环境下的非合作目标,其表面附着热控包覆层,纹理信息较为缺乏<sup>[24]</sup>,且在一定光照的条件下,不同姿态的变化都会造成目标表面的特征点亮度值变化。由于三个相机的位置不同,则同一特征点在三个相机中的特征信息差异较大,所以基于图像相似度的同名点匹配方法的误匹配率较高,而正确的同名点集少之又少。在双目立体视觉极线约束的基础上,引入第三台相机,则增加的极线约束可以有效提高图像特征点匹配的正确率。实验研究结果表明,对于局部匹配,三目立体视觉测量系统的误匹配率比双目系统减小了 50%,而运算量仅增加了 1/4<sup>[25]</sup>。

三目立体视觉系统的极线约束如图 3 所示,其中 $L_p$ 、 $M_p$ 和 $R_p$ 对应三台相机采集的图像平面, $O_l$ 、 $O_m$ 和 $O_r$ 分别为三台相机的光心位置, $P$ 为空间中的任意一点, $P$ 点在三个像平面的投影分别为 $p_1$ 、 $p_2$ 和 $p_3$ 。基于三目立体视觉的交叉极线约束准则设计三目特征点匹配方案,设计的步骤如下。

1) 计算 $p_1$ 在 $M_p$ 和 $R_p$ 图像平面上的极线 $l_{12}$ 和 $l_{13}$ ,表达式为

$$\begin{cases} l_{12} = F_{12} \times p_1 \\ l_{13} = F_{13} \times p_1 \end{cases}, \quad (1)$$



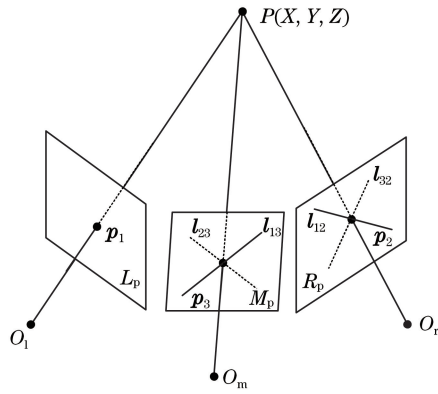


图 3 三目立体视觉系统的极线约束示意图

Fig. 3 Schematic of polar constraint in trinocular stereo vision system

式中： $F_{12}$  和  $F_{13}$  表示相机  $L$  分别和相机  $R$  与  $M$  之间的基础矩阵。

2) 在极线  $l_{12}$  上搜索候选匹配点, 标记为  $(p_2^{(1)}, p_2^{(2)}, p_2^{(3)}, \dots, p_2^{(m)}, \dots, p_2^{(k)})$ , 其中  $k$  为此候选匹配点集各子集的数量。

3) 在极线  $l_{13}$  上搜索候选匹配点, 标记为  $(p_3^{(1)}, p_3^{(2)}, p_3^{(3)}, \dots, p_3^{(n)}, \dots, p_3^{(s)})$ , 其中  $s$  为此候选匹配点集各子集的数量。

4) 对步骤 2) 和 3) 的候选匹配点集中的元素进行两两极线约束校验, 表达式为

$$p_3^{(n)} F_{23} p_2^{(m)} = 0, \quad (2)$$

$$p_2^{(m)} F_{32} p_3^{(n)} = 0, \quad (3)$$

式中： $F_{23}$  表示相机  $M$  和相机  $R$  之间的基础矩阵； $F_{32}$  表示相机  $R$  和相机  $M$  之间的基础矩阵。如果 (2) 式和 (3) 式成立, 则  $(p_1, p_2^{(m)}, p_3^{(n)})$  为一组匹配点。从 (2) 式和 (3) 式可以看到, 三目相机的交叉极线约束从立体几何的角度可以保证同名特征点在三目图像上几何位置的唯一性, 所以三目视觉系统的特征点匹配精度主要取决于两两相机之间的基础矩阵  $F_{12}$ 、 $F_{23}$  和  $F_{13}$ , 而且基础矩阵融合三目相机的内外参数<sup>[12]</sup>, 所以极大程度上决定相机的标定结果。为此, 实验采用目前较为成熟的张氏平面标定法<sup>[26]</sup>, 两两标定的重投影误差分别为 0.22, 0.12, 0.22 pixel。

