

基于特征融合的非合作航天器位姿测量方法^①

王志超^② 王 滨^③ 李志奇 刘 宏

(机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001)

摘 要 针对空间机器人捕获空间非合作目标的相对位姿测量问题,提出了一种基于特征信息融合的位姿测量方法。该方法以航天器本体和远地端发动机引擎喷管作为两个识别特征,采用多边形逼近和最小二乘椭圆拟合算法完成特征的识别、提取,并由双目立体视觉视差原理计算特征点的位置,依据两个识别特征之间的几何关系,计算得出捕获装置的位姿。实验结果表明该方法具有算法简单、运行效率高、测量误差小的特点,能够满足空间非合作目标抓捕任务。

关键词 特征融合,非合作目标,位姿测量,立体视觉

0 引 言

卫星的运行具有很大的风险^[1],一旦卫星在太空中失效,将带来巨大的损失。为了避免损失,以卫星燃料加注、功能部件更换与升级等为目的的空间机器人在轨服务系统成为各国争先发展的方向^[2,4]。由于大多数已在轨的航天器是非合作的,没有用于辅助测量的合作标志器,所以如何对空间非合作目标进行自主识别与位姿测量,以实现非合作目标的捕获,是一个急需解决的问题。

国内外已有学者对非合作目标的识别与位姿测量问题进行了研究,但至今问题仍未能得到很好的解决。Lichter 等^[5,6]通过在几个追踪星上安装立体视觉摄像机以实现对目标星的位姿和外部结构的估计,但为了获得目标的旋转特性,需进行大量一致分布数据点的计算,导致系统负担过大。Segal 等^[7]提出了一种基于多次迭代的卡尔曼滤波与极大似然估计相结合的方法对非合作目标进行位姿和深度信息进行估计,但假定目标的特征明确且算法计算量大,实时性不高。杜晓东等^[8,9]提出了先采用两台摄像机提取目标卫星上矩形结构,再通过矩形特征的几何特性来进行位姿解算的方法。本文提出了一种基于特征信息融合的空间非合作卫星自主识别与位姿

测量方法。该方法以空间航天器卫星本体和远地端发动机引擎喷管作为识别特征,无需在目标星上安装合作标志器,由卫星本体和引擎喷管间的空间几何关系进行位姿解算,算法计算简单、适用范围大。同时,建立了地面实验系统,对非合作目标识别、位姿获取算法的有效性进行了验证。

1 测量系统组成与特征选取

由于未安装合作的标志器,本研究采用航天器本身自带的器件作为识别目标。目前已发射的卫星外形大都具有多边形形状,在远地端有为调整姿态而安装的发动机,发动机引擎喷管的喷嘴总是具有圆形特征,且喷嘴平面与喷管的安装平面(X面)之间相互平行。因此,本研究采用航天器本体外形和远地端发动机引擎喷管作为识别特征,将图像处理得到的特征信息进行融合,获得非合作航天器的相对位姿。

这种位姿测量系统由目标星、追踪星、双目立体视觉系统、远地端发动机引擎喷管组成,其中引擎喷管安装在目标星上,双目立体视觉系统安装在追踪星上。双目视觉位姿测量系统如图 1 所示。

① 973 计划(2013CB733103,2013CB733105)资助项目。

② 男,1988 年生,硕士生;研究方向:空间机器人,视觉伺服控制,目标识别;E-mail:wzc_hit@126.com

③ 通讯作者,E-mail:wbit@hit.edu.cn

(收稿日期:2013-01-19)

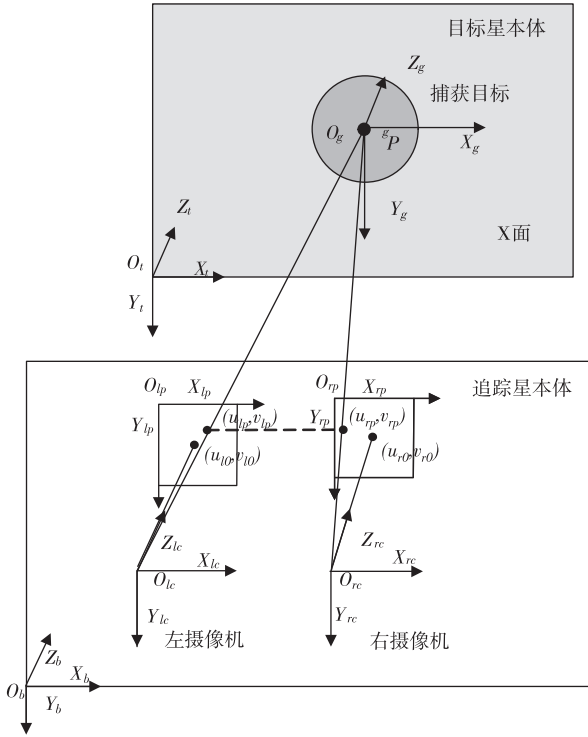


图1 双目视觉位姿测量系统

图1中含有7个坐标系,分别是:

- (1)追踪星本体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$;
- (2)目标星本体坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$;
- (3)追踪星上左摄像机坐标系 $O_{lc} X_{lc} Y_{lc} Z_{lc}$;
- (4)左摄像机图像平面坐标系 $O_{lp} X_{lp} Y_{lp}$;
- (5)追踪星上右摄像机坐标系 $O_{rp} X_{rp} Y_{rp} Z_{rp}$;
- (6)右摄像机图像平面坐标系 $O_{rp} X_{rp} Y_{rp}$;
- (7)捕获目标坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 。

捕获目标安装在目标星本体上坐标系上的任意点 P 在左右摄像机像平面上的投影点坐标分别为 (u_{lp}, v_{lp}) 、 (u_{rp}, v_{rp}) ;由喷嘴平面与喷管的安装平面(X面)之间相互平行,建立的捕获目标坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 与目标星本体坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$ 之间旋转矩阵为单位阵。

2 非合作目标识别方法

考虑到空间卫星所带处理器处理速度的限制,本文先对目标卫星本体识别,然后采用图像逐步分割处理的方法对引擎喷管进行识别,最后将特征信息融合进行位姿计算,算法结构如图2所示。

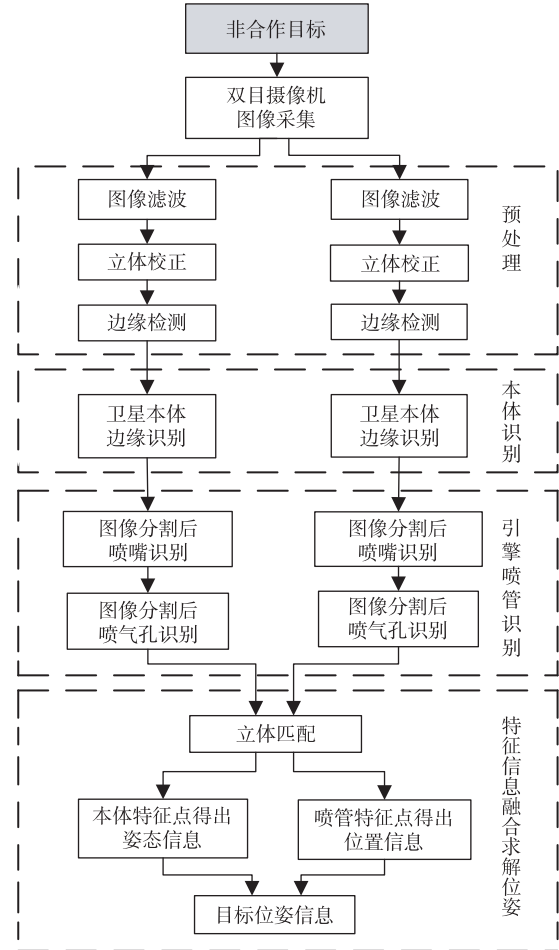


图2 基于特征融合的非合作目标位姿测量算法结构

2.1 图像预处理

本文采用中值滤波算法对图像进行平滑处理,以减少目标背景等原因造成的图像噪声和失真,同时保护边界信息;采用 Bouguet 算法^[10]对两幅图像进行立体校正,以得到行对准前向平行结构的左右图像对;采用 Canny 算子^[11]对图像边缘进行检测,以得到图像中的边缘信息。

2.2 卫星本体识别

图像预处理后,会得到包括目标卫星本体边缘、太阳能帆板、帆板支架等在内的大量边界信息。为了从杂乱的边界信息中快速、准确地提取出目标卫星的多边形外轮廓信息,本文采用多边形逼近算法^[12]来获得目标卫星本体轮廓。算法处理流程如下:

- (1)将杂乱的边缘信息处理为轮廓信息;
- (2)选择轮廓中距离最远的两个点并连成一条线段,形成初始目标轮廓;
- (3)查找轮廓上到目标轮廓距离最远点,并将该点添加到逼近后的新轮廓;

(4)重复步骤(3),直至满足精度要求。

不失一般性,以八边形为例,说明算法运算过程,如图 3 所示。

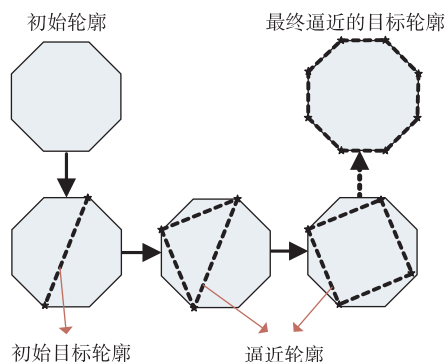


图 3 多边形逼近算法运算过程

2.3 发动机引擎喷管识别

发动机引擎喷管在左右摄像机里的成像会在卫星本体轮廓之内,为了剔除诸如太阳能帆板、帆板支架等其他轮廓信息,提高引擎喷管识别算法的计算速度,本文在得到目标卫星本体外轮廓信息后,将滤波后的图像进行图像分割,从而得到目标卫星本体所在的图像区域,并在此区域内识别引擎喷管。

喷管的识别分为喷嘴的识别和内部喷气孔的识别,由于喷气孔的成像会在喷嘴轮廓内,故采取先喷嘴、后喷气孔的顺序对引擎喷管进行识别。远地端发动机引擎喷管如图 4 所示。

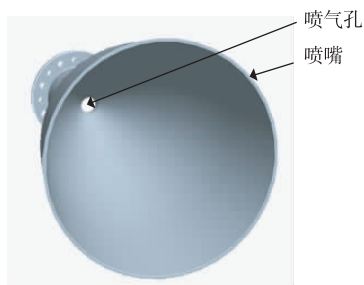


图 4 远地端发动机引擎喷管

首先,在图像分割得到的目标卫星本体区域内,以轮廓的概括特征为判别函数,提取出喷嘴轮廓。然后,对 N 个喷嘴轮廓点 (x_i, y_i) 进行最小二乘椭圆拟合以获得喷嘴的边界信息。最后由这些边界信息得出长轴、短轴、长轴与 X 轴正方向的倾斜角、中心点坐标等 5 个椭圆参数 $(a_e, b_e, \theta_e, x_e, y_e)$ 。

在摄像机图像平面坐标系中的平面二次曲线表达式为

$$F(x, y) = ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey - 1 = 0 \quad (1)$$

设数据向量 $P_i = [x_i^2, 2x_i y_i, y_i^2, 2x_i, 2y_i, 1]^T, i = 1, 2, \dots, N$, 参数向量 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5]^T = [a, b, c, d, e]^T$ 。

将提取到的轮廓点作为椭圆拟合方法的数据,以数据点到拟合椭圆 F 的误差最小作为目标函数,计算目标参数向量 α^* :

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} ||A \cdot \alpha - B|| \quad (2)$$

式中, A 为椭圆点数据向量组成的矩阵, $A = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_N]^T$; $B = [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1]^T$ 。

通过最小二乘方法,计算出目标参数向量 α^* ,利用椭圆判别式对其进行判断:

$$d(\alpha^*) = \text{sign}((\alpha_2^*)^2 - 4\alpha_1^* \alpha_3^*) = \begin{cases} 1, & \text{拟合曲线为椭圆} \\ -1, & \text{拟合曲线非椭圆} \end{cases} \quad (3)$$

若拟合曲线非椭圆,则说明图像中椭圆轮廓不完整,须调整追踪星位姿重新测量,不在本文讨论范围;若拟合曲线为椭圆,则将椭圆方程 F 改写为椭圆标准方程,可得椭圆边界参数 $(a_e, b_e, \theta_e, x_e, y_e)$ 。

为了进一步得到捕获装置的尺寸信息,还须对引擎喷管内部的喷气孔进行识别。在得到喷嘴的边界信息后,图像分割得到喷气孔所在的区域,考虑到引擎喷管的喷气孔本身面积很小 ($< 500\text{mm}^2$),其在摄像机里映射的轮廓点数也很少,从而降低最小二乘椭圆拟合方法的拟合精度,故对喷气孔的识别采用对喷气孔轮廓的外包矩形进行最小二乘拟合的方法,只求得喷气孔中心点坐标 (x_{e1}, y_{e1}) 信息。

