

DOI: 10.12086/oe.2018.180126

具有同心圆特征的非合作目标超近距离姿态测量

王珂^{1,2}, 陈小梅^{1,2*}, 韩旭³¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;³中国空间技术研究院钱学森实验室, 北京 100094

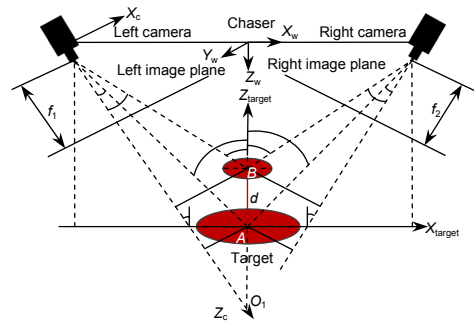
摘要: 常用的非合作目标航天器姿态测量技术往往借助于单目视觉进行迭代或双目视觉进行三维重建, 该类方法在特征匹配过程中会产生误差, 且实时性和准确性较差。针对上述问题, 根据空间非合作飞行器的星箭对接环和发动机喷嘴具有空间平行但不共面的位置关系, 开展了基于同心圆特征的非合作目标超近距离姿态测量模型的研究。通过改进双目视觉测量模型, 完善了模型的角度适应性问题, 提高了模型的适用性。仿真结果显示该算法在超近距离的姿态测量精度优于 0.5° 。

关键词: 非合作目标; 姿态测量; 双目视觉测量; 同心圆

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

引用格式: 王珂, 陈小梅, 韩旭. 具有同心圆特征的非合作目标超近距离姿态测量[J]. 光电工程, 2018, 45(8): 180126



Research on pose measurement between two non-cooperative spacecrafts in close range based on concentric circles

Wang Ke^{1,2}, Chen Xiaomei^{1,2*}, Han Xu³¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;²Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Ministry of Education of China, Beijing 100081, China;³China Academy of Space Technology, Qian Xuesen Laboratory, Beijing 100094, China

Abstract: Conventional measurement of relative poses between two non-cooperative spacecrafts in close range is derived from the iteration of monocular vision or three-dimensional reconstruction of binocular vision, which introduces errors in the process of feature matching, and the timeliness and accuracy are poor. Regarding the issues above, this article tries to do some researches on measurement of relative poses between two non-cooperative spacecrafts in close range based on concentric circles. Here, 'concentric circles' means the spatial parallel but not coplanar positional relationship between docking ring and engine nozzle. Through the binocular vision measurement model, the angle adaptability and the applicability are improved. Then, the algorithm of this model is simulated, and the simulated results show that the accuracy of the algorithm can reach higher than 0.5° .

收稿日期: 2018-03-09; 收到修改稿日期: 2018-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61675022)

作者简介: 王珂(1990-), 男, 硕士, 主要从事机器视觉的研究。E-mail: wk15866287950@163.com

通信作者: 陈小梅(1976-), 女, 博士, 副教授, 主要从事图像处理与目标识别的研究。E-mail: cxiaomei@bit.edu.cn

Keywords: non-cooperative spacecrafts; relative poses measurement; binocular vision measurement; concentric circles

Citation: Wang K, Chen X M, Han X. Research on pose measurement between two non-cooperative spacecrafts in close range based on concentric circles[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(8): 180126

1 引言

随着空间技术的发展,非合作航天器的交会对接任务正成为未来自主航天器的重要应用方向之一。与合作目标相比,非合作目标交会对接的不同主要体现在近距离的逼近阶段,此时服务航天器无法被动获取目标航天器的状态信息且目标航天器上没有辅助测量的标志器,从而增加了在轨服务的难度。因此,针对这类目标,在轨服务的必要前提是解决相对位姿测量问题^[1-2]。

本文研究超近距离(目标卫星与服务卫星之间的距离在 3 m 左右)阶段的交会对接,这个阶段相对位置已基本满足对接要求,此时如果姿态失控,便会造成对接的失败,因此需要着重研究相对姿态的测量。非合作目标的姿态测量方法通常可分为基于模型匹配和基于几何特征两大类。德国宇航中心提出了一种基于库的模型匹配法^[3],近几年国内学者也提出了递推深度模型法、点云模型法等^[4-5]。但以上方法均存在一定的局限性。比如使用模版匹配时,不能保证预存的图像库和设定模版一定匹配,所以匹配误差肯定会存在。使用点云模型时,需要计算整体三维点云信息,运算较为复杂,实时性较差。因此,基于几何特征的方法是一个趋势。常见的几何特征有太阳能帆板支架和星箭对接环,在超近距离交会对接时,目标不完全在相机视场内,故不能对目标的整体轮廓成像;而星箭对接环尺寸大小合适,结构特征突出,可以满足超近距离成像要求,因此基于圆特征的方法被广泛采用。张磊等针对圆的特征,提出了基于单目视觉的位姿测量算法^[6],通过增加约束条件来解决位姿解的二义性问题^[7];徐文福提出了一种双目立体匹配的测量方法^[8-9],结果显示当相对静态位置小于 2 m 时,法向量误差小于 1.5°,精度有待于提高;Sabatini 等人针对对接环和喷嘴的位置关系,提出了基于单目视觉的相对导航方法^[10],该方法数学推导简单,计算效率高,不存在匹配误差和解的二义性问题。但前提是将计算模型限定在二维空间里,即只能在一个平面内改变相对姿态,而且求解过程需要知道对接环、喷嘴的尺寸以及对接环到喷嘴的距离,与实际情况中可以获知的参数差异

