

文章编号 1004-924X(2017)05-1331-09

基于立体视觉的空间非合作航天器相对位姿自主测量

杨 宁*, 申景诗, 张建德, 贾 蕴, 王 桢
(山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264670)

摘要: 本文提出一种基于立体视觉的空间非合作航天器相对位姿自主测量方法, 用以解决在轨捕获中非合作航天器的相对位姿测量问题。该方法以航天器本体和星箭对接环作为识别特征, 识别过程无需人员参与; 同时, 提出一种基于空间几何约束的特征匹配方法, 运用空间几何约束引导匹配, 在完成匹配的同时可直接获取特征的三维信息, 实现特征匹配与重构的一体化; 最后, 利用空间向量对非合作航天器的相对位姿参数进行解算, 充分利用冗余信息, 以提高解算精度。实验结果表明, 在航天器本体尺寸为 280 mm、相对距离为 2 m 的条件下, 本文方法的姿态测量误差小于 1.5° , 位置测量误差小于 4 mm, 能够满足空间非合作航天器在轨捕获的相对位姿测量要求。

关键词: 在轨捕获; 位姿测量; 非合作航天器; 空间几何约束

中图分类号: TP391.4; V448.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1331

Autonomous measurement of relative attitude and position for spatial non-cooperative spacecraft based on stereo vision

YANG Ning*, SHEN Jing-shi, ZHANG Jian-de, JIA Yun, WANG Zhen

(Shandong Institute of Space Electronic Technology, Yantai 264670, China)

* Corresponding author, E-mail: yn3714@163.com

Abstract: To solve measurement problem of relative attitude and position for non-cooperative spacecraft in on-orbit capture, an autonomous measuring method for relative attitude and position of spatial non-cooperative spacecraft based on stereo vision was proposed. Main body of spacecraft and satellite-rocket docking ring were taken as recognition features in this method, and no staff was needed to participate in the recognition process; meanwhile, a feature matching method based on spatial geometry constraint was introduced. With the guidance of spatial geometry constraint, three-dimensional information of features was directly obtained at the time of completing matching to realize integration of feature matching and reconstitution; finally, the relative attitude and position of spacecraft were calculated according to spatial vectors, and calculation accuracy was improved via fully utilizing redundant information. Experimental result shows on condition of main body of spacecraft at 280 mm and relative distance at 2 m, attitude and position measurement error of the proposed method are less than 1.5° and 4 mm respectively, satisfying on-orbit capture measurement requirements of relative attitude and position for spatial non-cooperative spacecraft.

Key words: on-orbit capture; measurement of attitude and position; non-cooperative spacecraft; spatial geometry constraint

收稿日期: 2016-10-28; 修订日期: 2017-01-05.

基金项目: 国家高新技术研究发展计划资助项目 (No. 2015AA7041001)

1 引言

近年来,人类航天活动不断增加,每年发射的航天器也越来越多。随着时间的消逝,众多航天器中就会出现一些故障航天器以及废弃航天器,从而严重影响其他航天器的在轨运行安全。空间目标捕获技术是用于实施航天器在轨维护、废弃航天器清理等的技术,已成为航天领域的重点研究方向。空间目标捕获可分为合作目标捕获与非合作目标捕获两类。其中,合作目标捕获技术已相对成熟,并已成功应用于一些航天器在轨维护项目,如日本的 ETS-VII、美国的“轨道快车”等;而对于非合作目标捕获技术,目前还没有找到公开报道的该技术的在轨演示验证^[1-2],其还有待进一步研究。

空间非合作目标捕获的难点是如何在目标运动情况和空间结构未知的情况下精确获取目标的相对位置和姿态信息^[3-4]。国内外学者针对这一问题展开了大量研究。欧空局(ESA)开展的地球静止轨道恢复器(ROGER)项目通过绳系飞网或飞爪对废弃航天器进行抓捕,在抓捕过程中利用激光测距、视觉测量等手段获取非合作目标的相对位姿参数^[5]。日本国家信息和通信技术研究中心(NICT)提出通过双目立体视觉对非合作目标进行整体监控以及相对位姿测量的在轨服务系统(OMS)^[6]。美国国防高级研究计划局(DARPA)的 PHOENIX 计划采用三目立体视觉对逼近阶段的非合作航天器相对位姿参数进行测量^[7]。国内,张世杰等提出了一种基于单目视觉的非合作航天器相对位姿测量方法,但该方法需要提供非合作航天器的形状及尺寸信息^[8]。徐文福等提出了一种基于双目视觉的非合作航天器相对位姿测量方法,该方法直接以航天器太阳能帆板支架作为识别对象,极大地提高了航天器相对位姿测量的自主性,但在初始阶段仍需操作人员参与^[9-10]。

在前人的研究基础上,本文提出一种基于立体视觉的非合作航天器相对位姿测量方法。本文方法以航天器本体和星箭对接环作为识别特征,识别过程无需人的参与;同时,还提出一种基于空间几何约束的特征匹配方法,在完成匹配的同时可直接获取特征的三维信息,提高了特征匹配精度与三维重构效率,进而实现对空间非合作航天

器相对位姿参数的高精度高效测量。

2 空间非合作航天器的自主识别

2.1 空间非合作航天器特征分析

空间非合作航天器没有合作标志、运动状态也不可测,对空间非合作航天器的识别主要依靠其表面几何特征。通过对当前主要在轨航天器的调研可知,圆面特征和直线特征是其典型的几何特征^[11]。因此,空间非合作航天器可供测量和抓捕的对象主要有:

(1)航天器本体。航天器本体以圆柱体、长方体和多面体为主,其中,圆柱体为测量与抓捕提供了圆面特征,而长方体和多面体则可以提供直线特征。

(2)太阳能帆板。多数航天器都采用太阳能帆板进行供电,太阳能帆板一般为长方形,可以提供直线特征。

(3)太阳能帆板支架。太阳能帆板通过支架安装于航天器上,太阳能帆板支架多为三角形,同样可以为测量与抓捕提供直线特征。

(4)发动机喷嘴和星箭对接环。发动机喷嘴和星箭对接环都是圆环型,是典型的可被测量的圆面特征。

在本文中,假定待捕获的非合作航天器为一失效卫星,其本体形状为长方体,如图 1 所示。本文选取航天器本体和星箭对接环为识别特征说明空间非合作航天器的自主识别以及相对位姿参数测量问题。

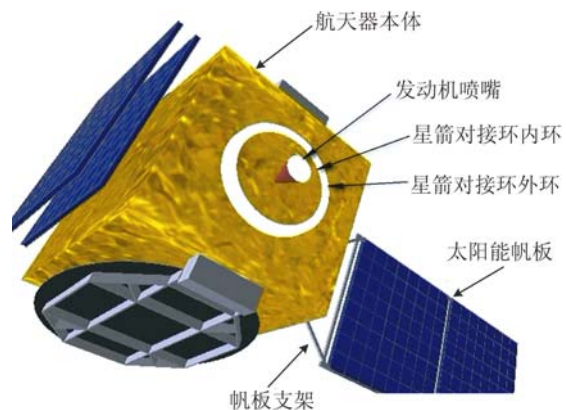


图 1 空间非合作航天器自主识别与测量模型

Fig. 1 Autonomous recognition and measurement model of non-cooperative spacecraft

2.2 空间非合作航天器特征识别

在对空间非合作航天器进行特征识别时,首先对航天器星箭对接环进行识别,星箭对接环为由内环和外环组成的同心圆,因此可以通过求取同心圆圆心实现对星箭对接环的识别;然后,对图像中直线特征进行提取,并以星箭对接环的圆心为约束,通过获得属于航天器本体的直线特征,实现对航天器本体的识别;最后,通过直线相交获得航天器本体顶点信息以用于航天器相对位姿参数的解算。

2.2.1 非合作航天器星箭对接环识别

空间非合作航天器星箭对接环为圆面特征,在图像中的投影为椭圆。椭圆的参数信息主要有长轴、短轴、长轴与 x 轴正方向的倾斜角、中心点坐标等,记为 $(a_e, b_e, \theta_e, x_e, y_e)$ 。本文采用最小二乘方法对椭圆进行拟合^[12-13],首先需获取椭圆的二次曲线表达式,然后再通过二次曲线表达式计算出椭圆的 5 个参数信息。

在获得了图像中椭圆中心坐标后,判断两个椭圆圆心之间的距离是否小于给定值 T_1 ,如果小于 T_1 ,则判定两者为同心圆。在此基础上,如果同心圆两圆心之间的距离小于给定值 T_2 ($T_2 < T_1$),则认为两圆心是重合的,取其均值作为同心圆圆心坐标;否则,计算过两圆心的直线与同心圆的 4 个交点,根据交比不变性精确求取同心圆的圆心坐标^[14]。同心圆圆心坐标求取流程如图 2 所示。

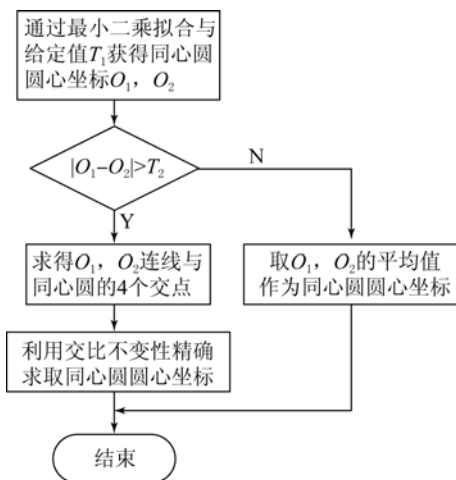


图 2 同心圆圆心坐标求取流程

Fig. 2 Flowchart of center extraction for concentric circles

2.2.2 非合作航天器本体识别

非合作航天器本体具有直线特征,因此,首先通过 Hough 变换提取图像中的直线特征^[15-16]。Hough 变换的基本思想是:利用图像空间与参数空间点-线的对偶性,将图像空间中的点变换到参数空间并进行累加,从而实现对图像空间中直线的检测,如图 3 所示。