采用基于汉明距离匹配和双目极线约束的双目立体视觉方法的双目匹配结果, 如图 4 所示。从图 4 可以看到, 匹配点数为 60 个, 由于左、右相机的光轴倾斜角度较大, 而且左、右相机的光轴与光源之间的夹角不一致, 所以同名点在左、右两幅图像上的特征差异较大, 容易产生误匹配点对; 双目极线约束也难以准确剔除, 而且双目视觉系统的误匹配率较

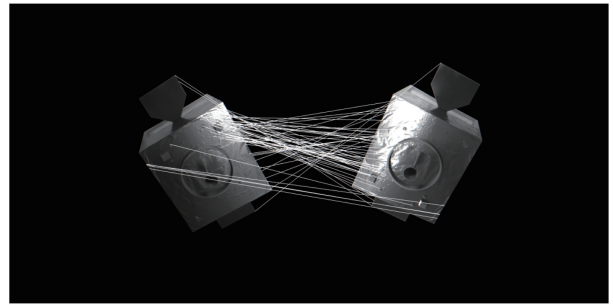


图 4 双目立体视觉的特征点匹配结果

Fig. 4 Feature point matching results of binocular stereo vision

高, 并且非同名点的匹配会导致原本正确的同名特征点无法配对, 所以匹配成功的点数较少。

采用交叉极线约束的方法得到  $L_p$  图像与  $R_p$  图像和  $M_p$  图像的特征点匹配结果, 如图 5 所示。从图 5 可以看到, 匹配点数为 161 个, 三目交叉极线约束可以保证目标特征点在三幅图像上位置的唯一性, 所以不受相机光轴倾斜的影响, 具有较密集的匹配点数据和较高的匹配精度。

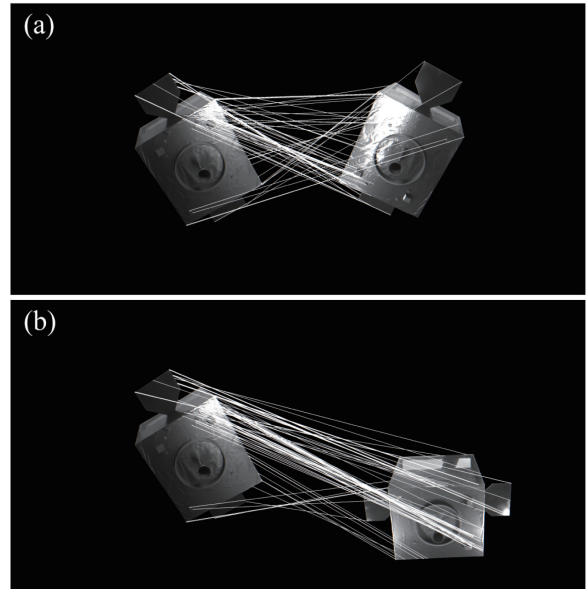


图 5 三目立体视觉的特征点匹配结果。

(a) 图像  $L_p$  和图像  $R_p$ ; (b) 图像  $L_p$  和图像  $M_p$

Fig. 5 Feature point matching results of trinocular stereo vision. (a) Image  $L_p$  and image  $R_p$ ; (b) image  $L_p$  and image  $M_p$

## 2.4 三目立体视觉位姿测量方法

完成三目立体视觉特征点的匹配后, 采用 RANSAC 方法<sup>[27]</sup> 解算被测目标在世界坐标系下的位姿参数, 该方法可以从一组包含“局外点(噪声)”的数据集中通过多次迭代来求解变换矩阵<sup>[28]</sup>, 具体计算过程如下。

1) 对于初始帧  $t_0$ , 采用 1.3 节的方法匹配特征点集  $Q_0$ , 根据立体视觉原理来解算其在全局坐标系下的三维坐标, 并计算  $Q_0$  在全局坐标系下的坐标, 从而建立 3D 空间点数组  $K_0$ 。

2) 对当前帧与上一帧的左图像进行汉明距离匹配, 得到前、后帧匹配点集  $Q_i$ , 并筛选出与  $Q_0$  共同的特征点, 建立 2D 图像点数组  $U_i$ , 建立 3D 空间点与 2D 图像点之间的一一对应关系。图 6 为某工况下前后帧的匹配结果, 共匹配上 44 个同名点。