较大。

双目视觉是最常用的三维测量系统,测量精度较高^[11]。本文基于 Sabatini 提出的单目视觉相对导航方法,提出了一种改进的双目视觉测量模型,其适用范围由二维空间扩展到三维空间,并分三种不同位置关系求解姿态角。同时结合经典的圆位姿测量几何法^[12]和投影变换关系在无需获知对接环、喷嘴的尺寸以及对接环到喷嘴距离的情况下即可求解非合作目标的相对姿态。

2 双目姿态测量模型

2.1 坐标系定义

本文采用双目视觉的方法进行姿态测量,需要涉及到四个坐标系的转换,分别是世界坐标系(X_w, Y_w, Z_w)、相机坐标系(X_c, Y_c, Z_c)、图像坐标系(X, Y)、像素坐标系(U, V),如图 1 所示。

2.2 测量原理

2.2.1 圆半径和圆心投影位置计算

根据相机成像模型,如图 2 所示,为求解目标圆面的半径和圆心在像面上的投影位置,引入经典圆位姿测量的几何模型^[12],并做简要推导:

一个空间圆平面在不同观测角的投影为椭圆面,且分别与左右眼形成一个最大观测角(largest apex angle, LAA)。最大观测角平面与椭圆面的交线为椭圆的长轴 pq ,与长轴垂直的轴即为短轴 bc 。构建 LAA 角的平分线 GM 为 w 轴, P_{LAA} 平面的法向量为 v 轴,构造 u 轴满足 $u = v \times w$,以 u, v, w 为正交基构造坐标系。旋转摄像机使得 X_c, Y_c, Z_c 与 u, v, w 分别重合,记新的坐标系为 x', y', z' ,如图 3 所示。

在坐标系 $x'y'z'$ 中光心 G 为原点,故其坐标为 $(0, 0, 0)$, p', q', b', c' 在 z' 方向上距原点的距离为 f ,所以 $b' = (0, v'_b, f)$, $c' = (0, -v'_c, f)$,其中 $v'_b = v'_c = f \tan(\angle b'Gc'/2)$ 。根据投影关系引入两个比例系数 α', β' , $B = \alpha'b' = (0, \alpha'v'_b, \alpha'f)$, $C = \beta'c' = (0, \beta'v'_c, \beta'f)$,式中 α, β 由几何模型^[12]可以求解,通过以下比例关系求出圆心 A_1 在像平面上投影点的位置,记为 G_1 : $BM = \alpha'b'm'$, $CM = \beta'c'm'$,

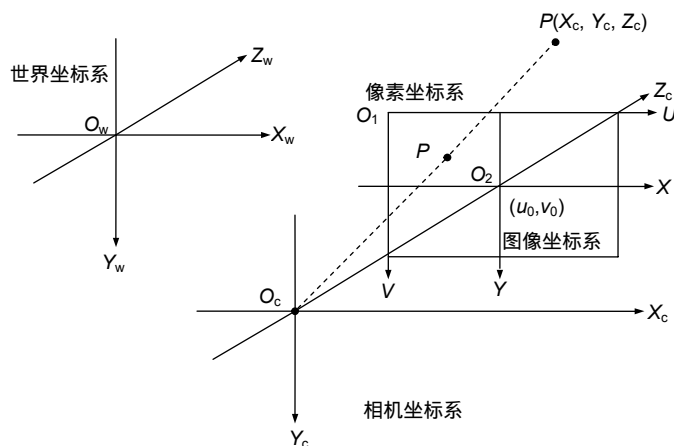


图 1 世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系、像素坐标系之间的关系

Fig. 1 The relationship among world coordinate system, camera coordinate system, image coordinate system and pixel coordinate system

