

基于多传感器融合的航天器间位姿参数估计

冯春¹, 吴洪涛², 陈柏²

(1. 常州工学院机电工程学院, 江苏常州 213002; 2. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016)

摘要: 提出了利用单目视觉与激光测距仪混合的航天器间相对位置和姿态参数测量的解析算法。首先利用四元数测量算法, 采用5个非共面特征光点和单目视觉获取航天器间相对位置和姿态参数的解析解, 并对解析解进行修正; 然后, 将上述6D位姿参数与激光测距仪获取的1D距离进行融合, 以进一步对6D位姿参数进行修正。最后, 通过计算实例对该算法进行数学仿真, 仿真结果表明: 该算法保证了在相机标定和特征光点提取及匹配较大误差下的位姿参数的估计精度, 能够满足航天器相对位姿确定精度和实时计算要求。

关键词: 航天器; 交会对接; 姿态估计; 单目视觉; 激光测距仪; 数据融合

中图分类号: TP242.6.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1616-07

Method for relative pose parameters between spacecrafts based on mixing of multi-sensor

Feng Chun¹, Wu Hongtao², Chen Bai²

(1. Department of Mechanical Electronical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: By using mixing of monocular vision and laser rangefinder, a closed-form method for relative pose parameters of spacecraft was proposed. Firstly, by using quaternion measurement algorithm, the closed-form method for relative parameters of spacecraft were obtained utilizing five feature optical points and monocular vision, and they were corrected. Secondly, the above 6D pose parameters and 1D distance that obtained by laser rangefinder were fused, so as to correct the 6D pose parameters further. Finally, the solution was validated by using mathematical simulation, and simulation results show that the algorithm guarantees the pose parameters estimation accuracy under the condition of large errors caused by camera calibration and feature optical points extraction and matching. The simulation results also illustrate that the solution can satisfy the demand for the accuracy of relative parameters between spacecrafts and the real-time computation.

Key words: spacecraft; rendezvous and docking; attitude estimation; monocular vision; laser rangefinder; data fusion

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(51075209); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20140252);

江苏省高校自然科学研究面上资助项目(14KJB510003)

作者简介: 冯春(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事机器人视觉及其应用研究。Email: chun0471@163.com

0 引 言

随着计算机视觉技术的发展,其应用的领域涉及工业、农业、航空航天、医学等。视觉技术的基本问题是空间目标物的定位问题,即确定空间目标物的相对位姿参数。基于视觉的相对位姿确定算法在机器人视觉伺服、卫星编队飞行以及航天器交会对接等方面有诸多的应用^[1-2]。在航天器空间交会对接的最后阶段,通常利用 CCD 相机完成两航天器间的相对位姿参数确定。国内外相关研究人员已经就这类问题进行了大量的研究工作^[3-9],其中传统的方法就是利用单目视觉进行测量。该方法具有简单、可靠、方便等的优点,同时它也是双目和多目视觉测量方法的基础^[10-14]。

Mukunda 等^[7]提出采用 3 个非共线特征点,利用四元数理论得到 1 个一元四次方程,求解方程获得航天器间的相对位置和姿态的解析解,但存在的问题是求解四次方程时会出现多值问题,需要加以区分和判别,这就带来了识别方面的困难,而且在特定形式下会出现奇异值。张世杰等^[8]提出利用 4 个非共面特征光点和单光学测量敏感器的测量方法,基于比例正交投影近似假设,以解析的形式给出了航天器间相对位姿参数,仿真取得了较好的结果。但是其仿真过程中未考虑摄像机标定误差以及特征光点提取误差带来的最终估计误差。国内学者李建锋等^[9]采用 5 个非共面特征光点,选取其中 3 个对称特征光点为一组,共两组,每一组利用数值迭代的方法求解相应的参数并将两组结果取平均值作为最后计算值,该方法是原始问题研究中的一个进步,解决了多解判断的问题,但是迭代方法存在实时性、准确性及收敛性等困难。

