

# 基于物距辅助的单站姿态处理方法

胡小丽<sup>1</sup>, 张玉伦<sup>1\*</sup>, 刘彪<sup>1</sup>, 王雨<sup>1</sup>, 张思琪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200;

<sup>2</sup>现代控制技术研究所, 陕西 西安 710054

**摘要** 为了解决靶场姿态测量系统中远距离单站测量易出现不稳定解或解不收敛的难题, 从而为靶场常规中远距离光学单站姿态处理提供可行方案, 在某参与计算特征点物距可获取的前提下, 提出了一种物距辅助的单站姿态信息获取方法; 首先提出物面连续离散化等效计算像长的方法, 在此基础上, 以像长为匹配元素建立单站透视姿态测量模型, 然后以炮管为例对算法进行试验验证, 最后对关键影响因素进行误差分析。结果表明: 偏航角、俯仰角相对真值的均方根误差分别为  $0.97^\circ$ 、 $0.90^\circ$ ; 所提方法可拓展至飞机类非轴对称回转体目标单站飞行姿态的处理。

**关键词** 测量; 摄像测量; 单站姿态; 离散化等效; 物距辅助

中图分类号 TP394.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0612004

## Single-Station Pose-Processing Method Based on Object Distance Assistance

Hu Xiaoli<sup>1</sup>, Zhang Yulun<sup>1\*</sup>, Liu Biao<sup>1</sup>, Wang Yu<sup>1</sup>, Zhang Siqi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Huayin Ordnance Test Center, Huayin, Shaanxi 714200, China;

<sup>2</sup>Institute of Modern Control Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China

**Abstract** An object distance-aided single-station pose information acquisition method is proposed to solve unstable or non-convergence problems existed in minimum-to-long-distance single-station pose measurements on the premise that the object distance of a feature point can be obtained. First, an equivalent method of continuous discretization of object surface is proposed to calculate image length. Second, a single-station perspective pose measurement model is established using image length as the matching element. Then, the algorithm is tested and verified considering barrel as an example. Finally, the error analysis is conduct for the key factors. The results show that the relative root mean square errors of yaw and pitch angles are  $0.97^\circ$  and  $0.90^\circ$ , respectively. The proposed method can be extended to the single-station pose measurement of the non-axisymmetric objects revolving around aircrafts.

**Key words** measurement; videographic measurement; single-station pose; discretization equivalence; object distance assistance

**OCIS codes** 120.4800; 100.296

## 1 引 言

靶场光学姿态测量设备为高速姿态测量系统, 具有准确的相机内、外参数, 通常为中远距离测量, 目标成像相对较小, 特征点较集中。目前对姿态的处理方法基本是基于多站交会处理, 对于单站测量还没有切实可行的解决方案, 文献中的方法<sup>[1-9]</sup>通常适用于近距离小视场, 应用于靶场中远距离姿态测量时很容易无解或解不稳定。当交会站点发生设备故障或视觉遮挡而会造成仅有单站数据源时就会非

常被动, 因此, 迫切需要研究出比较稳定的单站姿态测量算法。

目前, 靶场光学测量设备按用途及作用区域可分为外弹道测量设备与姿态测量设备。外弹道测量设备通常为全弹道跟踪, 焦距短而视场大, 将目标作为质点处理; 而姿态测量设备通常对目标调姿、俯冲攻击等关键段进行姿态测量, 测量前提是目标必须成一定标准的面目标像, 焦距长而视场小, 因此测量快速机动刚体目标时, 很容易造成跟踪失败, 仅单视角采集成功的情况时有发生。本文

收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-01-27; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 军内科研项目(012016018200A22304)

\* E-mail: 94491595@qq.com

立足于靶场多台光学外弹道设备较易获取弹道坐标的前提条件,研究了基于物距辅助的单站姿态信息获取方法。首先提出物面连续离散化等效计算像长的方法,以此为基础,建立关键特征点物距已知的透视投影单站姿态测量模型,并进行试验验证及误差分析,从而为靶场单站姿态测量提供一种新的求解方法。