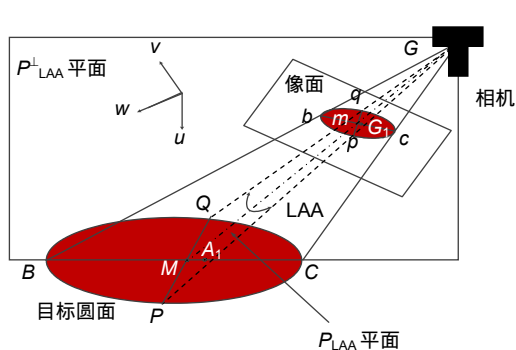


图 2 摄像机观察圆形平面的投影图

Fig. 2 The projection of the circular plane from the camera perspective

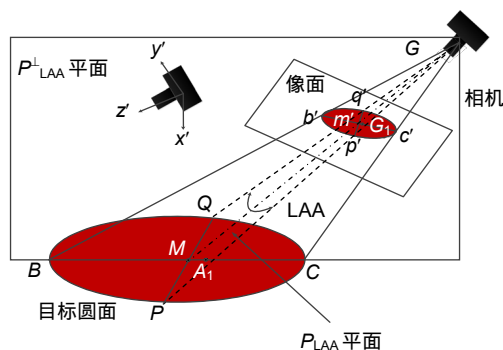


图 3 新坐标系下的投影关系

Fig. 3 The projection relationship under the new coordinate system

$$A_1M = (BM - CM)/2, G_1m' = A_1M/\alpha'$$

同时给出求解半径的方法：根据圆心坐标唯一性原则，即在新坐标系下，通过左右相机所求圆心坐标应为同一值，由此可以列出一个方程组，对于这类问题利用最小二乘法求出最优解^[13]。由于表达式中只有半径 R 是未知量，故可以求得半径的大小。

2.2.2 相对姿态计算

在确定圆心位置和半径的大小后，建立姿态测量模型来求解姿态角。

1) 目标卫星相对于追踪卫星姿态角(绕 Y 轴转动) γ 求解，如图 4 所示。

在 ΔC_1D_1 中， AC_1 可以求得：

$$AC_1 = \frac{C_1D_1}{\cos \beta_1}, \quad (1)$$

在 $\Delta C_1F_1G_1$ 和 $\Delta C_1F_1H_1$ 中， β_1 、 β_2 可以求得：

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{F_1G_1}{f_1}\right), \quad (2)$$

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{F_1H_1}{f_1}\right), \quad (3)$$

C_1D_1 、 C_1E_1 可以通过小孔成像关系求得：

$$C_1D_1 = f_1 \frac{R}{R_1}, \quad (4)$$

$$C_1E_1 = f_1 \frac{r}{r_1}, \quad (5)$$

式中： R 、 r 分别为对接环和喷嘴的半径， R_1 、 r_1 分别为其对应成像大小。

在 ΔC_1E_1B 和 ΔC_1D_1A 中， BE_1 、 AD_1 可以求得：

$$BE_1 = C_1E_1 \cdot \tan \beta_2, \quad (6)$$

$$AD_1 = C_1D_1 \cdot \tan \beta_1, \quad (7)$$

在 ΔO_1E_1B 中， O_1D_1 、 d (对接环到喷嘴的距离)

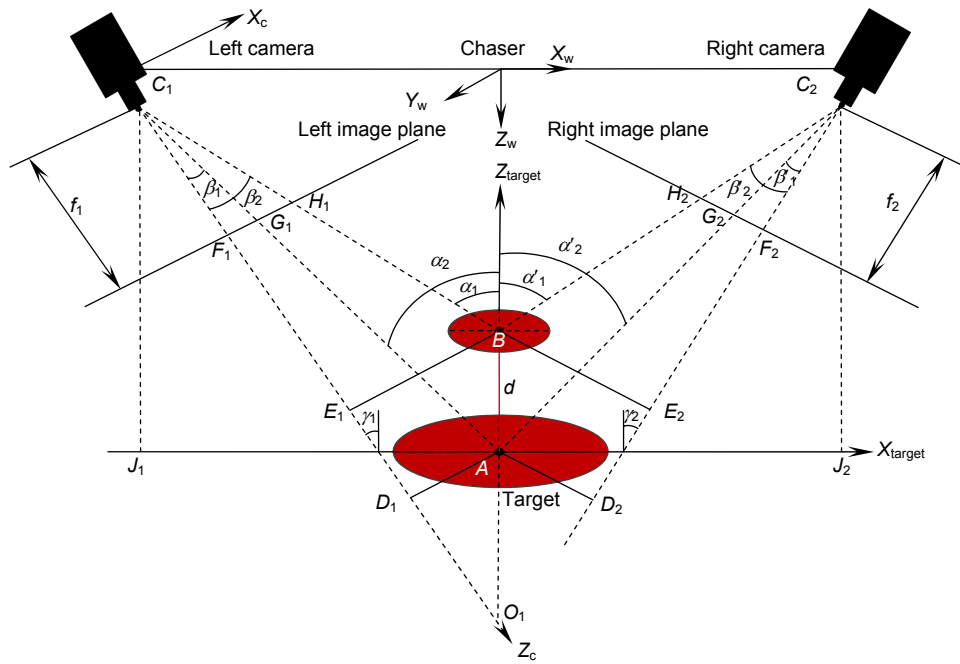


图 4 XZ 平面内的姿态测量模型
Fig. 4 Position measurement model on XZ plane

可以求得：

$$O_1D_1 = \frac{AD_1 \cdot (C_1D_1 - C_1E_1)}{BE_1 - AD_1}, \quad (8)$$

$$d = \sqrt{(O_1E_1^2 + BE_1^2)} - \sqrt{(O_1D_1^2 + AD_1^2)}. \quad (9)$$

Sabatini 提出的模型仅能求解主点 F_1 在 G_1 点斜下方时的姿态角。如果物距为 3000 mm，基线为 1800 mm，光轴与 Z 轴夹角为 20° ，此时主点 F_1 在 G_1 点和 H_1 点之间，用原模型求解姿态角存在较大误差，且只能在一个平面内(如 XZ 平面)改变相对姿态，改进的模型将分以下三种不同的位置关系求解姿态角，并给出了 YZ 平面内的姿态测量模型：