文中是在前期的研究基础上,参照参考文献[15],提出利用单目视觉与激光测距仪混合的方法确定航天器间相对位姿参数。首先,采用 5 个非共面特征光点作为合作目标,基于单目视觉获取航天器间相对位置和姿态参数的解析解,同时对所求得的解析解进行修正;将上述获取的 6D 位姿信息与激光测距仪获取的 1D 距离信息进行融合,从而进一步提高相对位姿参数的估计精度。该算法有效解决了参考文献[7]中的多值问题和奇异值问题,也避免了参考文献[9]采用迭代方法的初值选取、迭代实时性、收敛性等问题,同时也进一步保证参考文献[8]在考虑摄像机标

定误差以及特征光点提取误差条件下的估计精度。该算法是对参考文献[7-9]的一个改进。最后利用数学仿真验证了文中提出算法的有效性和可行性。

1 单目视觉相对位姿确定算法

利用光学相机进行最后阶段航天器交会对接相对位姿测量主要包括:相机标定、图像采集、图像畸变校正及滤波、特征点提取、相对位姿解算等步骤。对于特征光点的结构,文中采用 5 个特定几何关系配置的形式,如图 1 所示,其中 s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 共面, s_2 与共面中心的连线构成该面的法向量。为了分析问题方便,建立了三种坐标系:目标航天器坐标系 $o(x, y, z)$, 摄像机坐标系 $O(X, Y, Z)$ 和像平面坐标系 $O_i(U, V)$ 。

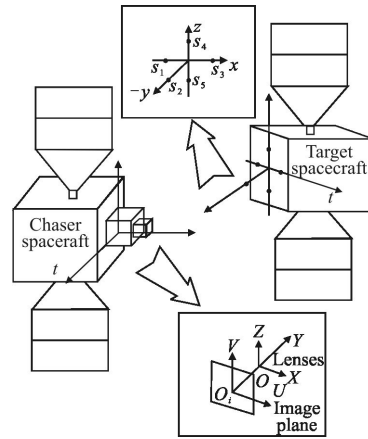


图 1 特征光点设置及航天器和相机坐标系

Fig.1 Feature points setting and the spacecraft and camera reference system

1.1 单目视觉四元数位姿测量方法

首先,假定相机已经精确标定而且特征光点位置坐标与图像坐标均正确匹配。在相机坐标系中像平面可以表示为 $Y=-f$, 其中 f 是相机的焦距。文中按照参考文献[15]的推导过程计算两航天器间相对位姿参数,具体的过程可参看相应的文献。目标航天器上设置的特征光点 $s_i(x_i, y_i, z_i)$ 在相机坐标系的对应点坐标为 $S_i(X_i, Y_i, Z_i)$, 两坐标系之间的刚体变换分别由旋转矩阵 R 和平移向量 $t=(t_x, t_y, t_z)^T$ 表示。利用四元数表示的旋转矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ R_2 - 4q_0q_3 & R_5 & R_4 \\ R_3 + 4q_0q_2 & R_4 - 4q_0q_1 & R_5 + 2q_3^2 \end{bmatrix}$$

式中: $R_1=q_0^2+q_1^2-q_2^2-q_3^2$, $R_2=2(q_1q_2+q_0q_3)$, $R_3=2(q_1q_3-q_0q_2)$, $R_4=2(q_2q_3+q_0q_1)$, $R_5=R_1-2q_1^2$ 。其中, $q_i(i=0, \dots, 3)$ 为单位四元数的 4 个参数。5 个非共面特征光点在目标坐标系内的坐标如下:

$$s_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, s_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -b \\ 0 \end{bmatrix}, s_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$s_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{bmatrix}, s_5 = \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -a \end{bmatrix}$$

同时, 上述 5 个特征光点对应的目标航天器上的相机坐标系坐标 $S_i(X_i, Y_i, Z_i)(i=1 \dots 5)$ 与图像坐标系 $(U_j, V_j)(j=1 \dots 5)$ 。利用各坐标系的变换关系得到两航天器之间的平移距离 t_y, t_x, t_z 及单位四元数 4 个分量为:

$$t_y = \sqrt{2} [K_1^2 + (K_3 + K_7)^2 + (K_4 + K_8)^2 + 4K_2^2 + 4K_5^2 + K_6^2]^{-1/2} \quad (1)$$