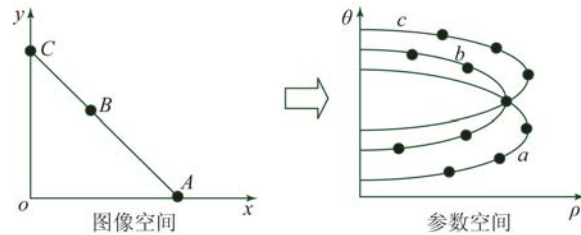


图 3 图像空间到参数空间的变换

Fig. 3 Transformation from image space to parameter space

在完成图像直线特征提取后,以星箭对接环圆心为约束,识别属于航天器本体的直线特征,主要包括以下步骤:(1)计算图像中星箭对接环圆心到各直线的距离,获取距离差小于给定阈值 $Dist$ 且直线数目不小于 4 的直线组;(2)在直线组中,选取两两夹角接近 90° 的 4 条直线,即为属于航天器本体的直线特征,通过直线两两相交获得航天器本体顶点坐标,用于相对位姿参数的解算。至此,已完成对空间非合作航天器的识别工作,在识别过程中无需操作人员的参与。

3 空间非合作航天器相对位姿解算

在获取非合作航天器本体顶点特征后,还需对左右图像中的顶点特征进行匹配,并完成三维重构,进而实现对非合作航天器相对位姿参数的解算。

3.1 空间非合作航天器特征匹配与重构

针对非合作航天器顶点特征匹配问题,本文将像平面内的极线约束推广到空间,提出一种基于空间几何约束的特征匹配方法。该方法在匹配过程中运用空间几何约束条件引导匹配,仅需对左右图像对中的一幅图像进行特征提取即可,提高了匹配效率与匹配精度,在完成匹配的同时还可直接获取特征的三维信息,实现了特征匹配与重构的一体化。

3.1.1 极线几何关系

在双目立体视觉系统中,将左右摄像机同一时刻获取的两幅图像分别记为 I_l 与 I_r ,如图 4 所示。如果 p_l 、 p_r 分别为同一空间点 P 在两幅图像上的投影,则称 p_l 与 p_r 为对应点。对应点的匹配与极线几何密切相关。

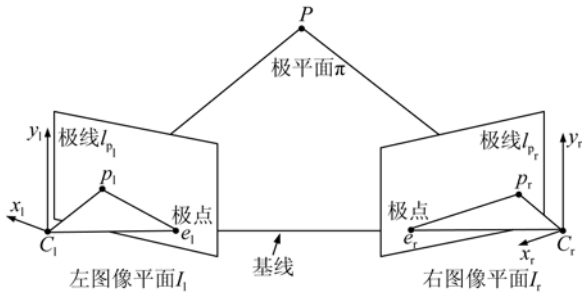


图 4 双目立体视觉中的极线几何关系

Fig. 4 Epipolar geometry relationship in stereo vision

在图 4 中,称直线 $\overline{e_l p_l}$ 为图像 I_l 上对应于 p_r 点的极线,直线 $\overline{e_r p_r}$ 为图像 I_r 上对应于 p_l 点的极线。在图像 I_r 内, p_l 的对应点必然位于 p_l 在图像 I_r 的对应极线上,即 p_r 必定位于直线 $\overline{e_r p_r}$ 上;反之亦然。在双目立体视觉中,该约束称为极线

约束^[17],其将对应点匹配搜索空间从整幅图像缩小到特定直线上,极大地提高了匹配效率。

3.1.2 立体视觉重构模型

在双目立体视觉中,基于空间交汇原理进行三维重构,如图 5 所示^[18-20]。假定左摄像机坐标系与世界坐标系 $O-xyz$ 重合,右摄像机坐标系为 $o_r-x_r y_r z_r$,左右摄像机图像坐标系分别为 $O_l-X_l Y_l$ 与 $O_r-X_r Y_r$,有效焦距分别为 f_l 与 f_r 。

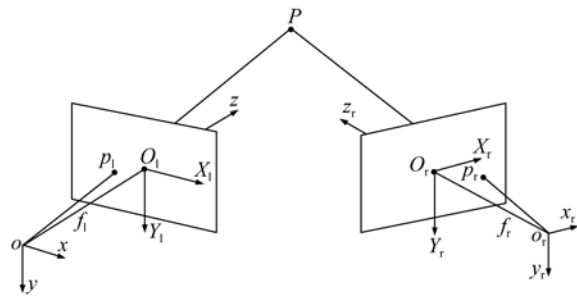


图 5 双目立体视觉三维重构原理

Fig. 5 3D reconstruction principal of stereo vision

对于 $O-xyz$ 坐标系中的空间点,两摄像机对应像点之间有如下关系:

$$\rho \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r r_1 & f_r r_2 & f_r r_3 & f_r t_x \\ f_r r_4 & f_r r_5 & f_r r_6 & f_r t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z X_l / f_l \\ z Y_l / f_l \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

于是,空间点三维坐标可表示为:

$$\begin{cases} x = z X_l / f_l \\ y = z Y_l / f_l \\ z = \frac{f_l (f_r t_x - X_r t_z)}{X_r (r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r (r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} = \frac{f_l (f_r t_y - Y_r t_z)}{Y_r (r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r (r_4 X_l + r_5 Y_l + f_l r_6)} \end{cases} \quad (2)$$

3.1.3 基于空间几何约束的特征匹配与重构

由 3.1.1 节可知,极线约束是一种像平面内的几何约束关系。在本节中,将像平面内的极线约束推广到空间,并提出一种基于空间几何约束的特征匹配方法。该方法摒弃了传统的基于像平面的匹配策略,而是采用基于像-物空间关系的匹配策略。下面首先给出空间几何约束的概念。