当主点 F_1 在点 G_1 的斜下方，此时 $\beta_2 > \beta_1$ ，在 $\triangle AC_1B$ 中可以求得：

$$\sin \alpha_1 = \frac{AC_1}{d} \sin(\beta_2 - \beta_1), \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 + \beta_2 - \beta_1, \quad (11)$$

$$\gamma_1 = \alpha_1 - \beta_2 = \alpha_2 - \beta_1. \quad (12)$$

当主点 F_1 在 G_1 点和 H_1 点之间，在 $\triangle AC_1B$ 中可以求得：

$$\sin \alpha_1 = \frac{AC_1}{d} \sin(\beta_2 + \beta_1), \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 + \beta_1 + \beta_2, \quad (14)$$

$$\gamma_1 = \alpha_2 + \beta_1 = \alpha_1 - \beta_2. \quad (15)$$

当主点 F_1 在 H_1 点斜上方，此时 $\beta_2 < \beta_1$ ，在

$\triangle AC_1B$ 中可以求得：

$$\sin \alpha_1 = \frac{AC_1}{d} \sin(\beta_1 - \beta_2), \quad (16)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 + \beta_1 - \beta_2, \quad (17)$$

$$\gamma_1 = \alpha_1 + \beta_2 = \alpha_2 + \beta_1. \quad (18)$$

依照以上过程，通过右相机可以求解 γ_2 ，则姿态角 γ 为

$$\gamma = \frac{|\gamma_1 - \gamma_2|}{2}. \quad (19)$$

2) 目标卫星相对于追踪卫星姿态角(绕 X 轴转动) θ 求解，如图 5 所示。

在 $\triangle C_1O_1G_1$ 和 $\triangle C_1O_1H_1$ 中：

$$2 \cdot C_1O_1 \cdot C_1G_1 \cdot \cos \alpha_2 = C_1O_1^2 + C_1G_1^2 - O_1G_1^2, \quad (20)$$

$$2 \cdot C_1O_1 \cdot CH_1 \cdot \cos \alpha_1 = C_1O_1^2 + C_1H_1^2 - (O_1G_1 + G_1H_1)^2, \quad (21)$$

其中：

$$C_1G_1 = \frac{f_1}{\cos \beta_1}, \quad C_1H_1 = \frac{f_1}{\cos \beta_2}, \quad (22)$$

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{f_1}{C_1O_1}\right). \quad (23)$$

同理，通过右相机求出的结果为 θ_2 ，则姿态角 θ

为

$$\theta = \frac{|\theta_1 - \theta_2|}{2}. \quad (24)$$

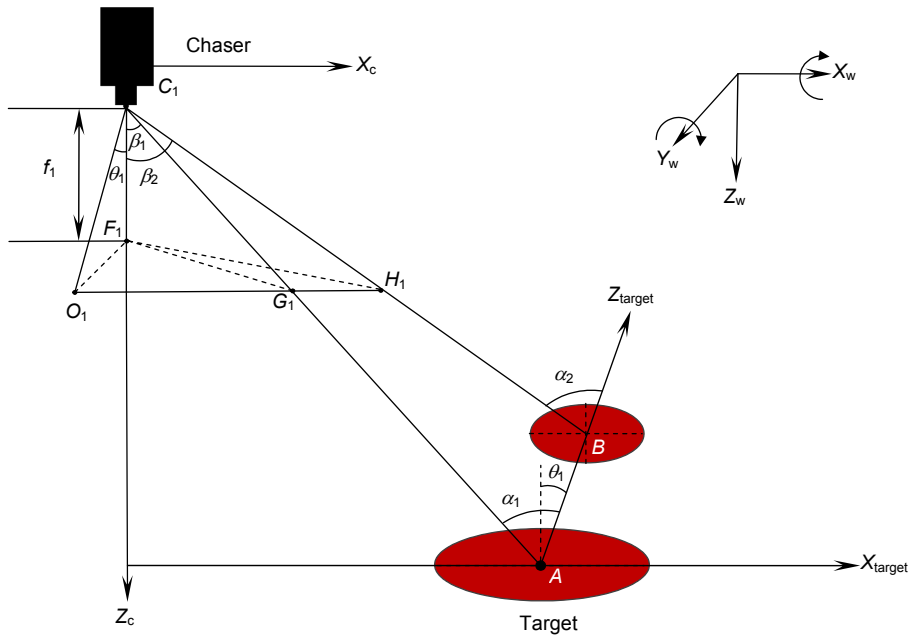


图 5 YZ 平面内的姿态测量模型
Fig. 5 Position measurement model on YZ plane

3 实验结果与分析

为了验证本文提出算法的有效性和测量精度，进行了仿真实验，流程如图 6 所示。在确定目标卫星与追踪卫星的位姿关系下，仿真模拟对接环和喷嘴在左右相机上所成的图像，根据像面上的椭圆参数进行姿态解算。仿真实验是基于某卫星模型，对接环直径为 1120 mm，喷嘴直径为 297 mm，对接环到喷嘴的距离为 500 mm，左右相机对称放置且有效焦距均为 600(即焦距与像元尺寸的比值)，假设主点坐标(像素坐标系下)和畸变都为 0。仿真过程中不考虑相机标定和椭圆边缘拟合的误差，通过改变相机基线、相机光轴与 Z 轴的夹角来研究安装方式对测量精度的影响；改变目标卫星与追踪卫星的相对姿态来研究绕 X、Y 轴的转角对测量精度的影响。