$$t_x = (U_1 + U_3)t_y / (2f) \quad (2)$$

$$t_z = (V_1 + V_3)t_y / (2f) \quad (3)$$

$$q_0 = \frac{1}{2} \sqrt{(K_1 t_y + 1) + \sqrt{(K_1 t_y + 1)^2 - 16\eta'^2}} \quad (4)$$

$$q_1 = \frac{\eta'}{q_0} \quad (5)$$

$$\eta' = q_0 q_1 = \frac{1}{4} \{ t_y^2 [2K_2(K_3 + K_7) - K_1(K_4 + K_8)] - K_1 t_y \} \quad (6)$$

$$q_2 = [q_0 K_2 t_y - q_1 t_y (K_3 + K_7)] / (q_0^2 - q_1^2) \quad (7)$$

$$q_3 = [q_1 K_2 t_y - q_0 t_y (K_3 + K_7)] / (q_1^2 - q_0^2) \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} K_1 = (U_3 - U_1) / (2af) \\ K_2 = (V_3 - V_1) / (4af) \\ K_3 = (U_1 + U_3 - 2U_2) / (4bf) \\ K_4 = (V_1 + V_3 - 2V_2) / (4bf) \\ K_5 = (U_4 - U_5) / (2af) \\ K_6 = (V_4 - V_5) / (4af) \\ K_7 = (U_4 + U_5 - 2U_2) / (4bf) \\ K_8 = (V_4 + V_5 - 2V_2) / (4bf) \end{cases} \quad (9)$$

1.2 正交比例投影误差修正

上述过程是利用正交比例投影作为透视投影进行近似计算, 以简化计算的过程。为了准确求解, 需要进行如下的修正。具体的过程可参看参考文献[15], 本节只给出结果。

$$q_0 = \frac{1}{2} \sqrt{(K_1 t_y + 1) + \sqrt{(K_1 t_y + 1)^2 - 16\eta'^2}} \quad (10)$$

$$q_1 = \frac{\eta'}{q_0} \quad (11)$$

$$q_2 = [2q_0 K_2 t_y - q_1 t_y (K_3 + K_7)] / 2(q_0^2 - q_1^2) \quad (12)$$

$$q_3 = [2q_1 K_2 t_y - q_0 t_y (K_3 + K_7)] / 2(q_1^2 - q_0^2) \quad (13)$$

式中: $K_3' = K_3 + U_2 / (2ft_y)$, $K_4' = K_4 + V_2 / (2ft_y)$, $K_7' = K_7 + U_2 / (2ft_y)$, $K_8' = K_8 + V_2 / (2ft_y)$; 则方程(13)修正为:

$$\eta' = q_0 q_1 = \frac{1}{4} \{ t_y^2 [2K_2(K_3' + K_7') - K_1(K_4' + K_8')] - (K_4' + K_8') t_y \} \quad (14)$$

根据欧拉角与姿态矩阵元素的对应关系, 可以得到四元数的 4 个分量与航天器相对姿态角 θ (俯仰), ψ (偏航), ϕ (滚动) 的关系如下所示:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin[2(q_0 q_2 - q_1 q_3)] \\ \phi = \arctan \frac{2(q_0 q_1 + q_2 q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \\ \psi = \arctan \frac{2(q_0 q_3 + q_1 q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \end{cases} \quad (15)$$

以上计算过程是在假定相机精确标定和特征光点位置坐标与图像坐标均正确匹配的条件下, 仅采用单目视觉完成的两航天器间相对位姿。

在上述假定条件下此算法得到了较好的估计精度, 姿态角仿真误差在以内, 相对位置最大估计误差为 0.7° 。为了进一步说明单目视觉相对位姿确定算法, 给出其算法流程图如图 2 所示。

