

红外零位走动量测量中的相机姿态自适应补偿

李延凤, 安志勇, 王劲松, 何小璇

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为提高红外零位走动量测量精度, 针对测量过程中相机姿态变化误差引起的图像定位精度不高问题, 提出了一种 CCD 相机姿态小角度变化自适应补偿方法。通过理论分析, 推导出相机姿态解算公式, 建立了 CCD 相机姿态解算数学模型, 然后基于某型红外瞄具零位走动量测量系统, 分别针对三种相机姿态, 对瞄具分划线在参考坐标系中的坐标进行了对比实验。结果表明, 测量精度优于 0.01 mil, 能减小相机倾斜对红外瞄具零位走动量测量带来的误差, 为提高零位走动量测量精度提供了一种相机姿态自适应补偿的新方法。

关键词: 姿态校正; 相机姿态; 零位走动量; 自适应补偿; 红外瞄具

中图分类号: TH39; TH272 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1500-06

Camera position adaptive compensation in infrared zero momentum measuring

Li Yanfeng, An Zhiyong, Wang Jinsong, He Xiaoxuan

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to improve the measurement precision of infrared zero momentum, specific to the problem that the image positioning accuracy caused by camera pose changing was not high, an adaptive correction algorithm of CCD camera pose small angle changing was proposed. Through the theoretical analysis, a mathematical model of the CCD camera pose calculation was established and a camera pose calculation formula was deduced. According to the infrared sight aiming baseline variation detection system, specific to the three kinds of camera pose, a contrast experiment that aiming baseline coordinate was measured in the reference coordinate system was completed. The results show that the calculating precision is 0.01 mil or less. and camera pose adaptive correction algorithm can decrease the error of the infrared sights zero momentum measurement caused by camera tilt, which provided a new method of camera position adaptive compensation for enhancing zero momentum measurement precision.

Key words: attitude correction; camera position; zero momentum; adaptive compensation; infrared sights

收稿日期: 2014-09-13; 修订日期: 2014-10-14

基金项目: 科技型中小企业技术创新基金(11c26212200565); 吉林省重大专项科技发展计划(20100610)

作者简介: 李延凤(1985-), 女, 博士生, 主要从事精密仪器检测技术方面的研究。Email: yannianyishou@126.com

导师简介: 安志勇(1943-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密仪器检测及光电技术检测方面的研究。Email: an_zhiyong@126.com

0 引言

随着红外技术的飞速发展, 红外瞄具越来越受到人们关注, 它不仅能有效识别伪装, 还能提高夜间作战武器装备的命中率, 逐渐成为各兵工厂家争先生产的主流瞄具。武器射击过程中, 由于瞄具物镜、分划板或装卡导轨等零部件的松动、变形或环境温度急剧变化都易引起瞄具的瞄准基线发生变化, 影响武器的命中精度, 因此新研制的红外瞄具在投入批量生产前, 必须进行严格的检测和试验, 将零位走动量控制在指标要求范围内。国内各兵工厂、科研院所普遍使用传统零位仪进行检测, 需通过移动准直仪的分划板, 借助目视仪器读数, 检测耗时、数字化程度低, 无法满足当前红外瞄具高效率、智能化的检测需求。近几年来, 随着光电技术及数字图像处理技术的飞速发展, 虽然也有方法^[1-6]采用 CCD 采集及数字判读技术进行检测, 但测量过程中由于相机倾斜导致的检测精度不高问题迟迟没有得到解决。

文中基于机器视觉技术, 采用图像判读方式对红外瞄具零位走动量进行测量。设计了相机姿态自适应补偿方法, 能有效抑制由相机倾斜引入的测量误差, 进一步提高红外瞄具零位走动量测量精度。

1 系统组成及零位走动量测量方法

红外瞄具零位走动量测试系统由反射式平行光管、CCD 相机及其安装组件和计算机图像判读分系统组成, 其中反射式平行光管包括黑体、靶标、离轴抛物面反射镜及平面反射镜。系统组成图如图 1 所示。

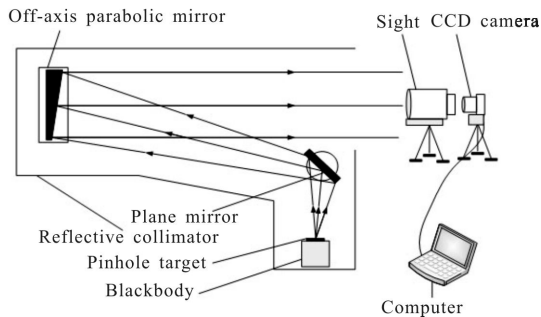


图 1 系统组成图

Fig.1 System composition diagram

将被测红外瞄具安置在瞄具安装座上, 对准红外平行光管的主光轴, 可以从其目镜视场内观察到

靶标及其瞄准分划。CCD 相机物镜放置在被测瞄具的出瞳位置, 将被测红外瞄具的目镜视度调节到零视度, 通过适当调节 CCD 相机镜头的光圈及焦距可采集到清晰的靶标及瞄具分划图像, 图像判读分系统根据采集到的图像判读红外瞄具瞄准分划在靶标构成的测量参照系中的位置, 将第一次判读的瞄具分划位置 $S(x_s, y_s)$ 记为零位。取下瞄具, 经过射击、震动、高低温等一系列试验后再次装卡, 测量其分划位置 $T(x_t, y_t)$, 将其代入公式(1)、(2):