根据对接环境，物距的范围：3000 mm ~ 1600 mm；基线的范围：2600 mm ~ 1000 mm；光轴与 Z 轴夹角的范围：30° ~ 0°。

固定一组参数：物距为 3000 mm，基线为 1800 mm，光轴与 Z 轴夹角为 20°，目标卫星相对于追踪卫星在 XZ 面内顺时针转动 1°，则成像如图 7(a)所示；物距、基线、光轴与 Z 轴夹角均保持不变，目标卫星相对于追踪器在 YZ 面内顺时针转动 1°，则成像如图 7(b)所示。可以看到，当相机光轴与 Z 轴存在夹角，目标卫星与追踪卫星存在相对转动时，目标圆心的投影点一般不在成像椭圆的拟合中心处。

图 8(a)显示在给定相机光轴夹角为 20°，物距为 3000 mm，当基线距从 2600 mm 变化到 1000 mm 时，测量精度与基线距的关系；图 8(b)显示在给定物距为 3000 mm，基线距为 1800 mm，当相机光轴与 Z 轴的

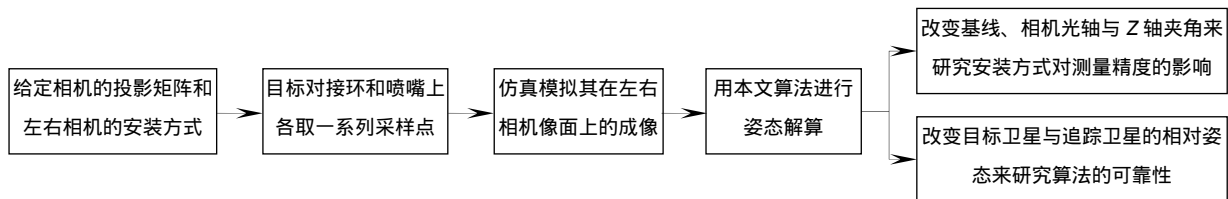


图 6 仿真流程
Fig. 6 The process of simulation

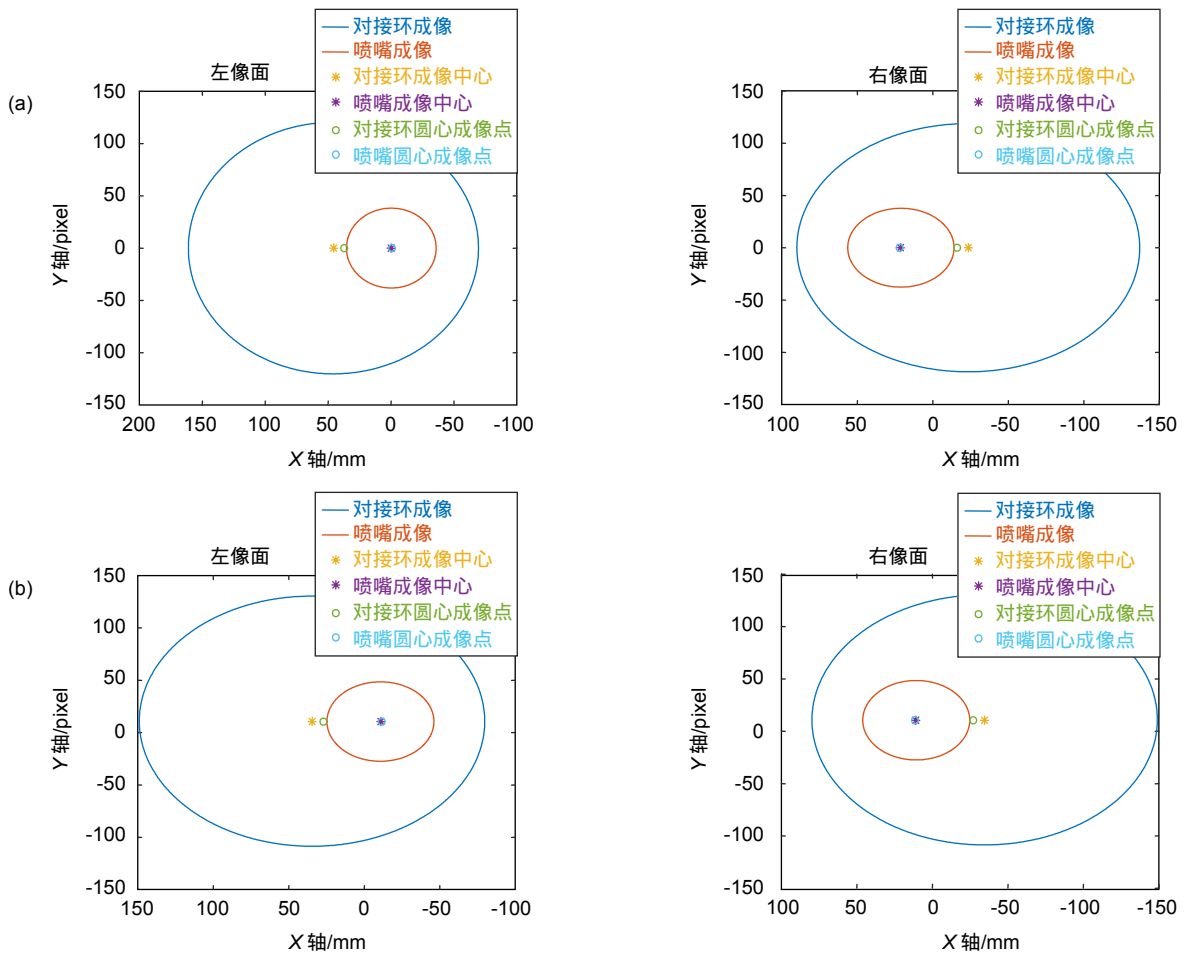


图7 左、右像面成像示意图。(a) 目标卫星相对于追踪卫星在 XZ 面内顺时针转动 1°; (b) 目标卫星相对于追踪器在 YZ 面内顺时针转动 1°

Fig. 7 The imaging diagrams of left and right image planes. (a) The target satellite rotates 1° clockwise in the XZ plane relative to the tracking satellite; (b) The target satellite rotates 1° clockwise in the YZ plane relative to the tracking satellite