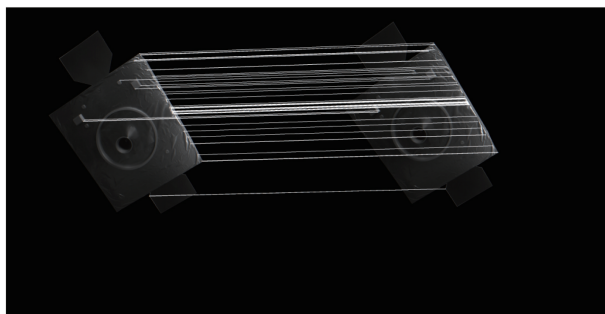


图 6 前、后帧特征点的匹配结果  
Fig. 6 Matching results of feature points in front and back frames

3) 采用 RANSAC 方法来解算当前帧在目标坐标系与世界坐标系之间的旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ 。计算过程:a. 首先随机从 3D 空间点数组  $K_0$  和 2D 图像点数组  $U_i$  得到的数据集中选取 4 对初始点对, 且任意三个点不共线, 通过左相机的内参矩阵来计算变换模型  $R'$  和  $T'$ ; b. 计算数据集中剩余的点集经过变换模型变换后的点与预匹配点间的距离误差, 若误差小于阈值  $d$ , 则加入内点集  $I$  中; c. 统计当前变换模型下的内点个数, 若大于阈值  $N$  ( $N$  设

为 30), 则更新为最大内点数, 同时此时的变换模型  $R'$  和  $T'$  为最优模型; d. 如果当前  $I$  的数量不满足阈值要求, 则重复过程 a. 和 b. 并开始迭代, 更新迭代次数  $i$ 。当多次随机采样计算后, 内点个数基本稳定时, 选择内点数最大且误差最小计算所得的变换模型参数作为最优的旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ , 即得到非合作目标在全局坐标系下的位姿参数。

### 3 分析与讨论

为了验证空间非合作目标的三目立体视觉测量方法的有效性, 选用项目组研制的  $60^\circ \times 60^\circ$  的大视场相机, 焦距为 10.35 mm, 像元尺寸为  $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$ , 探测器尺寸为 2048 pixel  $\times$  2048 pixel。相机摆放位置如图 7 所示。从图 7 可以看到, 相机呈等边三角形布置, 基线长度为 1.3 m, 为了扩大覆盖区域, 每个相机均向等边三角形中心倾斜  $18^\circ$ 。

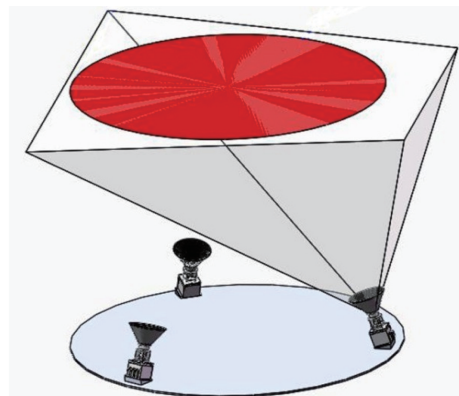


图 7 三目相机的安装示意图  
Fig. 7 Installation diagram of triocular camera  
在某一状态下三目相机获取的图像如图 8 所示。

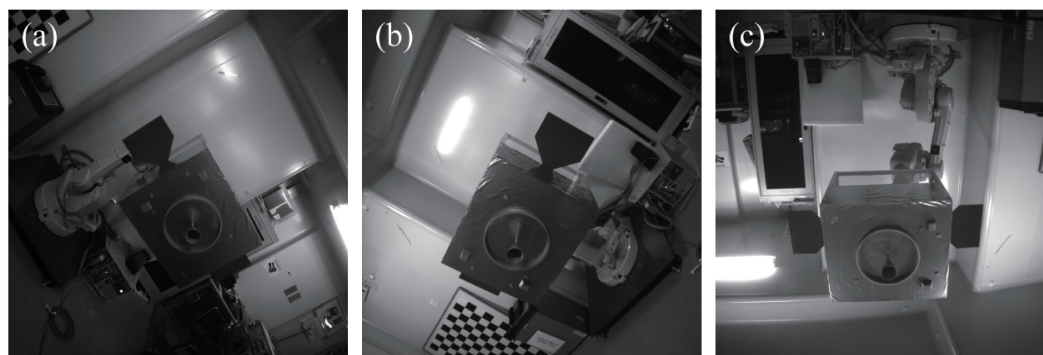


图 8 三目相机获取的实验场景图。(a) 相机 L 拍摄的图像; (b) 相机 R 拍摄的图像; (c) 相机 M 拍摄的图像  
Fig. 8 Experimental scene images obtained by triocular camera. (a) Image taken by camera L;  
(b) image taken by camera R; (c) image taken by camera M