在双目立体视觉中,沿着左图像(右图像)像点的光线通过升降空间点的 z 坐标,把相关空间点投影到右图像(左图像)上,从而得到一系列像点的轨迹,文中称之为空间投影曲线,如图 6 所示。空间

投影曲线与 3.1.1 节中极线的性质类似。

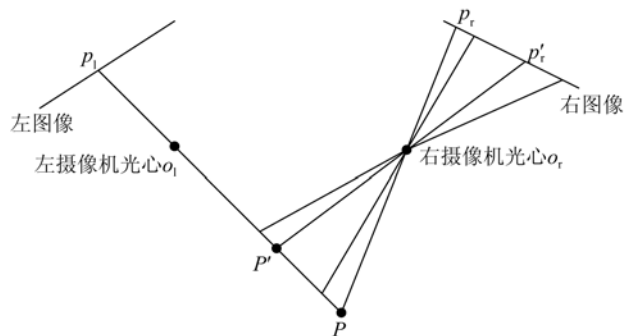


图 6 空间几何约束示意图

Fig. 6 Demonstration of spatial geometry constraint

左右摄像机图像构成立体像对 I_l-I_r , p_l 为左图像 I_l 上的一个给定特征点,根据透视投影模型可知,光线 $\overline{op_l}$ 一定通过 p_l 在空间中的对应点 P (o 表示左摄像机光心)。对于像点 p_l ,假设其对应空间点 P 的三维坐标中 z 的估计值为 z_0 ,则根据式(2)可得 P 点的初始空间三维坐标为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 。再假设 p_l 点给定 z 值的容差为 Δz ,可得光线 $\overline{op_l}$ 上的两个空间点 P_{\min} 和 P_{\max} ,则像点 p_l 所对应的空间点 P 一定位于线段 $\overline{P_{\min}P_{\max}}$ 上。接下来通过相关摄像机标定参数将线段 $\overline{P_{\min}P_{\max}}$ 投影到右图像 I_r 上,即可得到左图像中的点 p_l 在右图像中的空间投影曲线线段,则点 p_l 在右图像 I_r 中的匹配点一定位于该线段上,如图7所示。

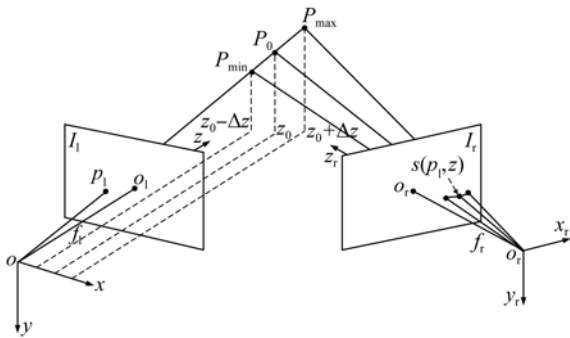


图7 基于空间几何约束的特征匹配

Fig.7 Feature matching based on spatial geometry constraint

在左图像中,选取以 p_l 为中心的匹配窗口 W 。然后,根据上述空间几何约束,获得 p_l 在右图像中的相应匹配窗口。将点 p_l 在左图像 I_l 和右图像 I_r 中相对应的匹配窗口之间的相似性测度定义为归一化相关系数 NCC,如式(3)所示:

$$NCC(p_l, z) = \frac{\sum_{s \in W} (I_l(s) - \bar{I}_l) \times (I_r(s(z)) - \bar{I}_r)}{\sqrt{\sum_{s \in W} (I_l(s) - \bar{I}_l)^2} \sqrt{\sum_{s \in W} (I_r(s(z)) - \bar{I}_r)^2}}, \quad (3)$$

其中: $\bar{I}_l = \frac{1}{m \times n} \sum_{s \in W} I_l(s)$, $\bar{I}_r = \frac{1}{m \times n} \sum_{s \in W} I_r(s(z))$, $I_l(\cdot)$ 和 $I_r(\cdot)$ 分别表示左图像和右图像中像点的灰度, m, n 为匹配窗口 W 的大小, s 为位于左图像匹配窗口 W 中的一个像点, $s(z)$ 为右图像中根据空间几何约束获得的相应匹配窗口中的像点, $s(z)$ 的相应灰度值可以通过在右图像 I_r 中进行双线性内插获得。

由式(3)可以看出,这里定义的 NCC 不同于传统的归一化相关系数,它是像点 p_l 和其空间 z ($z \in [z_0 - \Delta z, z_0 + \Delta z]$) 坐标的函数。由此,给定左图像上的特征点 p_l 和其相应的空间 z 坐标的概略值 z_0 和 Δz ,使 NCC 达到最大值时的 z 正是给定点 p_l 的正确空间 z 坐标,同时也得到了 p_l 在右图像上的最佳匹配位置。点 p_l 在右图像上的搜索范围由初始容差 Δz 确定。为保证匹配的可靠性,在匹配过程中为归一化相关系数 NCC 设定一定的阈值,只有匹配像对的 NCC 大于给定的阈值才认为该匹配像对是一对正确的匹配,否则,认为该匹配像对是误匹配,抛弃该匹配像对。

在获得像点 p_l 正确的空间 z 坐标以后,根据式(2)即可得到像点 p_l 相应的空间三维坐标。从上述过程可以看出,本文方法可以在完成匹配的同时直接获取特征的三维坐标,并且匹配时只需对一幅图像进行特征提取即可,提高了匹配效率与匹配精度,最终实现了特征匹配与重构的一体化。