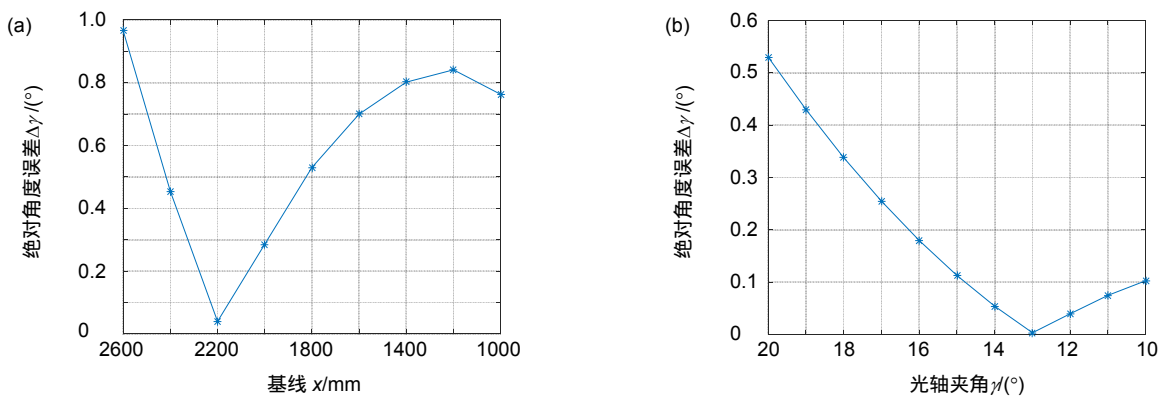


图8 改变基线、光轴与 Z 轴夹角时姿态误差。(a) 误差与基线的关系; (b) 误差与光轴夹角的关系

Fig. 8 The error of the attitude angle when changing the baseline and the angle between optical axis and z axis. (a) The relationship between the error and the baseline; (b) The relationship between the error and the angle of optical axis

夹角从 20°变化到 10°时 测量精度与光轴夹角的关系。可以看出，相对于光轴与 Z 轴夹角，基线距离对于测量精度的影响更大，但整体来看，测量误差均保持在 1°以内。

图 9(a)显示在给定物距为 3000 mm，基线距为 1800 mm，相机与光轴夹角为 20°，当目标卫星相对于追踪卫星在 XZ 面内顺时针转动从 0°变化到 5°时，得到单目、双目测量下的测量精度与绕 Y 轴转角的关系；图 9(b)显示物距、基线距、相机与光轴夹角保持不变，当目标卫星相对于追踪卫星在 YZ 面内顺时针转动从 0°变化到 5°时，得到单目、双目测量下的测量精度与绕 X 轴转角的关系。可以看出，相对于在 YZ 面内转动，在 XZ 面内转动对于测量精度的影响更大，但整体来看，测量误差均保持在 0.5°左右，且双目测量模型测量精度更高，较单目测量模型精度整体提升了