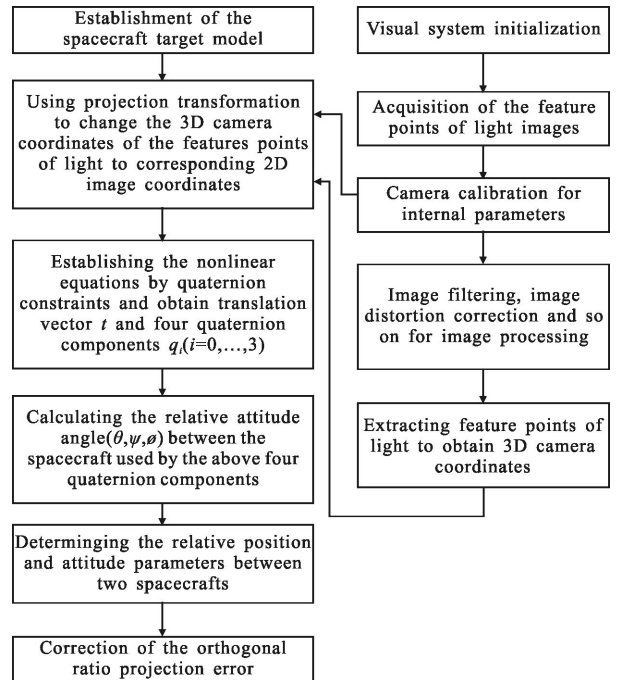


图 2 单目视觉相对位姿确定算法流程图

Fig.2 Flow chart of the relative position-pose determination algorithm based on monocular vision

2 单目视觉与激光测距仪混合的位姿参数估计算法

在单目视觉的实际测量系统中,相机标定和特征光点位置坐标与图像坐标实际匹配必然会在存在误差,这势必使得位姿参数估计精度降低。本节提出利用单目视觉与激光测距仪混合的系统进行航天器间相对位姿参数估计,首先利用上一节的方法估计出两航天器间的位姿参数,再将其获取的6D位姿信息与激光测距仪获取的1D距离信息进行融合,从而进一步提高相对位姿参数的估计精度。

本节的方法参考晁志超等^[16]的方法并加以改进,具体的实现过程如下。将相机与激光测距仪相邻固定,而且相机光轴方向与激光测距仪出光方向基本相同,其基本结构如图3所示。其中 D 为激光出光点, S 为激光打的目标平面的光点, S_1, S_2, S_3 和 S_4 分别为目标航天器上人工设置的特征光点, l 为激光测距仪的测量距离,单位向量 $(n_x, n_y, n_z)^T$ 表示激光出光方向。首先应对二者的空间位置关系进行标定,主要包括激光光点 S 坐标的确定、相机坐标系内激光出光点 D 坐标和单位向量 $(n_x, n_y, n_z)^T$ 参数的确定,具体标定过程参看参考文献^[16]。

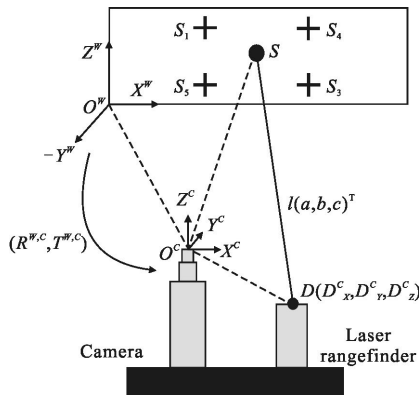


图3 单目视觉与激光测距仪混合系统

Fig.3 Hybrid system of monocular vision and laser rangefinder

然后,在标定之后对相机与激光测距仪两种数据进行融合,具体过程如下。由图3可知,激光出光点 $D(D_x^c, D_y^c, D_z^c)$ 、激光光点 $S(S_x^c, S_y^c, S_z^c)$ 和相机坐标原点 O^c 构成三角形。依据内积的定义可知:

$$\cos\theta = (n_x, n_y, n_z) \cdot \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \frac{-n_x D_x^c - n_y D_y^c - n_z D_z^c}{\sqrt{(D_x^c)^2 + (D_y^c)^2 + (D_z^c)^2}} \quad (16)$$

式中: θ 为向量 DS 与向量 DO^c 的夹角, $(n_x, n_y, n_z)^T$ 、 $(m_x, m_y, m_z)^T$ 分别为 DS 和 DO^c 的单位方向向量。根据三角形余弦定理可知:

$$|O^cS| = [(D_x^c)^2 + (D_y^c)^2 + (D_z^c)^2 + l^2 + 2l(n_x D_x^c + n_y D_y^c + n_z D_z^c)]^{1/2} \quad (17)$$