3 立体匹配与位姿解算

为了利用有限的星载计算机处理能力计算目标位姿,本文采用基于局部匹配算法^[13]。首先,对识别特征上部分特征点进行立体匹配,得到稀疏视差图。然后,由视差原理得到特征点在左摄像机坐标系的坐标。最后,将两个识别目标上特征点信息融合后,依据空间几何位置关系得到目标的相对位姿。

本文需要进行匹配的特征点分别为目标卫星本体外轮廓角点、引擎喷管的喷嘴中心点和喷气孔中心点等。

3.1 扩大行搜索区域的立体匹配

由于太空环境恶劣,巨大的温差效应会使摄像机的内外参数发生变化,导致立体校正不能使左右

两摄像机完全行对准,从而使立体匹配变得困难。本文采用扩大行搜索区域和左右交叉匹配来解决这一问题。算法处理流程如下:

(1)以立体校正后的左图像特征点极线为中心线(此时为水平方向),在右图像上扩大行搜索区域,针对不同类型的匹配点选定不同的匹配窗口,采用“绝对误差累计”方法进行一维搜索;

(2)从右图像上找到的匹配点用同样的方法在左图像上寻找对应匹配点;

(3)通过判别函数去除误匹配点。

3.2 位姿解算

立体匹配后,可以得到特征点的视差,此时由视差原理^[14],可求得匹配特征点在左摄像坐标系下的三维坐标位置:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, Q 为双目视觉重投影矩阵:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_x} & \frac{(c_x - c_x')}{T_x} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 c_x' 为右图像主点在左图像上的 X 轴坐标, c_x 、 c_y 和 f 为校正后的左摄像机内参数, (x,y) 为立体匹配点在左摄像机平面坐标系上的坐标, d 为立体匹配点关联视差, T_x 为校正后两摄像机在 X 轴方向距离, $(\frac{X}{W}, \frac{Y}{W}, \frac{Z}{W})$ 为立体匹配点在左摄像机坐标系的三维坐标。

通过上面的步骤,已经得到卫星本体和喷管上喷嘴、喷气孔特征的特征点信息。接下来,由目标卫星本体上的特征点得出与目标星本体坐标系 X 轴方向平行的向量 x ,并将这些特征点拟合得出与目标卫星本体坐标系 Z 轴方向平行的平面法向量 z ,由向量 x 和向量 z 即可确定目标星本体坐标系与追踪星本体坐标系间的旋转矩阵,即可求得目标星本体姿态。由建立的目标星本体坐标系与捕获目标坐标系之间旋转矩阵为单位阵,可得出捕获目标的姿态信息。同时,由引擎喷管的喷嘴中心点坐标可得捕获目标坐标系的原点坐标,由喷嘴中心点坐标和喷气孔中心点坐标得出捕获目标的主要尺寸,即由喷管特征得到了捕获目标的位置信息。综上,由两

个特征之间的空间几何位置关系,通过融合各自得到的捕获目标信息从而完成了对目标的位姿解算。

4 实验验证

为了评价基于特征信息融合的空间非合作目标位姿测量方法的有效性和测量精度,建立了地面验证系统。本文先对某一固定姿态下非合作目标的位姿进行测量,然后研究了在近距离阶段^[15]情况下,算法的测量精度。

4.1 算法有效性验证实验

本文建立的地面系统包括双目摄像机成像与采集部分、目标航天器模型、图像处理与位姿测量控制器、激光测距仪等部分。

本文目标星选为四边形,其 X 面尺寸为:700mm×700mm;左右相机采用 POINT GREY 公司 FL2-03S2C 型工业摄像机,分辨率为 640×480,镜头选用 COMPUTAR 公司 09C 型工业镜头,视场角为 32°;抓捕任务的捕获目标为伪远地端发动机引擎喷管,主要尺寸信息如下:喷嘴直径(D)为:φ260mm;捕获目标的主要尺寸——喷嘴平面到喷气孔平面距离(S')为:304mm。为了后续长杆式对接机构^[16]能够精确地深入喷嘴,并最终锁住喷嘴的燃烧室喉部结构,完成非合作目标抓捕任务,抓捕任务的抓捕误差要求为各向位置误差<30mm,各向姿态误差<3°。

选择追踪星本体坐标系与左摄像机坐标系重合;以左摄像机为主摄像机,通过立体视觉标定^[10]得到两摄像机的位姿计算矩阵:

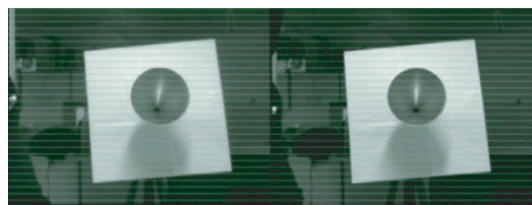
$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -281.014 \\ 0 & 1 & 0 & -241.898 \\ 0 & 0 & 0 & 1154.05 \\ 0 & 0 & 0.0128846 & 0.3552284 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过激光测距仪设定追踪星与抓捕目标的相对位置 O' 、姿态 ψ' 和喷嘴平面到喷气孔平面距离 S' 的公式为:

$$\begin{cases} O' = [150.7\text{mm} & -50.4\text{mm} & 2102.3\text{mm}]^T \\ \psi' = [-5.0^\circ & 2.0^\circ & -11.0^\circ]^T \\ S' = 304\text{mm} \end{cases} \quad (7)$$

实验参数设定完成后,采用上面提出的位姿测量方法对非合作目标进行识别与位姿测量。

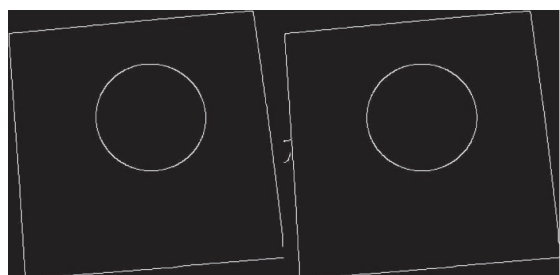
算法处理过程中得到中间图像如图 5 所示。



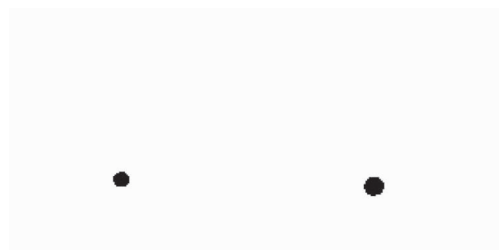
(a) 校正后的左右图像



(b) 卫星外轮廓



(c) 喷管上的喷嘴



(d) 喷管上的喷气孔

图 5 算法处理过程中的左右图像

识别算法之后得到的特征点如图 6 所示。

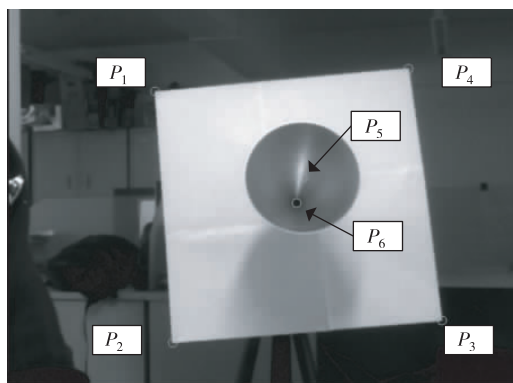


图 6 左图像各特征点位置关系

计算得出各特征点在追踪星本体坐标系中的坐标为

$$\begin{bmatrix} {}^bP_1 \\ {}^bP_2 \\ {}^bP_3 \\ {}^bP_4 \\ {}^bP_5 \\ {}^bP_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -211.864 & -302.852 & 2537.00 \\ -155.470 & 375.632 & 2410.70 \\ 555.248 & 321.474 & 2437.77 \\ 487.021 & -368.023 & 2540.01 \\ 163.314 & -51.9251 & 2115.34 \\ 171.142 & 8.43181 & 2409.81 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由目标卫星本体上 4 个特征点坐标 $[{}^bP_1 \ {}^bP_2 \ {}^bP_3 \ {}^bP_4]^T$ 拟合得出的卫星本体平面法向量 z , 其与目标星本体坐标系 Z 轴方向平行, 向量 $\overrightarrow{P_2P_3}$ 与目标星本体坐标系 X 轴方向平行, 由 $\overrightarrow{P_2P_3}$ 和 z 可得出目标星本体坐标系与追踪星本体坐标系间的旋转矩阵, 即可求得目标星本体姿态, 也就是捕获目标姿态; 由引擎喷管的喷嘴中心点坐标 bP_5 得到捕获目标坐标系的原点坐标, 由喷嘴中心点坐标 bP_5 和喷气孔中心点坐标 bP_6 得出空间抓捕任务中目标的主要尺寸信息。