#### 3.1 实验室环境下目标静止的相对位姿测量

实验室环境下, 非合作目标模型在距离三目相机约 1.6 m 处静止, 共采集 49 frame 图像, 通过前、

后帧的相对运动姿态对三目视觉测量方法的测量精度进行评价。该组实验下非合作目标模型的位姿变化曲线如图 9 所示。

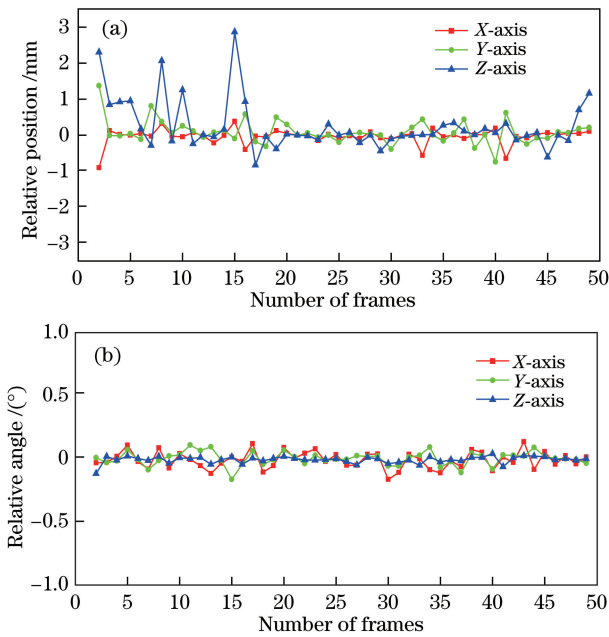


图 9 模型在不同情况下的位姿变化曲线。

(a) 相对位置; (b) 相对姿态

Fig. 9 Pose curves of model under different conditions.

(a) Relative position; (b) relative posture

静态实验中,实验室中的光线基本恒定,所以非合作目标图像中特征点的前、后帧亮度基本无变化。由于目标表面特征稀疏,采用 ORB 算法检测的图像特征点大多分布在目标模型的边缘,采用基于交叉极线约束的方法匹配三目图像的特征点,匹配点数约为 30~60 个,且匹配精度高,所以 RANSAC 方法解算目标的位置姿态精度相对于世界坐标系较高。从图 9 可以看到,目标图像在三轴上前、后帧的相对位置测量标准差分别为 0.604, 0.985, 2.102 mm, 相对角度测量标准差为 0.202°, 0.161° 和 0.081°, 静态实验下三目立体视觉测量算法的相对位置精度优于 2.2 mm, 相对角度测量精度优于 0.3°。

### 3.2 实验室环境下目标移动的位置测量

实验室环境下,使用控制台将非合作目标模型在距离相机约 1.6 m 处分别沿控制台的 X、Y 和 Z 轴以 50 mm/frame 的速度移动,控制台的运动精度为 0.02 mm,在不同方向下各采集 10 frame 图像。使用控制台的坐标系与世界坐标系之间的变换位置来计算前、后帧的相对移动距离,以控制台提供的运动距离为真值,对比三目立体视觉方法计算的相对移动距离并进行精度评价。非合作目标模型的位姿变化如表 1~3 所示。

表 1 非合作目标模型沿控制台 X 轴运动的测量结果

Table 1 Measurement results of non-cooperative target model moving along X-axis of console

Image	Measured distance /mm	Real distance /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
1	-	-	-	-
2	49.333	49.960	-0.627	-1.255
3	48.510	49.940	-1.430	-2.864
4	52.255	50.020	2.235	4.467
5	53.991	50.040	3.951	7.897
6	55.859	50.020	5.839	11.673
7	56.597	50.040	6.557	13.103
8	50.258	50.060	0.198	0.395
9	50.357	50.010	0.347	0.694
10	43.424	49.960	-6.536	-13.082
Average	51.176	50.006	1.170	2.340

表 2 非合作目标模型沿控制台 Y 轴运动的测量结果

Table 2 Measurement results of non-cooperative target model moving along Y-axis of console