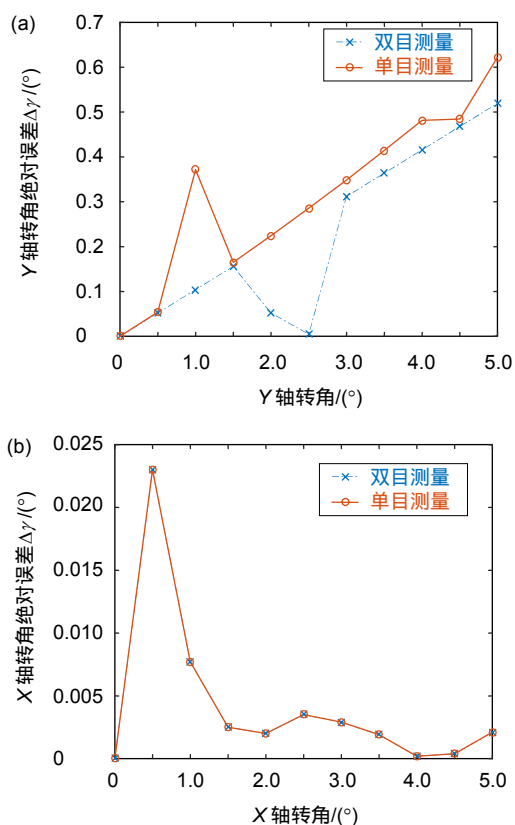


图 9 单目、双目测量下改变绕 X 轴、Y 轴转角对应的姿态误差。(a) 误差与绕 Y 轴转角的关系；(b) 误差与绕 X 轴转角的关系

Fig. 9 The error of the attitude angle by single and binocular measurements respectively when changing the angle of X axis or Y axis. (a) The relationship between the error and the angle around Y axis; (b) The relationship between the error and the angle around X axis

31.27%。

最后，保持物距、基线距、相机与光轴夹角不变，让目标卫星相对于追踪卫星在 XZ 面和 YZ 面内随机生成一组姿态，误差仍优于 0.5°，如图 10 所示。

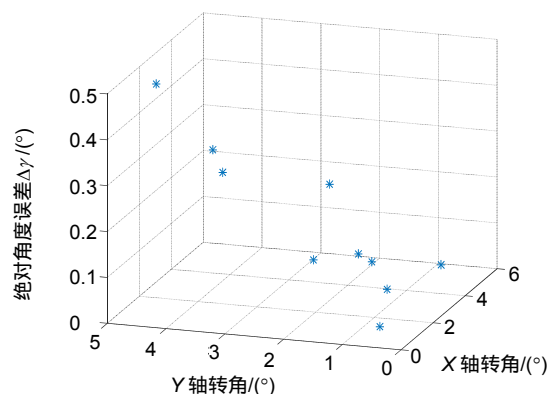


图 10 同时改变绕 X 轴、Y 轴转角时姿态误差

Fig. 10 The error of the attitude angle when changing the angle of X axis and Y axis

4 结论

姿态测量在机器视觉领域有着重要作用，并且其应用领域在未来将进一步拓展，而双目视觉是实现姿态测量的一个重要手段，有着广阔的应用前景。本文提出了一种基于同心圆特征的双目视觉测量模型，与单目测量模型相比较：

- 1) 该模型不但可以求出对接环到喷嘴的距离，而且可以确定对接环和喷嘴圆心在像面上投影点的位置，提高了模型的适用性；
- 2) 该模型可以测量三维的姿态角信息，提高了测量的可靠性；
- 3) 该模型分三种不同的位置关系求解姿态角，完善了模型的角度适应性问题；
- 4) 该模型提高了姿态测量精度。

最后，仿真实验结果证明了本算法对于非合作目标超近距离姿态测量具有可行性，且该算法测量精度优于 0.5°，即使存在一定的安装误差，测量精度也能达到 1°以内。综上，本文模型具有数学推导简单、计算效率高等特点，具有推广意义。

参考文献

[1] Sun Z Y, Gao Y. Relative position and attitude measurement for non-cooperative spacecraft based on binocular vision[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2017, 37(4): 1-6.