用本文的方法计算得到的相对位姿 (O^m, ψ^m) 及引擎喷管喷嘴与喷气孔平面距离 S^m :

$$\begin{cases} O^m = [163.314\text{mm} & -51.9251\text{mm} & 2115.34\text{mm}]^T \\ \psi^m = [-4.6494^\circ & 1.3185^\circ & -10.6584^\circ]^T \\ S^m = 300.73\text{mm} \end{cases} \quad (9)$$

测量误差为

$$\begin{cases} O^e = [12.614\text{mm} & -1.5251\text{mm} & 13.04\text{mm}]^T \\ \psi^e = [0.3626^\circ & -0.7175^\circ & 0.3646^\circ]^T \\ S^e = 3.27\text{mm} \end{cases} \quad (10)$$

测量误差满足空间机器人抓捕任务的要求, 验证了算法的有效性。

4.2 近距离状态下测量精度获取实验

近距离状态下测量精度获取实验的参数设置与上述实验相同。为研究本方法在近距离阶段的测量精度, 以两卫星间 Z 向距离 P_z 为例进行下述实验。实验设定追踪星与抓捕目标的相对位置 O' 中分量 (P_x, P_y) 和相对姿态 ψ' 中 (γ, β, α) 分别为 $(0\text{mm}, 0\text{mm})$ 和 $(1^\circ, 1^\circ, 2^\circ)$, 实验参数 P_z 设定如表 1 所示, 左摄像机采集的对应图像如图 7 所示。

表 1 参数 P_z 设定值

编 号	P_z (mm)	编 号	P_z (mm)
1	1500	9	2300
2	1600	10	2400
3	1700	11	2500
4	1800	12	2600
5	1900	13	2700
6	2000	14	2800
7	2100	15	2900
8	2200	16	3000

实验结果如图 8 所示。

实验结果表明,采用本文基于特征信息融合的位姿测量方法,可以有效的识别非合作目标并测量相对位姿;在近距离阶段,随着两星相对距离的增

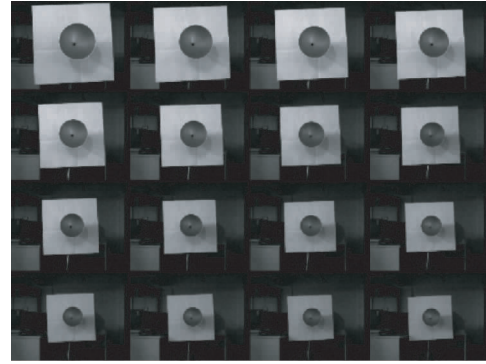


图 7 左摄像机图像序列

加,测量误差逐渐增大,相对位置测量精度优于 25mm,相对姿态测量精度优于 1.5° 。本方法能够满足捕获空间非合作目标任务中近距离阶段的相对位姿测量要求。

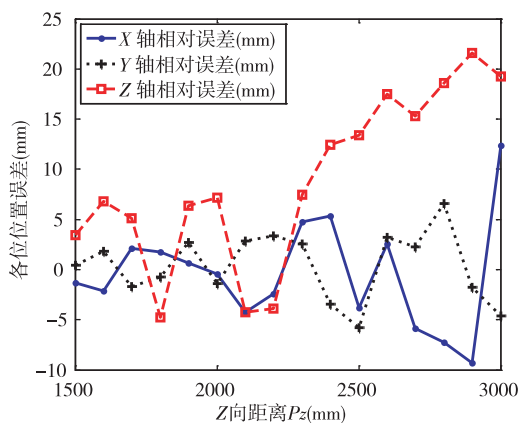
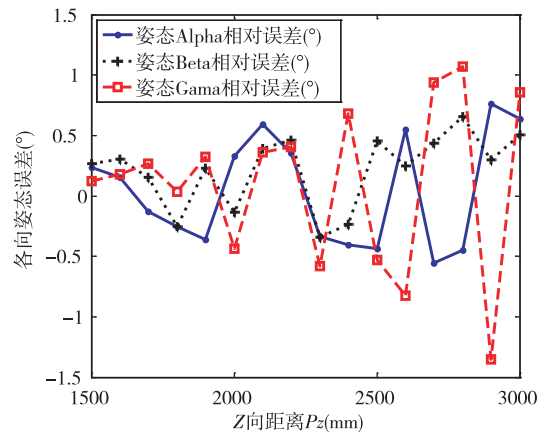