Image	Measured distance /mm	Real distance /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
1	-	-	-	-
2	52.029	50.020	2.009	4.016
3	51.026	50.020	1.006	2.011
4	54.401	50.000	4.401	8.801
5	55.092	50.000	5.092	10.184
6	52.098	50.000	2.098	4.195
7	48.909	49.960	-1.051	-2.104
8	54.343	49.980	4.363	8.729
9	53.848	50.020	3.828	7.654
10	53.547	50.020	3.527	7.051
Average	52.810	50.002	2.808	5.615

表 3 非合作目标模型沿控制台 Z 轴运动的测量结果

Table 3 Measurement results of non-cooperative target model moving along Z-axis of console

Image	Measured distance /mm	Real distance /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
1	-	-	-	-
2	44.770	49.98	-5.210	-10.423
3	49.009	49.99	-0.981	-1.963
4	51.114	50.02	1.094	2.187
5	54.369	50.03	4.339	8.673
6	57.588	50.01	7.578	15.153
7	53.340	50.00	3.340	6.680
8	51.989	50.02	1.969	3.936
9	48.715	49.98	-1.265	-2.531
10	49.789	49.98	-0.191	-0.383
Average	51.187	50.00	1.186	2.372



从表 1~3 可以看到,当非合作目标模型沿着控制台的坐标轴移动时,三目相机在三轴解算移动距离的均值分别为 51.176,52.810,51.187 mm,相对误差分别为 2.340%、5.615%和 2.372%。由于实验室采用白炽灯来补光,所以目标在移动的过程中会导致前、后帧同名点的亮度值变化较大,从而前、后帧图像的匹配点数比静止状态少,最终影响 RANSAC 方法的位姿解算结果,导致部分帧之间的绝对误差较大,但最大绝对误差仍优于 8 mm,平均绝对误差优于 3 mm,解算精度较高。

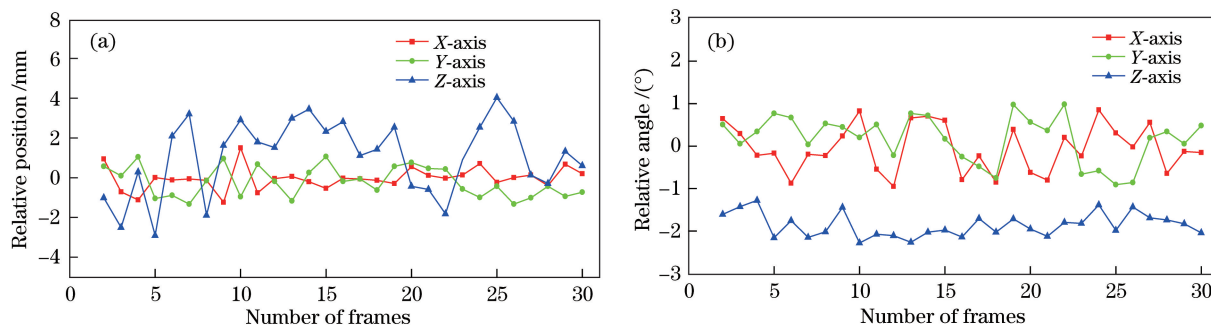


图 10 暗室太阳模拟的环境中模型在不同情况下的位姿变化曲线。(a)相对位置;(b)相对姿态

Fig. 10 Pose variation curves of model under different conditions in dark room solar model inverse environment.

(a) Relative position; (b) relative posture

从图 10 可以看到,目标模型在三轴前、后帧的相对位置测量标准差分别为 1.685,2.266,5.581 mm,相对角度测量标准差分别为 1.646°、1.613°和 0.821°,测量的转动角度均值为 -1.855°,与控制台提供的旋转角度相差 0.145°,解算精度较高。在目标卫星匀速转动的过程中,太阳模拟器的位置保持不变,光线与目标表面法向量的夹角为 30°,所以非合作目标同一特征点在前、后帧的灰度信息不一致。三目立体视觉的匹配精度相较于实验室环境下静态实验有所下降,但由于受到三目交叉极线方法的约束,RANSAC 方法的位姿解算精度较高,最大相对位置变化为 4.085 mm,最终相对位置精度优于 5.6 mm,相对姿态精度优于 1.7°。