## 2 物距连续离散化等效匹配像长

姿态处理匹配元素基本基于特征点或线,姿态处理精度受特征点提取精度的影响非常大。为了提高精度以达到姿态测量的目的,采用像长元素进行匹配。根据后续试验及误差量化分析,在试验中所设典型靶场中远距离环境下,即使像长达不到文献[2]和文献[7]所述的标准,其受特征点提取精度的影响也会明显减小,姿态均方根误差仍小于 $1^\circ$ ,完全满足靶场姿态测量的要求。

所提方法的主要思路如下:以承载关键姿态信息(偏航角和俯仰角)的主体中轴为分析对象,以摄像机坐标光心视角为基准,将目标主体中轴进行若干连续微元离散化等效处理,则微元相对于摄像机光心的物面等效为垂直于光轴且经过微元的连续物面,若干微元进行透视投影可得微元像长,积分后可得主体中轴的总像长。其中积分涉及物距上下限,需基准物距已知,此即物距辅助的意义所在。另外,通过实际图像获取主体中轴的像长,两者匹配可获取主体中轴相对于基准物面的关键参数 $\theta$ ,由此获取主体中轴在摄像机坐标系下的姿态,进一步进行坐标转换,便可获取主体中轴在基准坐标系下的姿态信息。其中,根据布站及成像状况来确定关键参数 $\theta$ 的符号,从而获取姿态参数的唯一解。

### 2.1 物距连续离散化等效计算像长

本课题组提出了一种物距连续离散化等效计算像长的方法,即将目标跨度内的物面等效为垂直于光轴的若干连续物面组,将经过目标垂直于主光轴的平面作为近似目标平面组,这样的平面连续且无限多。透视投影为无数个离散目标微元在像面上投影的累加效果,透视投影等效方法示意图如图1所示。其中目标 $AB$ 的长度为 $L$ ,相机内参数中的像元大小为 $a$ (单位为 $\mu\text{m}$ ),焦距为 $f$ (单位为 $\text{mm}$ )。将 $AB$ 等分成若干份,每份为微元 $dr$ ,任意微元到参考物面端点 $A$ 的距离为 $r$ , $\angle BAC = \theta$ , $O_c$ 为摄像机的光心, $O_cM$ 为光轴, $O_cM$ 的长度为 $u$ (单位为 $\text{m}$ ), $dl$ 为微元 $dr$ 的等效像长, $A$ 点成像 $A'(x_1, y_1)$ ,

$B$ 点成像 $B'(x_2, y_2)$ 。

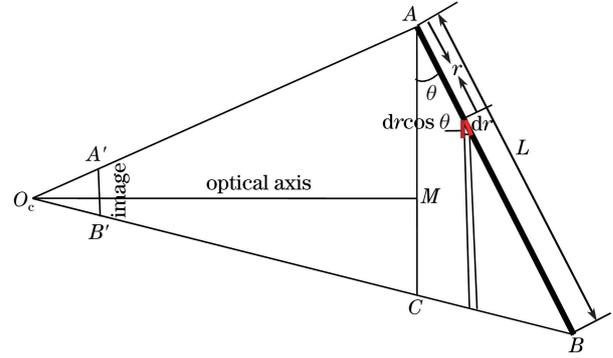


图1 透视投影等效方法示意图

Fig. 1 Equivalent method of perspective projection

任意微元成像满足垂直于光轴平面内物像比相等的原则,即

$$\frac{a + r \sin \theta}{10^{-3} f} = \frac{dr \cos \theta}{dl}. \quad (1)$$

根据从物方投影获取的像长与实际像长相等的原则,可得

$$\int_u^{u+L \sin \theta} dl = 10^{-6} a \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (2)$$

为了进一步提高精度,以目标中心为参考原点,则有

$$a \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = 10^3 f \ln \left( 1 + \frac{L \sin \theta}{u - 0.5L \sin \theta} \right) / \tan \theta. \quad (3)$$