3.2 基于空间向量的相对位姿参数解算

在完成非合作航天器特征匹配与重构后,建立非合作航天器目标坐标系,并根据空间向量对非合作航天器相对位姿参数进行解算。

由 3.1 节可得非合作航天器本体顶点特征在世界坐标系中的坐标为 P_{iw} ($i=1, \dots, 4$), 选取顶点特征的质心作为目标坐标系的原点,即:

$$O_m^w = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 P_{iw}. \quad (4)$$

目标坐标系 3 个坐标轴的单位向量可设置为:

$$\begin{cases} e_{mx} = \frac{P_{2w} - P_{1w}}{\|P_{2w} - P_{1w}\|} \\ e_{mz} = \frac{e_{mx} \times (P_{3w} - P_{1w})}{\|e_{mx} \times (P_{3w} - P_{1w})\|} \\ e_{my} = e_{mz} \times e_{mx} \end{cases}, \quad (5)$$

其中: P_1, P_2, P_3 为非合作航天器本体 3 个非共线的顶点特征,如图8所示。

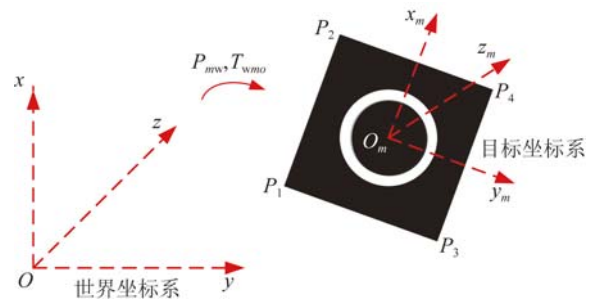


图8 非合作航天器目标坐标系

Fig.8 Target coordinate system of non-cooperative spacecraft

非合作航天器本体顶点特征在目标坐标系中的坐标可由下式计算:

$$P_{im} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{mx}^T \cdot (P_{iw} - O_m^w) \\ \mathbf{e}_{my}^T \cdot (P_{iw} - O_m^w) \\ \mathbf{e}_{mz}^T \cdot (P_{iw} - O_m^w) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

顶点特征在世界坐标系中的坐标 P_{iw} , 定义如下:

$$\mathbf{u}_{ik} = \begin{cases} \frac{P_{jw} - P_{iw}}{\|P_{jw} - P_{iw}\|}, & \|P_{jw} - P_{iw}\| \neq 0 \\ 0, & \|P_{jw} - P_{iw}\| = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, 3, j=2, 3, 4, j>i$; 序号 $k=(8-i)(i-1)/2+(j-i)$.

定义:

$$\mathbf{v}_{il} = \begin{cases} \frac{\mathbf{u}_{ij} \times \mathbf{u}_{il}}{\|\mathbf{u}_{ij} \times \mathbf{u}_{il}\|}, & \|\mathbf{u}_{ij} \times \mathbf{u}_{il}\| \neq 0 \\ 0, & \|\mathbf{u}_{ij} \times \mathbf{u}_{il}\| = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $i=1, \dots, 5, j=2, \dots, 6, j>i$; 序号 $l=(12-i)(i-1)/2+(j-i)$.

由所有的 $\mathbf{u}_w, \mathbf{v}_w$ 向量构成的矩阵为:

$$\mathbf{V}_w = [\mathbf{u}_1 \ \dots \ \mathbf{u}_6 \ \mathbf{v}_1 \ \dots \ \mathbf{v}_{15}]. \quad (9)$$

同理, 对于顶点特征在目标坐标系中的坐标 P_{im} , 可以获得相应矩阵 \mathbf{V}_m . 矩阵 \mathbf{V}_w 与 \mathbf{V}_m 存在如下关系:

$$\mathbf{V}_m = \mathbf{R}_{mw} \mathbf{V}_w. \quad (10)$$

由上式可得:

$$\mathbf{R}_{mw} = \mathbf{V}_m \mathbf{V}_w^T (\mathbf{V}_w \mathbf{V}_w^T)^{-1}. \quad (11)$$

非合作航天器本体顶点特征坐标 P_{iw} 和 P_{im} 满足:

$$P_{iw} = \mathbf{R}_{wm} P_{im} + \mathbf{T}_{mw}, \quad (12)$$

得到平移向量:

$$\mathbf{T}_{mw} = P_{iw} - \mathbf{R}_{wm} P_{im}, \quad (13)$$

其改进的关系式为:

$$\mathbf{T}_{mw} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (P_{iw} - \mathbf{R}_{wm} P_{im}). \quad (14)$$