## 4 结 论

针对航天领域中在轨服务任务获取空间非合作目标的相对位置和姿态,提出一种三目立体视觉测量方法。该方法可以在复杂场景或稀疏特征场景下检测三目图像的特征点,并采用三目交叉极线约束的方法对特征点进行匹配,最后通过 RANSAC 方法可以解算被测目标在世界坐标系下的位姿参数。实验结果表明,静止状态下的相对位置精度优于 2.2 mm,相对角度测量精度优于 0.3°;当模型位置

## 3.3 暗室太阳模拟的环境下目标转动的相对位姿测量

为了更接近空间场景,暗室太阳模拟的环境下对目标的相对位姿进行测量实验,即在暗室中采用太阳模拟器作为光源以模拟太阳光照,亮度为 0.1 个太阳常数,卫星模型在机械臂的控制下以 0.5°/s 的速度作逆时针匀速转动,三目相机以 4 s/frame 的速度采集图像,即卫星模型以 2°/frame 的速度作逆时针匀速转动,共采集 30 组图像,通过前、后帧的相对运动姿态对三目视觉测量方法的精度进行评价。非合作目标模型的位姿变化曲线如图 10 所示。

移动时,绝对位置精度优于 3 mm;当模型姿态转动时,相对位置精度优于 5.6 mm,相对角度测量精度优于 1.7°。该方法可以改善双目立体视觉技术在测量角度大的区域易出现测量盲区、特征点定位误差和测量视场有限的不足,采用三目交叉极线约束的方法可以解决双目立体视觉测量中基于图像相似度匹配的匹配率较低的问题。但在实验过程中,连续运动状态下目标模型的特征点亮度值变化较大,从而前、后帧图像的匹配点数和匹配精度相较于静止状态少,最终影响 RANSAC 方法的位姿解算结果,导致动态实验下的相对位姿精度低于静止状态。为了提升三目立体视觉测量方法的稳定性和适应性,继续对地面模拟系统进行深入研究,以及对精度影响因素进行定量分析以优化改进方法,这将成为今后继续研究的方向。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Guo X X. Development and trend analysis of foreign human spaceflight on-orbit servicing technology [J].