### 2.2 单站姿态模型推导

单站姿态模型推导步骤如下:1)基于(3)式获取关键参数 $\theta$ ;2)基于基准物距 $u$ 及成像信息获取 $A_c$ 与 $B_c$ , $A_c$ 与 $B_c$ 分别为端点 $A$ 、 $B$ 在摄像机坐标系下的坐标;3)计算目标相对于摄像机坐标系下的姿态角(偏航角 $\psi_c$ 和俯仰角 $\varphi_c$ );4)通过进一步旋转坐标系,计算特征矢量在基准坐标系下的方向矢量 $(X, Y, Z)$ 。

旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(Z_c, \beta) \mathbf{R}(Y_c, \alpha), \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为摄像机坐标系相对于基准坐标系的方位、俯仰角(光轴指向角); $Y_c$ 、 $Z_c$ 分别为摄像机坐标系下的 $Y$ 坐标与 $Z$ 坐标; $\mathbf{R}(Z_c, \beta)$ 、 $\mathbf{R}(Y_c, \alpha)$ 分别为摄像机坐标系向基准坐标系旋转 $\beta$ 角与 $\alpha$ 角的旋转矩阵。

则姿态角(偏航角 $\psi$ 和俯仰角 $\varphi$ )为

$$\begin{cases} \psi = \arctan \frac{Z}{X} \\ \varphi = \arctan \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \end{cases}. \quad (5)$$

### 3 算法验证

为了验证算法的精度,在靶场距离姿态测量系统测试点位 1.7 km 左右处放置 122 mm 口径榴弹炮的炮管,以炮管为目标进行测量和验证,采用内部中心稳瞄、首尾外设信标的双保险方式定向获取炮管的姿态真值,精度优于  $0.01^\circ$ 。姿态测量系统对炮管进行静态或动态扫描拍摄,获得了一系列不同角度值的测量图像,其中的两组如图 2 所示。其中,姿态测量系统内、外参数设置如下:拍摄频率为 100 frame/s,可见光高速电视分辨率为  $1536 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,焦距为 1523.1 mm,所研究的关键段长约为 2.655 m。所提方法的结果与理论值的对比如表 1 所示。由表 1 可知,在试验设置条件下,偏航角的均方根误差为  $0.97^\circ$ ,俯仰角的均方根误差为  $0.90^\circ$ ,满足靶场姿态测试需求。

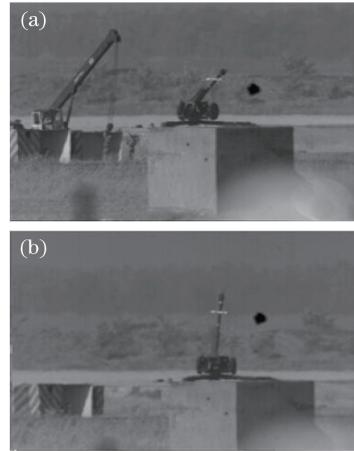


图 2 炮管序列中被处理过的首帧和末帧图像。

(a) 炮管角度设置 1; (b) 炮管角度设置 2

Fig. 2 First and last processed frames in gun barrel sequence. (a) One angel setting of gun barrel; (b) another angel setting of gun barrel

表 1 所提方法的结果与理论值的对比

Table 1 Comparison between results of proposed algorithm and theoretical values

Pose setting station	Perspective value /( $^\circ$ )		Theoretical value /( $^\circ$ )		Error /( $^\circ$ )	
	Yaw angle	Pitch angle	Yaw angle	Pitch angle	Yaw angle	Pitch angle
1	4.11	29.50	4.78	30.00	-0.67	-0.50
2	6.07	44.54	4.78	45.00	1.29	-0.46
3	6.81	53.71	4.78	54.00	2.03	-0.29
4	19.95	58.41	19.78	60.00	0.17	-1.59
5	19.04	44.04	19.78	45.00	-0.74	-0.96
6	19.33	28.79	19.78	30.00	-0.45	-1.21
7	35.43	29.51	34.78	30.00	0.65	-0.49
8	35.09	43.84	34.78	45.00	0.31	-1.16
9	35.03	59.50	34.78	60.00	0.25	-0.50
10	48.40	29.11	49.78	30.00	-1.38	-0.89
Root mean square error					0.97	0.90