另一方面,直接计算相机坐标系的激光光点 S 到原点 O^c 的距离:

$$|O^cS| = \sqrt{(S_x^c)^2 + (S_y^c)^2 + (S_z^c)^2} \quad (18)$$

式中:坐标参数 (S_x^c, S_y^c, S_z^c) 可由 (S_x^w, S_y^w, S_z^w) 变换得到。利用上述公式(17)和公式(18)两个方程可将激光测距仪获取的距离 l 与相机得到的位姿参数进行融合,关系如下:

$$t_y = [(D_x^c)^2 + (D_y^c)^2 + (D_z^c)^2 + l^2 + 2l(n_x D_x^c + n_y D_y^c + n_z D_z^c) - r_{21} S_x^w - r_{22} S_y^w - r_{23} S_z^w - (r_{11} S_x^w + r_{12} S_y^w + r_{13} S_z^w + t_x)^2 - (r_{31} S_x^w + r_{32} S_y^w + r_{33} S_z^w + t_z)^2]^{1/2} \quad (19)$$

3 数值仿真

为了验证文中算法获取的航天器位姿参数的有效性,选用Matlab软件对此算法进行如下的数学仿真。仿真的参数按照参考文献^[15]条件进行设置:目标航天器上的特征光点为 $s_i(x_i, y_i, z_i) (i=1 \dots 5)$,并且在目

标坐标系中坐标表示为 $s_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, s_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

$s_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, s_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.5 \end{bmatrix}, s_5 = \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.5 \end{bmatrix}$,相机的焦距 $f=0.1$ m。

为了叙述方便,假定混合系统由于图像特征点提取、摄像机标定等误差产生的位姿参数估计误差如图4所示,下面对航天器间位姿参数进行校正。此时,若激光测距仪在摄像机坐标系内的坐标为 (D_x^c, D_y^c, D_z^c) ,首先利用参考文献^[16]标定的方法对激光光斑在特征光点坐标系内的坐标进行计算,再求取光标出光点在空间物体坐标系内的坐标 (D_x^w, D_y^w, D_z^w) ,

其中特征光点坐标系与世界坐标系重合。利用相机坐标系内与世界坐标系内激光测距仪出光点到光斑点间的距离相等求解两航天器间沿 y 方向的位移,并计算不同距离下该方向的距离估计误差。

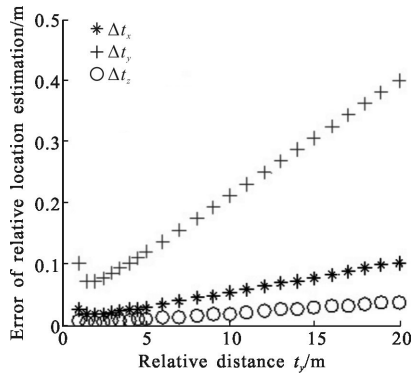


图 4 相机标定等误差条件下的位姿参数测量误差

Fig.4 Posture parameters measurement error under the condition of camera calibration error and other errors

由图 4 可知,沿着光轴方向(与相机坐标系 y 轴重合)的估计误差较大,并且随着两航天器之间距离的增大其误差基本呈线性增加,利用该节所提出的单目视觉与激光测距仪混合的系统对误差进行修正。仿真研究发现:两航天器之间的位置误差与激光测距仪和之间的相对位置参数密切相关,表 1 表明当确保误差小于某一阈值时(10 mm)二者的相对变化关系。由表 1 可知,此节所提出的单目视觉与激光测距仪混合系统能够确保两航天器间沿 y 方向的位置估计误差小于 10 mm,只需要满足激光测距仪相对相机沿着光轴方向移动即可。由于前文已述激光测距仪出光方向与光轴方向基本一致,即激光出光方向与相机光轴基本保持平行,这种近似平行的移动在工程上也很容易实现。

另外,从图 4 可知,由于航天器沿 y 方向的位置估计误差呈抛物线型,故激光测距仪沿着相机光轴方向的平移距离也随两航天器间的距离变化呈抛物线变化。此节对两航天器间沿 x 、 y 和 z 方向的位置估计误差进行了分析, y 方向校正前后的位置估计误差如表 1 所示,其他两个方向 x 、 z 校正前后的位置估计误差的结果如图 5 和图 6 所示。其中,黑色的“星号”代表文中算法修正前的位置估计误差,灰色的“十字”代表文中算法修正后的位置估计误差,仿真结果验证本节所提出的算法可以保证很高的位置