- Space International, 2016(7): 26-32.
- 郭筱曦. 国外载人航天在轨服务技术发展现状和趋势分析[J]. 国际太空, 2016(7): 26-32.
- [3] Hao Y M, Fu S F, Fan X P, et al. Vision perception technology for space manipulator on-orbit service operations [J]. Unmanned Systems Technology, 2018(1): 54-65.
- 郝颖明, 付双飞, 范晓鹏, 等. 面向空间机械臂在轨服务操作的视觉感知技术[J]. 无人系统技术, 2018(1): 54-65.
- [4] Zhu K Y, Xu X B, An X N, et al. Object detection and recognition method based on binocular [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 1120: 112094X.
- [5] Wang X, Wang X J. Multiple targets sparse matching for binocular vision positioning system with large field of view [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(7): 0726001.
- 王鑫, 王向军. 大视场双目视觉定位系统中多目标稀疏匹配[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0726001.
- [6] Xie Z X, Lu W J. A binocular matching algorithm based on similar image geometric features [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0508002.
- 解则晓, 陆文娟. 基于图像相似几何特征的双目匹配算法[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508002.
- [7] Gu Z, Su X Y. An algorithm based on adaptive support-weight and disparity adjustment for trinocular stereo-matching [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 734-738.
- 顾征, 苏显渝. 三目自适应权值立体匹配和视差校准算法[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 734-738.
- [8] Pu Y B. Research on camera calibration and image matching based on trinocular vision detection [D]. Nanjing: Southeast University, 2011.
- 浦雨彪. 基于三目视觉检测的摄像机标定与图像匹配技术的研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [9] Smirnov S, Gotchev A P, Hannuksela M. Comparative analysis of local binocular and trinocular depth estimation approaches [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7724: 77240H.
- [10] An Y J. Image matching for trinocular stereo vision system[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- 安妍璐. 面向三目立体视觉的图像匹配[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [11] Shu Z L, Ruan Q Q. Fast orthogonal trinocular stereo matching with symmetry multi-window [J]. Journal of Computer Research and Development, 2001, 38(10): 1229-1235.
- 舒志龙, 阮秋琦. 快速对称多窗口正交三目立体匹配[J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(10): 1229-1235.
- [12] Shu A, Pei H D, Ding L, et al. Binocular visual position and attitude measurement method for a spatial non-cooperative target [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1712003.
- 束安, 裴浩东, 丁雷, 等. 空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712003.
- [13] Yachda M, Kitamura Y, Kamachi M. Trinocular vision: new approach for correspondence problem [EB/OL]. [2020-09-20]. [https://www.researchgate.net/publication/243624889\\_Trinocular\\_vision\\_New\\_approach\\_for\\_correspondence\\_problem](https://www.researchgate.net/publication/243624889_Trinocular_vision_New_approach_for_correspondence_problem).
- [14] Haertel M E M, da Costa Pinto T L F, Gonçalves A A, Jr. Trinocular stereo system with object space oriented correlation for inner pipe inspection [J]. Measurement, 2015, 73: 162-170.
- [15] Kahmen O, Haase N, Luhmann T. Orientation of point clouds for complex surfaces in medical surgery using trinocular visual odometry and stereo ORB-SLAM2 [EB/OL]. [2020-09-20]. [https://www.researchgate.net/publication/343623541\\_ORIENTATION\\_OF\\_POINT\\_CLOUDS\\_FOR\\_COMPLEX\\_SURFACES\\_IN\\_MEDICAL\\_SURGERY\\_USING\\_TRINOCULAR\\_VISUAL\\_ODOMETRY\\_AND\\_STEREO\\_ORB-SLAM2](https://www.researchgate.net/publication/343623541_ORIENTATION_OF_POINT_CLOUDS_FOR_COMPLEX_SURFACES_IN_MEDICAL_SURGERY_USING_TRINOCULAR_VISUAL_ODOMETRY_AND_STEREO_ORB-SLAM2).
- [16] Xiong J, Zhong S D, Liu Y, et al. Automatic three-dimensional reconstruction based on four-view stereo vision using checkerboard pattern [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(5): 1063-1072.
- [17] Li X Z, Zhang G J. Trinocular stereo matching method based on edge segment [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(2): 22-26.
- 李秀智, 张广军. 一种基于边缘线的三目立体匹配方法[J]. 光电工程, 2007, 34(2): 22-26.
- [18] Qian P, Wang H N. A trinocular vision measurement based relative attitude and position determination algorithm for RVD between spacecrafts [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(6): 1575-1581.
- 钱萍, 王惠南. 基于三目视觉测量的航天器交会对接相对位姿确定算法[J]. 宇航学报, 2010, 31(6): 1575-1581.
- [19] Sandra E. DARPA's satellite-servicing robot to get another shot [EB/OL]. (2019-07-29) [2020-09-20]. <https://www.geospatialworld.net/news/darpa-satellite-servicing-robot-to-get-another-shot/>.
- [20] Zhang Q J, Hu X L, Ye B, et al. Binocular vision-based relative position and attitude determination between spacecrafts [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 156-161.
- 张庆君, 胡修林, 叶斌, 等. 基于双目视觉的航天器间相对位置和姿态的测量方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 156-161.
- [21] Xu X, Sun S Y, Sha Y J, et al. A method of infrared



- image mosaic based on improved RANSAC [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 111001.
- 徐鑫, 孙韶媛, 沙钰杰, 等. 一种基于改进 RANSAC 的红外图像拼接方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 111001.
- [22] Liu M. Binocular computer vision measurement and tracking research based on the ORB algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- 刘铭. 基于 ORB 算法的双目视觉测量与跟踪研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [23] Sun M Z. Research on local stereo matching algorithm for low texture area [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- 孙明珠. 面向低纹理区域的局部立体匹配算法研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [24] Sun C M, Yuan Y, Lü Q B. Modeling and verification of space-based optical scattering characteristics of space objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1129001.
- 孙成明, 袁艳, 吕群波. 天基空间目标光学散射特性建模与验证 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1129001.
- [25] Dhond U R, Aggarwal J K. Binocular versus trinocular stereo [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 13-18, 1990, Cincinnati, OH, USA. New York: IEEE, 1990: 2045-2050.
- [26] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C] // *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE, 1999: 666-673.
- [27] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [28] Wang P, Zhu R Z, Sun C K. Point cloud coarse registration algorithm with scene classification based on improved RANSAC [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 041510.
- 王鹏, 朱睿哲, 孙长库. 基于改进的 RANSAC 的场景分类点云粗配准算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 041510.