 (a) 位置误差与 P_z 之间的变化关系

 (b) 姿态误差与 P_z 之间的变化关系

 图 8 P_z 与测量误差之间的关系

5 结 论

空间非合作目标位姿测量是空间非合作目标捕获的前提。为实现空间非合作目标的抓捕任务,本文提出了一种基于特征融合的空间非合作目标位姿测量方法,其以卫星本体和远地端发动机引擎喷管共同作为目标特征,并将两者信息融合后得出远地端发动机引擎喷管的相对位姿。该方法具有计算简单,适用范围大,测量精度高的特点。实验结果表明,在近距离阶段,相对位置测量精度优于 25mm,相对姿态测量精度优于 1.5° ,可满足捕获空间非合作目标任务中近距离阶段的相对位姿测量要求。

参考文献

- [1] Tafazoli M. A study of on-orbit spacecraft failures. *Acta Astronautica*, 2009, 64: 195-205
- [2] Stoll, E, Letschnik, J, Walter, U, et al. On-orbit servicing. *Robotics & Automation*, 2009, 16(4): 29-33
- [3] 林来兴. 四十年空间交会对接技术的发展. *航天工程*, 2007, 16(4): 70-77
- [4] 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. *机器人*, 2012, 19(2): 242-256
- [5] Lichter D M, Dubowsky S. State, Shape and Parameter Estimation of Space Objects from Range Images. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, America, 2004. 194-205
- [6] Lichter D M, Dubowsky S. Estimation of state, shape and inertial parameter of space objects from sequences of range images. In: *Proceedings of the SPIE Conference on Intelli-*

- gent Robotics and Computer Vision, Providence, America, 2003.
- [7] Shai Segal, Avishy Carmi, Pini Gurfil. Vision-Based Relative State Estimation of Non-Cooperative Spacecraft Under Modeling Uncertainty. In: Proceedings of Aerospace Conference, Big Sky, America, 2011. 1-8
- [8] Xiaodong Du, Bin Liang, Yanbo Tao. Pose Determination of Large Non-Cooperative Satellite in Close Range Using Coordinated Cameras. In: Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2009. 3019-3915
- [9] Xuehai Gao, Bin Liang, Xiaodong Du, et al. Pose Measurement of Large Non-cooperative Satellite using Structured Light Vision Sensor. In: Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Information Science and Technology, Wuhan, China, 2012. 101-108
- [10] Bouguet J Y. Camera calibration toolbox for Matlab. <http://www.vision.caltech.edu>
- [11] Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 6: 679-714
- [12] Douglas D, Peucker T. Algorithms for the reduction of the number of points required for represent a digitized line or its caricature. *Cartographica*, 1973, 10: 112-122
- [13] Ansari M E, Masmoudi L, Radouane L. A new region matching method for stereoscopic images. *Pattern Recognition Letters*, 2000, 21(4): 283-294
- [14] Gary Bradski, Adrian Kaebler 著, 于仕琪, 刘瑞桢 译. 学习 OpenCv(中文版). 北京: 清华大学出版社, 2009. 452-464
- [15] Jasiobedski P, Greenspan M, Roth G. Pose determination and tracking for autonomous satellite capture. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Quebec, Canada, 2001. 1-8
- [16] Andreas Baumann. Space shuttle with a device for docking to satellite. US patent: 20100301169, 2010

Relative Pose measurement of a non-cooperative spacecraft based on feature information fusion

Wang Zhichao, Wang Bin, Li Zhiqi, Liu Hong

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

For a space robot to capture a non-cooperative spacecraft, a novel method for measurement of the relative pose of the spacecraft based on feature information fusion is proposed. The method chooses the outlines of the spacecraft itself and the engine nozzle as the recognition features. It uses the least square-ellipse fitting algorithm and the polygon approximation method to extract and identify the features. Based on the disparity theory of stereo vision, the actual positions of feature points are computed. The geometry relationship between the plane of the engine nozzle and the surface of the spacecraft is utilized to calculate the position and attitude of the spacecraft to be captured. The experimental results indicate that the method possesses the characters of simple programming, efficient computation, and high measurement accuracy, which satisfies the requirements of pose measurements in capturing non-cooperative targets.

Key words: fusion feature, non-cooperative target, pose measurement, stereo vision