通过式(11)和式(14)即可得到空间非合作航天器的相对位姿参数, 其充分利用了空间向量的冗余信息, 提高了求解精度。

4 实验结果与分析

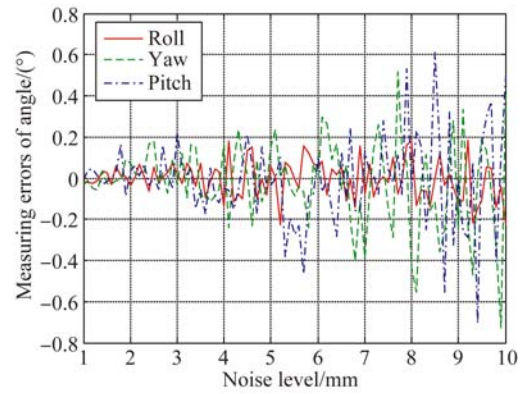
通过仿真实验和实际实验对本文非合作航天器相对位姿参数的测量方法进行验证。

4.1 仿真实验

根据本文非合作航天器相对位姿参数测量原

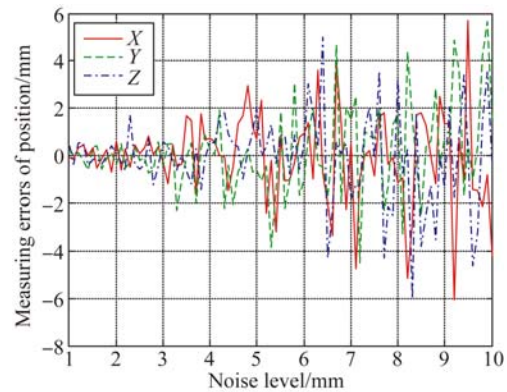
理可知, 影响测量精度的因素主要可以分为两类: 一类会直接对非合作航天器特征定位精度产生影响, 如特征图像坐标提取误差、摄像机标定误差等; 另一类则会对非合作航天器相对位姿参数的测量基线产生影响, 如非合作航天器本体尺寸。因此, 本节主要通过仿真实验分析非合作航天器特征定位噪声与其本体尺寸对相对位姿参数测量精度的影响。

首先, 分析特征定位噪声对非合作航天器相对位姿参数测量精度的影响。实验中, 假定非合作航天器的本体尺寸为 1 000 mm, 特征定位噪声水平为 1~10 mm, 相应的位姿参数测量精度如图 9 所示。从图中可以看出, 非合作航天器相对位姿参数测量误差随噪声水平的增大而增大, 然而即便噪声幅值达到 10 mm 时, 姿态测量误差仍然在 0.8° 以内, 位置测量误差仍然在 6 mm 以内。



(a) 姿态测量误差随噪声水平变化曲线

(a) Attitude measuring errors change with noise level



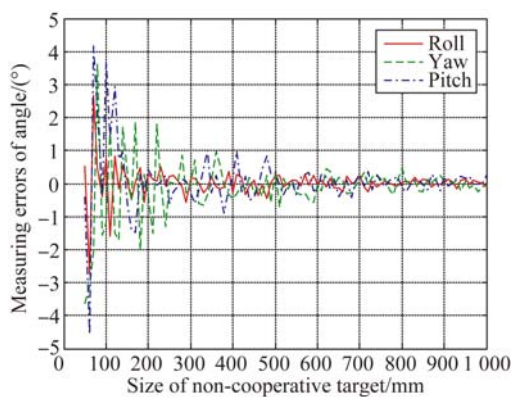
(b) 位置测量误差随噪声水平变化曲线

(b) Position measuring errors change with noise level

图 9 相对位姿参数测量误差随噪声水平变化曲线

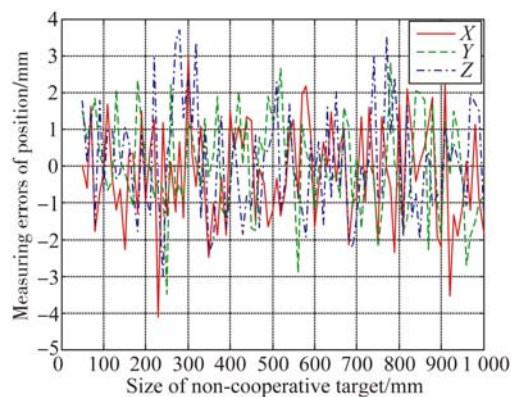
Fig. 9 Measuring errors of relative attitude and position change with noise level

然后,在特征定位噪声一定的情况下,分析非合作航天器本体尺寸对相对位姿参数测量精度的影响。实验中,假定特征定位噪声为 5 mm,非合作航天器本体尺寸为 50~1 000 mm,相应的位姿参数测量精度如图 10 所示。从图中可以看出,非合作航天器姿态测量误差随其本体尺寸的增大而减小,在非合作航天器本体尺寸达到 250 mm 以后,其姿态测量误差基本在 1(°)以内;而非合作航天器位置测量误差则基本不受其本体尺寸的影响,在噪声水平为 5 mm 时,其位置测量误差基本在 4 mm 以内,与图 9 中实验结果相符合。



(a) 姿态测量误差随航天器本体尺寸变化曲线

(a) Attitude measuring errors change with spacecraft size



(b) 位置测量误差随航天器本体尺寸变化曲线

(b) Position measuring errors change with spacecraft size
图 10 相对位姿参数测量误差随航天器本体尺寸变化曲线

Fig. 10 Measuring errors of relative attitude and position change with spacecraft size

4.2 实际实验

为验证本文非合作航天器相对位姿测量方法的实用性,搭建地面试验系统。该系统主要由双目立体视觉模块、非合作航天器模型、图像采集控制与数据处理模块等组成。其中,摄像机选用加拿大 Point Grey 公司的 FL3-20E4M,分辨率为 1 280×1 024,帧频为 50 frame/s。非合作航天器模型由航天器本体与星箭对接环组成,其中航天器本体尺寸为 280 mm,对接环内环直径为 120 mm,外环直径为 140 mm,如图 11 所示。