- 孙增玉, 高越. 基于视觉技术的非合作航天器相对位姿测量方法[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(4): 1-6.
- [2] Li Y P, Zhao C H, Wang L. Relative position and attitude estimation of non-cooperative spacecraft based on geometric features[J]. *Aerospace Control and Application*, 2015, 41(3): 8-13. 李宜鹏, 赵春晖, 王立. 基于几何特征的非合作目标相对位置和姿态估计[J]. 空间控制技术与应用, 2015, 41(3): 8-13.
- [3] Wingo D R. Orbital recovery's responsive commercial space tug for life extension missions[C]//*Space 2004 Conference and Exhibit*, 2004: 1-8.
- [4] Li Y F, Wang S C, Yang D F, et al. Aerial relative measurement based on monocular reconstruction for non-cooperation target[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2016, 36(5): 48-56. 李永飞, 王仕成, 杨东方, 等. 基于单目三维重构的空间非合作目标相对测量[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(5): 48-56.
- [5] Gui L, Zheng S Y, Cao S Q, et al. Research of pose and altitude measurement for non-cooperative spacecraft based on 3d point clouds[J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, 33(6): 122-128. 桂力, 郑顺义, 曹姝清, 等. 基于点云的非合作航天器位姿测量方法研究[J]. 上海航天, 2016, 33(6): 122-128.
- [6] Zhang L, Xu K J, Zhao R, et al. Improvement of position and orientation measurement algorithm of monocular vision based on circle features[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2009, 32(11): 1669-1673. 张磊, 徐科军, 赵锐, 等. 一种基于圆特征的单目视觉位姿测量算法的改进[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(11): 1669-1673.
- [7] Wei Z Z, Zhao Z, Zhang G J. Solution of duality in pose estimation of single circle using Euclidean angular constraint[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 685-691. 魏振忠, 赵征, 张广军. 空间圆姿态识别二义性的角度约束消除[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 685-691.
- [8] Xu W F, Liang B, Li C, et al. Measurement and planning approach of space robot for capturing non-cooperative target[J]. *Robot*, 2010, 32(1): 61-69. 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.
- [9] Xu W F, Xue Q, Liu H D, et al. A pose measurement method of a non-cooperative GEO spacecraft based on stereo vision[C]//*Proceedings of International Conference on Control Automation Robotics & Vision*, 2012: 966-971.
- [10] Sabatini M, Palmerini G B, Gasbarri P. A testbed for visual based navigation and control during space rendezvous operations[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 117: 184-196.
- [11] Zhang B T, Zhong C L, Wu Q X. A target localization method with monocular hand-eye vision[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170696. 张波涛, 仲朝亮, 吴秋轩. 一种采用单目手眼视觉的目标位置测量方法[J]. 光电工程, 2018, 45(5): 170696.
- [12] Chen Z, Huang J B. A vision-based method for the circle pose determination with a direct geometric interpretation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, 15(6): 1135-1140.
- [13] Cai H. Experiment research of non-cooperative space target relative measurement based on binocular vision[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 72-76. 蔡晗. 基于双目视觉的非合作目标相对测量实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 72-76.

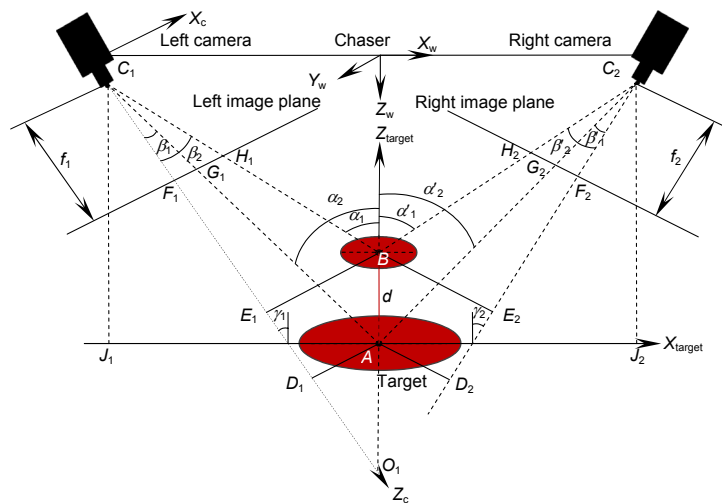
Research on pose measurement between two non-cooperative spacecrafts in close range based on concentric circles

Wang Ke^{1,2}, Chen Xiaomei^{1,2*}, Han Xu³

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Ministry of Education of China, Beijing 100081, China;

³China Academy of Space Technology, Qian Xuesen Laboratory, Beijing 100094, China



Position measurement model in XZ plane

Overview: With the frequent aerospace activities, the damaged and crashed spacecrafts are produced and become uncontrolled non-cooperative targets. They will take up a large number of orbital resources and threaten the safety of astronauts and other satellites. In order to ensure the space activities smoothly, the on-orbit service technology toward non-cooperative targets will become a serious problem that the space powers must face. Compared with cooperative target, the rendezvous and docking of non-cooperative target are different in close range. At this time, the service spacecraft cannot passively acquire the status information of the target spacecraft and the target spacecraft has no luminous sign, which increases the difficulty of on-orbit service. Therefore, the interest in on-orbit servicing missions, together with the well-known challenge of approaching, has pushed the research towards techniques for non-cooperative targets. This paper attempts to do some researches on measurement of relative poses between two non-cooperative spacecrafts in close range based on concentric circles. Here, ‘concentric circles’ means the spatial parallel but not coplanar positional relationship between docking ring and engine nozzle. Without any artificial markings, the algorithm can solve the concentric circle size, the projected positions of the two center points, and the spatial distance between the two circular surfaces. The algorithm solves the problem by dividing the model into three different positional relationships to improve the model’s angular adaptability. The algorithm can get the three-dimensional attitude angle by extending from the monocular model to the binocular model, which improves the reliability of the measurement and expands the scope of its application. Finally, simulation results show that this algorithm is feasible for super short-distance pose measurement.

Citation: Wang K, Chen X M, Han X. Research on pose measurement between two non-cooperative spacecrafts in close range based on concentric circles[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(8):180126

Supported by National Natural Science Foundation of China (61675022)

* E-mail: cxiaomei@bit.edu.cn