### 4 误差影响因素分析

根据姿态计算过程,所有中间环节涉及的因素可用式(6)表示。为确定代表性测试环境下主要影响因素的量化误差,从而指导实际测试和布站,对(6)式中涉及的主要影响因素进行代入值分析。其他系统参数经过了精确标校,影响因素可以不予考虑。

$$\begin{cases} \psi = f(u, f, L, x_1, x_2, y_1, y_2, \alpha, \beta) \\ \varphi = g(u, f, L, x_1, x_2, y_1, y_2, \alpha, \beta) \end{cases} \quad (6)$$

主要误差影响因素分析如下:

1) 基准物距  $u$  的测量误差。以算法验证中的第 1 副场景作为研究对象,基准物距测量误差对姿态角误差的影响如图 3 所示,其中横轴为基准物距测量误差,纵轴为偏航角和俯仰角误差。由图 3 可知,在此环境下,物距测量误差对偏航角和俯仰角测量误差的影响呈单调上升的趋势,且对偏航角的影响大于对俯仰角的影响,10 m 物距误差的影响小于  $0.5^\circ$ 。由于目前靶场外弹道测量设备的精度在 1 m 以内,因此该项误差可控制在  $0.1^\circ$  以内。

2) 焦距  $f$  的测量误差。图 4 所示为焦距测量误差对姿态角误差的影响,其中横轴为焦距测量误

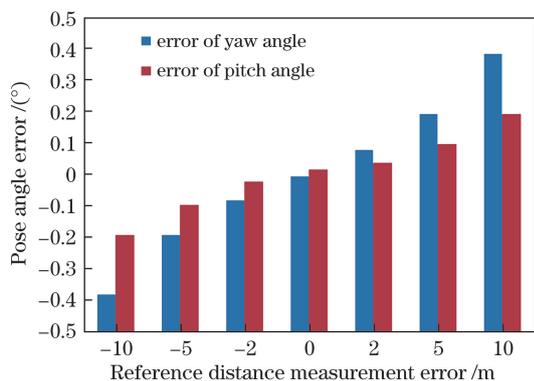


图 3 基准物距测量误差对姿态角误差的影响  
Fig. 3 Effect of reference distance measurement error on pose angle error

差,纵轴为偏航角和俯仰角误差。由图 4 可知:焦距测量误差严重影响姿态测量结果,其对姿态角误差的影响呈单调上升的趋势,对偏航角的影响大于对俯仰角的影响;当焦距测量误差为 0.05 时,姿态角测量误差最大可达  $3^{\circ}$ 。由于设备经过出场标校、靶场检测等,焦距测量误差的影响可控制在较小的范围内,因此该测量误差对姿态测量结果的影响不大。

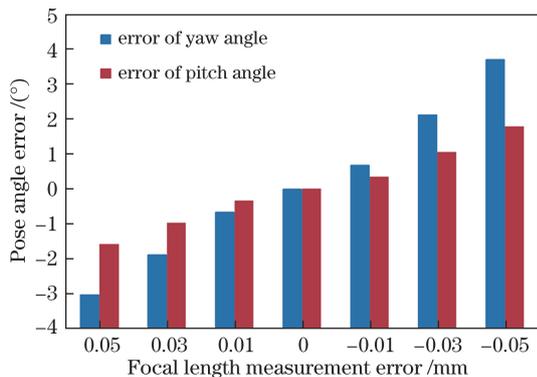


图 4 焦距测量误差对姿态角误差的影响  
Fig. 4 Effect of focal length measurement error on pose angle error

3) 关键特征直线长度  $L$  的测量误差。图 5 所示为  $L$  测量误差对姿态角误差的影响,可知, $L$  测量误差严重影响姿态测量结果, $L$  测量误差对偏航角的影响大于对俯仰角的影响。从目前的制造工艺及计量精度考虑, $L$  测量误差可控制在毫米级,因此该测量误差可控制在  $0.5^{\circ}$  以内。