估计精度,能够提高由于图像特征点提取以及摄像机标定带来的位置估计精度。但是实际应用时由于存在噪声等众多影响因素,故不会达到仿真的精度。

表 1 文中算法修正前后两航天器间沿 y 方向的距离误差比较

Tab.1 Comparison of the distance errors along y direction between the two spacecrafts that were amended before and after by the algorithm

No.	Distance of laser rangefinder along optical axis/m	Distance between two spacecrafts along y direction/m	Distance error between two spacecrafts along y direction/m	
			After amended by the algorithm	Before amended by the algorithm
1	0.1	-0.55	0.008 0	0.000 1
2	0.2	-0.25	-0.007 8	0.001 0
3	0.3	-0.12	0.001 2	0.005 7
4	0.4	-0.06	0.004 3	0.027 8
5	0.5	-0.04	-0.006 9	0.143 8
6	0.6	-0.03	0.0003 7	0.600 0
7	0.7	-0.04	-0.007 1	0.289 0
8	0.8	-0.05	-0.002 6	0.171 6
9	0.9	-0.06	0.006 0	0.125 2
10	1.0	-0.08	-0.004 5	0.102 9
11	2	-0.15	0.004 1	0.074 8
12	3	-0.18	0.001 1	0.087 0
13	4	-0.20	0.005 0	0.103 3
14	5	-0.22	0.006 0	0.120 7
15	6	-0.24	0.005 8	0.138 7
16	7	-0.26	0.005 1	0.157 0
17	8	-0.28	0.004 2	0.175 4
18	9	-0.30	0.003 1	0.194 0
19	10	-0.32	0.001 9	0.212 6
20	11	-0.34	0.000 6	0.231 2
21	12	-0.36	0.000 7	0.249 9
22	13	-0.38	-0.002 0	0.268 6
23	14	-0.40	-0.003 3	0.287 4
24	15	-0.42	-0.004 6	0.306 1
25	16	-0.44	-0.005 9	0.324 9
26	17	-0.46	-0.007 2	0.343 7
27	18	-0.48	-0.008 5	0.362 4
28	19	-0.50	-0.009 8	0.381 2
29	20	-0.51	-0.008 4	0.400 0

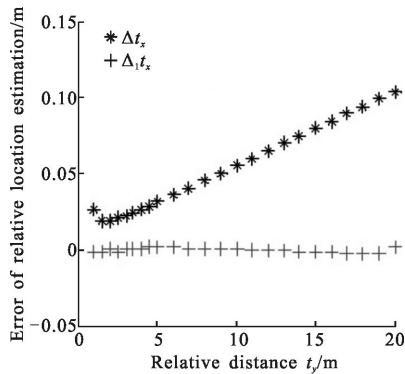


图 5 x 方向校正前后位置参数测量误差

Fig.5 Position parameters measurement errors along x direction before and after correction

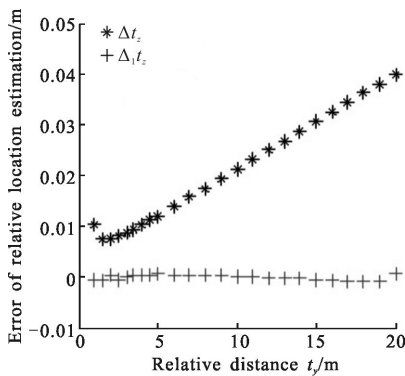


图 6 z 方向校正前后位置参数测量误差

Fig.6 Position parameters measurement errors along z direction before and after correction

4 结 论

文中提出单目视觉与激光测距仪混合的航天器间相对位姿参数估计算法,该算法保证了在相机标定和特征光点提取和匹配误差较大条件下采用单目视觉进行航天器间位姿参数估计精度。相机与激光测距仪采用近似平行的配置形式并且按特定的方式进行平移即可确保位置参数估计误差小于 10 mm。该混合系统的实质是利用激光测距仪得到的高精度距离信息修正单目视觉的位置参数误差。该算法简化了相对位姿参数确定问题的计算过程,计算量小,计算速度快,可以满足航天器交会对接相对位姿参数测量的实时性要求。通过数学仿真,验证了文中提出的交会对接最后阶段相对位姿参数估计算法的可行性和有效性。

参 考 文 献:

[1] John L J, Declan C H, Karim P W, et al. Vision-based

navigation for rendezvous, docking and proximity operations [D]. Cranfield: American Astronomical Society, 1999.