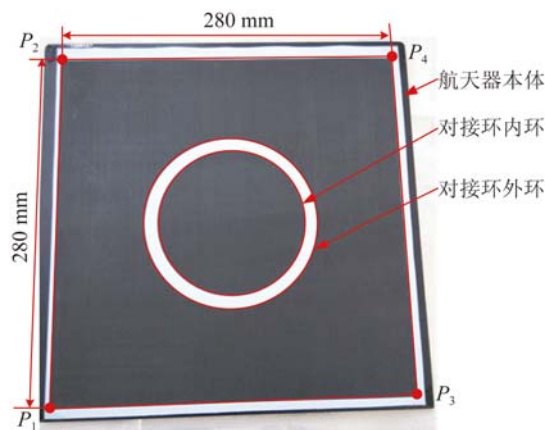


图 11 非合作航天器模型

Fig. 11 Model of non-cooperative spacecraft

在实验中,将非合作航天器模型安装于转台上,转台与测量系统相距 2 m,利用激光跟踪仪标定世界坐标系、转台坐标系以及目标坐标系之间的转换关系。测量时,通过立体视觉系统获取非合作航天器模型的图像数据,然后利用本文方法对获取的图像数据进行处理,求得非合作航天器模型的相对位姿参数。将测量结果与转台给定数据进行比对,可得相对位姿参数测量误差的统计结果,如图 12 所示。从图中可以看出,在航天器本体尺寸为 280 mm、相对距离为 2 m 的条件下,本文方法可以实现姿态测量误差小于 1.5°,位置测量误差小于 4 mm 的测量要求。实际测量误差比仿真误差偏大,主要是由于在实际测量中引入了坐标系转换误差等。

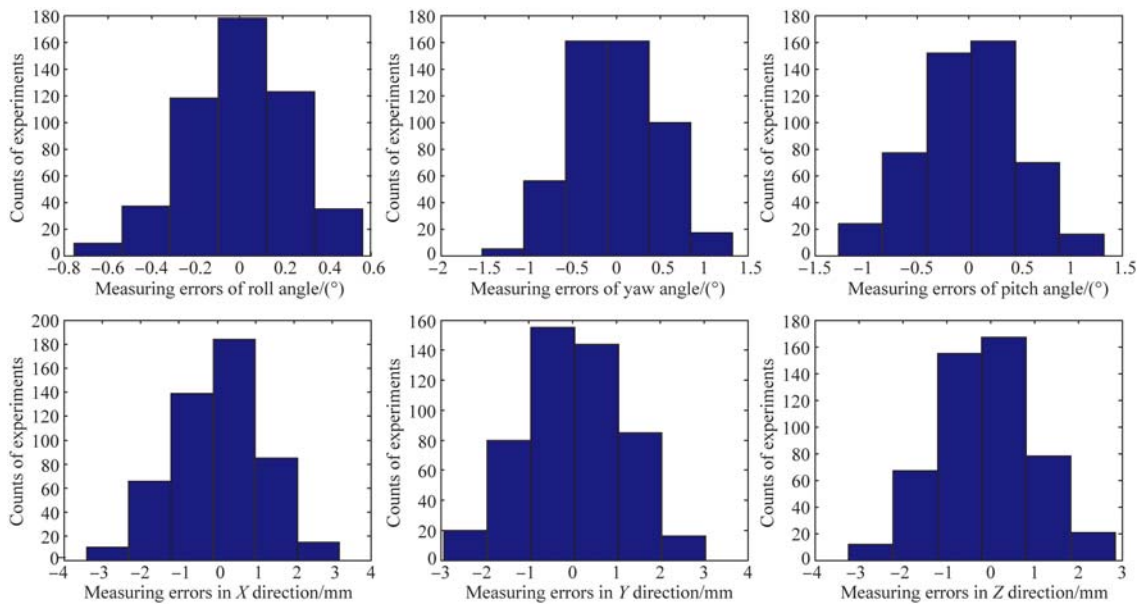


图 12 相对位姿参数测量误差

Fig. 12 Measuring errors of relative attitude and position

5 结 论

空间非合作目标捕获是进行在轨航天器维修、废弃航天器清理的具体实施手段,而空间非合作目标相对位姿参数的测量是在轨捕获的关键前提。本文提出了一种基于立体视觉的空间非合作航天器相对位姿自主测量方法。在测量过程中,以航天器本体和星箭对接环作为识别特征,识别

过程无需人的参与;然后,采用一种基于空间几何约束的特征匹配方法,在完成匹配的同时可直接获取特征的三维信息,实现了匹配重构的一体化,提高了特征匹配精度与三维重构效率;最后,基于空间向量实现了非合作航天器相对位姿参数的高精度测量,在航天器本体尺寸为 280 mm、相对距离为 2 m 的条件下,姿态测量误差小于 1.5° ,位置测量误差小于 4 mm,能够满足空间非合作目标在轨捕获的相对位姿测量需求。

参考文献:

- [1] 梁斌,杜晓东,李成,等.空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J].机器人,2012,34(2):242-256.
LIANG B, DU X D, LI CH, *et al.*. Advances in space robot on-orbit servicing for non-cooperative spacecraft [J]. *Robot*, 2012, 34(2): 242-256. (in Chinese)
- [2] 王志超.非合作航天器视觉位姿测量方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
WANG ZH CH. *Research on visual measurement method of non-cooperative spacecraft* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] 夏庆.非合作相对位姿测量跟踪研究及设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
XIA Q. *Research and design on relative pose measurement and tracking for non-cooperative target* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 郝刚涛,杜小平.空间非合作目标位姿光学测量研究现状[J].激光与光电子学进展,2013,50(8):080028.
HAO G T, DU X P. Advances in optical measurement for position and pose for space non-cooperative target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080028. (in Chinese)
- [5] BISCHOF B, KERSTEIN L, STARKE J, *et al.*. ROGER-robotic geostationary orbit restorer [C]. *Proceedings of the 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, Bremen, Germany, 2003*: IAC-03-IAA. 5. 2. 08.
- [6] KIMURA S, NAGAI Y, YAMAMOTO H. Approach for on-orbit maintenance and experiment plan using 150kg-class satellites [C]. *Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Piscataway, USA, 2005*: 837-845.
- [7] DARPA Tactical Technology Office. Broad Agency

- Announcement: Phoenix Technologies Project Page [EB/OL]. <http://www.darpa.mil/tto/programs/Phoenix.html>, 2011.
- [8] 张世杰,曹喜滨,陈闽.非合作航天器间相对位姿的单目视觉确定算法[J].南京理工大学学报,2006,30(5):564-568.
ZHANG SH J, CAO X B, CHEN M. Monocular vision-based relative pose parameters determination for non-cooperative spacecrafts [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2006, 30(5): 564-568. (in Chinese)
- [9] 徐文福,刘宇,梁斌,等.非合作航天器的相对位姿测量[J].光学精密工程,2009,17(7):1570-1581.
XU W F, LIU Y, LIANG B, *et al.*. Measurement of relative poses between two non-cooperative spacecrafts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1570-1581. (in Chinese)
- [10] 徐文福,梁斌,李成,等.空间机器人捕获非合作目标的测量与规划方法[J].机器人,2010,32(1):61-69.
XU W F, LIANG B, LI CH, *et al.*. Measurement and planning approach of space robot for capturing non-cooperative target [J]. *Robot.*, 2010, 32(1): 61-69. (in Chinese)
- [11] 薛强.基于双目立体视觉的GEO非合作目标位姿测量方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
XUE Q. *Research on pose measurement method of GEO non-cooperative target using binocular stereo cameras* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 李莹,叶培建,彭兢,等.基于火星探测的人工标志识别定位[J].光学精密工程,2015,23(2):566-572.
LI Y, YE P J, PENG J, *et al.*. Artificial target recognition and location based on Mars exploration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 566-572. (in Chinese)
- [13] 肖志涛,朱莎莎,耿磊,等.深度约束的零件尺寸测量系统标定方法[J].红外与激光工程,2015,44(9):2831-2836.
XIAO ZH T, ZHU SH SH, GENG L, *et al.*. Calibration method for parts dimension measurement system based on depth constraint [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2831-2836. (in Chinese)
- [14] 邢德奎,达飞鹏,张虎.圆形目标精密定位方法的研究与应用[J].仪器仪表学报,2009,30(12):2593-2598.
XING D K, DA F P, ZHANG H, *et al.*. Research and application of locating of circular target with high accuracy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(12): 2593-2598. (in Chinese)
- [15] XU Z, SHIN B, KLETTE R. Closed form line-segment extraction using the Hough transform [J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(12): 4012-4023.
- [16] 张宏薇,王仕洋,李宪龙,等.基于Hough变换的瞳孔识别方法研究与实现[J].液晶与显示,2016,31(6):621-625.
ZHANG H W, WANG SH Y, LI X L, *et al.*. Research and implementation of pupil recognition based on Hough transform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(6): 621-625. (in Chinese)
- [17] ZHOU F, ZHONG C, ZHENG Q. Method for fundamental matrix estimation combined with feature lines [J]. *Neurocomputing*, 2015, 160(C): 300-307.
- [18] 王欣,袁坤,于晓,等.基于运动恢复的双目视觉三维重建系统设计[J].光学精密工程,2014,22(5):1379-1387.
WANG X, YUAN K, YU X, *et al.*. Design of binocular vision 3D reconstruction system based on motion recovery [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1379-1387. (in Chinese)
- [19] 万一龙,柏连发,韩静,等.低照度双目立体显著目标距离测定方法与实现[J].红外与激光工程,2015,44(3):1053-1060.
WAN Y L, BAI L F, HAN J, *et al.*. Method and realization of significant target recognition and distance ranging in the binocular vision under low illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1053-1060. (in Chinese)
- [20] 田浩南,张叶.基于边缘及特征点匹配的立体图像质量评价[J].液晶与显示,2015,30(4):666-672.
TIAN H N, ZHANG Y. Quality evaluation of stereo image based on edge and characteristic point matching [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 666-672. (in Chinese)

作者简介:



杨宁(1986—),男,山东潍坊人,博士,工程师,2016年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事视觉测量、导航、制导与控制、地面半物理仿真等方面的研究。E-mail: yn3714@163.com



申景诗(1978—),男,山东烟台人,硕士,高级工程师,2011年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事视觉导航、卫星通信、天基组网技术等方面的研究。E-mail: shenjingshi@hotmail.com