4) 像点提取误差。图 6 所示为像点提取误差对姿态角误差的影响,其中横轴分别为端点 A 在  $x$ 、 $y$  方向的像点提取误差,纵轴为偏航角和俯仰角误差。由图 6 可知:偏航角误差随  $x$  方向像点提取误差呈单调上升的趋势,而俯仰角误差则几乎不受  $x$  方向像点提取误差的影响; $y$  方向像点提取误差

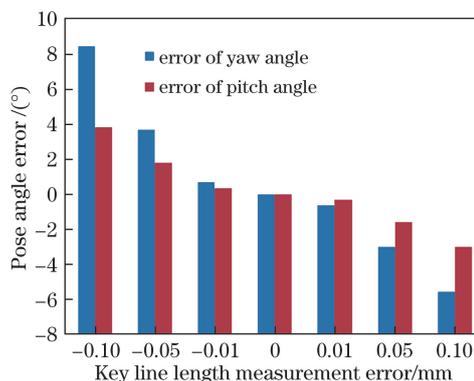


图 5 关键特征直线长度测量误差对姿态角误差的影响  
Fig. 5 Effect of key line length measurement error on pose angle error

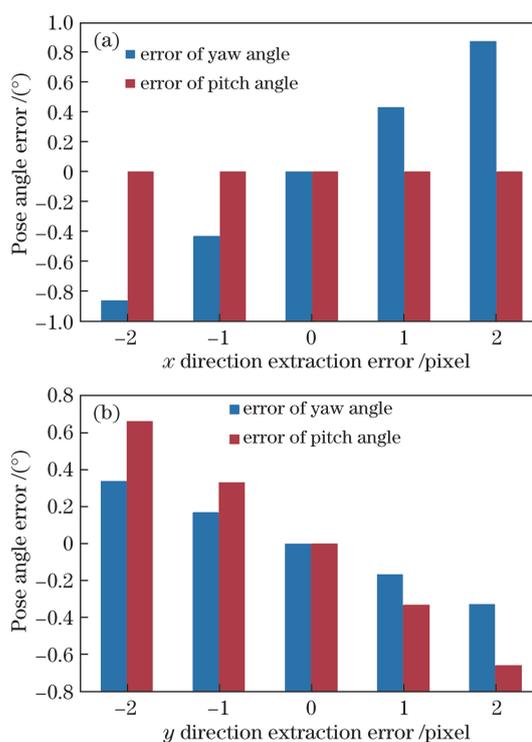


图 6 像点提取误差对姿态角误差的影响。(a)  $x$  方向提取误差的影响;(b)  $y$  方向提取误差的影响  
Fig. 6 Effect of image point extraction error on pose angle error. (a) Effect of  $x$  direction extraction error; (b) effect of  $y$  direction extraction error

会同时影响偏航角和俯仰角误差,随着  $y$  方向像点提取误差增加,姿态角误差单调递增,且  $y$  方向像点提取误差对俯仰角误差的影响大于对偏航角误差的影响。

5) 光轴指向误差。图 7 所示为光轴指向误差对姿态角误差的影响,横轴分别为方位、俯仰指向误差,以极限标准  $200''$  为限,纵轴为偏航角和俯仰角误差。由图 7 可知,光轴指向误差对姿态角的影响小于  $0.1^{\circ}$ ,几乎可以忽略。