[2] Beard R W, Lawton J, and Hadaegh F Y. A coordination architecture for formation control [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2001, 9(6): 777-790.

[3] Philip N K, Ananthasayanam M R. Relative position and attitude estimation and control schemes for the final phase of an autonomous docking mission of spacecraft [J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52: 511-522.

[4] Lin Laixing, Li Can. CCD camera-based measurement for the final phase of RVD mission [J]. *Journal of Astronautics*, 1994, 15(2): 24-34. (in Chinese)

林来兴, 李灿. 交会对接最后逼近阶段 CCD 相机的测量方法[J]. 宇航学报, 1994, 15(2): 24-34.

[5] Du Xiaoping, Zhao Jiguang, Cui Zhanzhong, et al. Optical method for position-attitude determination between spacecrafts based on computer vision [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6): 664-666. (in Chinese)

杜小平, 赵继广, 崔占忠, 等. 基于计算机视觉的航天器间相对状态测量系统[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 664-666.

[6] Zhang Qingjun, Hu Xiulin, Ye Bin, et al. Binocular vision based relative position and attitude determination between spacecrafts[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1): 156-161. (in Chinese)

张庆君, 胡修林, 叶斌, 等. 基于双目视觉测量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.

[7] Mukundan R, Ramakrishnan K R. A quaternion solution to the pose determination problem for rendezvous and docking simulations [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1995, 39: 143-153.

[8] Zhang Shijie, Cao Xibin, Li Hui. Closed-form method for relative attitude and position parameters of RVD spacecrafts based monocular vision[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(1): 6-10. (in Chinese)

张世杰, 曹喜滨, 李晖. 交会对接航天器间相对位姿参数单目视觉测量的解析算法[J]. 光学技术, 2005, 31(1): 6-10.

[9] Li Jianfeng, Du Xiaoping, Zhang Huixing. The research on spacecraft relative state optical measurement based on quaternion[J]. *Aerospace Control*, 2011, 29(2): 46-51. (in Chinese)

李建锋, 杜小平, 张慧星. 基于四元数的航天器间相对姿态光学测量方法研究[J]. 航天控制, 2011, 29(2): 46-51.

[10] Xu Wenfu, Liang Bin, Li Cheng, et al. The approach and

- simulation study of the relative pose measurement between space-crafts based on stereo vision [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(4): 1421–1428. (in Chinese)
- 徐文福, 梁斌, 李成, 等. 基于立体视觉的航天器相对位姿测量方法与仿真研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1421–1428.
- [11] Wang Baofeng, Li Guangyun, Chen Jihua, et al. Two methods of coded targets used in rendezvous and docking[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1): 162–166. (in Chinese)
- 王保丰, 李广云, 陈继华, 等. 航天器交会对接中测量靶标的两种设计方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 162–166.
- [12] Wilson J R. Satellite hopes ride on orbital express [J]. *Aerospace America*, 2007, 45(2): 30–35.
- [13] Tafazoli M. A study of on-orbit spacecraft failures [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(2/3): 195–205.
- [14] Xu Wenfu, Liang Bin, Li Cheng, et al. Measurement and planning approach of space robot for capturing non-cooperative target[J]. *Robot*, 2010, 32(1): 61–69. (in Chinese)
- 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.
- [15] Feng Chun, Wu Hongtao, Chen Bai, et al. Closed-form method for relative pose parameters between chaser and target spacecraft based on quaternion [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(12): 1655–1660. (in Chinese)
- 冯春, 吴洪涛, 陈柏, 等. 追踪与目标航天器相对位姿参数四元数的解析算法 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(12): 1655–1660.
- [16] Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen, et al. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312001. (in Chinese)
- 晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312001.