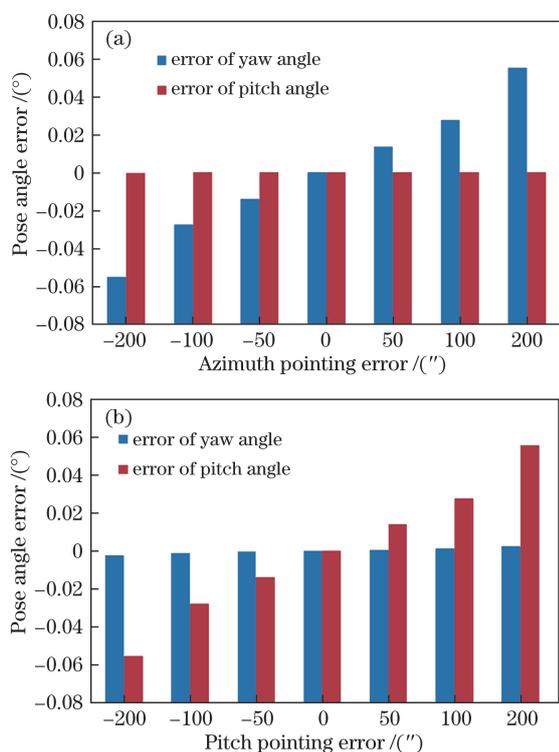


图7 光轴指向误差对姿态角误差的影响。

(a) 方位指向误差的影响; (b) 俯仰指向误差的影响

Fig. 7 Effect of optical axis pointing error on pose angle

error. (a) Effect of azimuth pointing error;

(b) effect of pitch pointing error

综上所述,姿态角误差影响因素按影响程度由大到小的顺序依次为 $L$ 测量误差、 $f$ 测量误差、 $u$ 测量误差、像点提取误差,光轴指向误差可忽略不计。根据目前设备标校的精度, $L$ 与 $f$ 均可得到相对准确的测量,因此,误差来源主要为 $u$ 测量误差以及像点提取误差。

## 5 结 论

为解决单站中远距离姿态测量不可靠的问题,本课题组提出了一种物面连续离散化等效计算像长后再进行匹配的方法,通过试验验证了所建模型的可用性,误差分析为实际测试提供了量化基准。同时,提出了物面连续离散化等效计算像长的方法,为单站特征参数测量提供了理论基础;建立了关键特征点物距已知的单站姿态测量模型,在先验条件及测量系统参数准确可控的前提下,以像长为匹配元素,通过炮管试验证明了方法的精度可控性;对主要影响因素进行了误差分析,为实际单站姿态测试提供了指导;该方法普遍适用于轴对称回转体刚体目标,也可拓展至非轴对称回转体刚体目标。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao R J, Liu E H, Zhang W M, *et al.* Measurement of 3D pose of objects based on weak perspective model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(5): 0512002.  
赵汝进, 刘恩海, 张文明, 等. 基于弱透视成像模型的目标三维姿态测量[J]. *光子学报*, 2014, 43(5): 0512002.
- [2] Wang K P, Zhang X H, Yu Q F. Measuring cooperative target's pose based on proportions of feature points[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(6): 974-978.  
王鲲鹏, 张小虎, 于起峰. 基于目标特征点比例的单站图像定姿方法[J]. *应用光学*, 2009, 30(6): 974-978.
- [3] 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.
- [4] Haralick B M, Lee C N, Ottenberg K, *et al.* Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(3): 331-356.
- [5] Wang F, Jiang C G, Zheng N N, *et al.* Camera pose estimation based on angle constraints[M] // *Bebis G, Boyle R, Parvin B, et al. Advances in Visual Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 6453: 96-107.
- [6] Kneip L, Scaramuzza D, Siegwart R. A novel parametrization of the perspective-three-point problem for a direct computation of absolute camera position and orientation[C] // *CVPR 2011, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA*. New York: IEEE, 2011: 2969-2976.
- [7] Tang Z L, Ma C W, Liu B, *et al.* A approach of determination of object's 3D pose from mono-view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(12): 1480-1485.  
唐自力, 马彩文, 刘波, 等. 单站光测图像确定空间目标三维姿态[J]. *光子学报*, 2004, 33(12): 1480-1485.
- [8] Zhu F, Yu F S, Wu Y M, *et al.* Analysis of attitude calibration precision of P4P camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1115005.  
朱帆, 于芳苏, 吴易明, 等. P4P法相机姿态标定精度分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1115005.
- [9] Wu B, Ye D, Guo Y B, *et al.* Multiple circle recognition and pose estimation for aerospace applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0915004.  
吴斌, 叶东, 郭玉波, 等. 基于航天应用的多圆特征识别和姿态估计[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0915004.