$$\theta_x = \arctan(x_s/f_p) - \arctan(x_t/f_p) \quad (1)$$

$$\theta_y = \arctan(y_s/f_p) - \arctan(y_t/f_p) \quad (2)$$

得出 X 方向、Y 方向的走动量。其中 θ_x 、 θ_y 为 X、Y 方向的零位走动量; f_p 为平行光管焦距, 且 $f_p=1\ 500\ \text{mm}$ 。

2 相机姿态变化对测角精度的影响

理想的零位走动量测量方法如下: 如图 2 所示, 瞄具两次装卡后, 测得瞄具分划线在坐标系 $X_1O_1Y_1$ 中的坐标 $S(x_s, y_s)$ 和 $T(x_t, y_t)$, 代入公式(1)、(2)即可测得零位走动量。

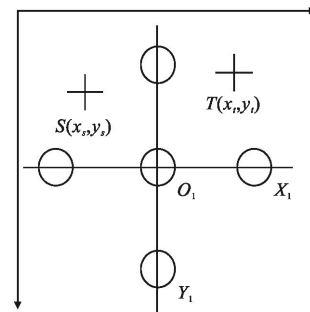


图 2 瞄具的零位走动量示意图

Fig.2 Sight baseline aiming variation schematic diagram

然而在实际测量中, 由于测量环境的震动或应测量场地更换需求, 测量仪器在搬运过程中易引起相机姿态微小变化; 另外, 待测瞄具需重复装卡, 由于待测瞄具型号、大小不一, 若瞄具体积很大, CCD 相机有可能妨碍瞄具装卡, 即需将 CCD 相机取下, 待瞄具装卡后再将相机复位, 此过程也会引起相机姿态变化。综上所述, 这些因素都会在不同程度上使得相机倾斜, 且难以避免。若相机倾斜后仍按理想情况下的测量方法进行测量, 势必会引入误差。图 3 所示为相机倾斜后的测量示意图。

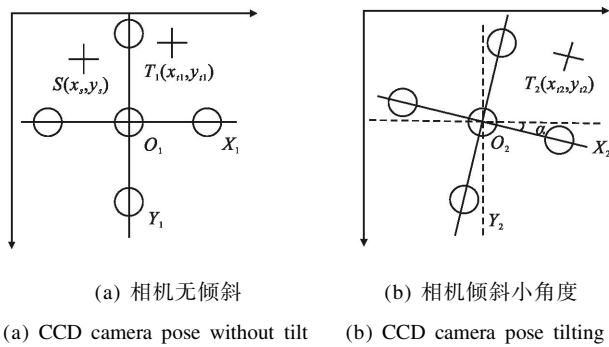


图 3 CCD 相机姿态变化对比图

Fig.3 Comparison of CCD camera pose change diagram

瞄具第一次装卡后,由图像判读软件测得,分划中心在坐标系 $X_1O_1Y_1$ 中的坐标为 $S(20.2, -6.7)$ 。第二次装卡后,如果 CCD 相机位置和姿态不变,如图 3(a)所示,测得的分划中心坐标为 $T_1(15.5, -6.2)$,代入公式(1)、(2)得出 X 方向和 Y 方向的零位走动量 θ_{x1} 、 θ_{y1} :

$$\theta_{x1} = \arctan(x_s/f_p) - \arctan(x_{n1}/f_p) = 3.282 \text{ mil} \quad (3)$$

$$\theta_{y1} = \arctan(y_s/f_p) - \arctan(y_{n1}/f_p) = 0.245 \text{ mil} \quad (4)$$

如果 CCD 相机倾斜一小角度,如图 3(b)所示,由于相机倾斜,使得坐标系 $X_1O_1Y_1$ 发生了偏转,若不进行相机姿态校正,仍以图 3(a)所示的坐标系 $X_1O_1Y_1$ 为参考坐标系,测得的分划中心坐标为 $T_2(10.1, -5.6)$,代入公式(1)、(2)得出瞄具瞄准基线变化量 θ_{x2} 、 θ_{y2} :

$$\theta_{x2} = \arctan(x_s/f_p) - \arctan(x_{n2}/f_p) = 7.067 \text{ mil} \quad (5)$$

$$\theta_{y2} = \arctan(y_s/f_p) - \arctan(y_{n2}/f_p) = 0.769 \text{ mil} \quad (6)$$

由公式(3)~(6)可知,相机无倾斜和倾斜时测得 X 方向走动量分别为 3.282 mil 和 7.067 mil, Y 方向分别为 0.245 mil 和 0.769 mil,显然,测量数据差别很大,对零位走动量测量引入了误差,因此需对相机姿态进行补偿,将补偿后的坐标系作为参考坐标系才能提高零位走动量测量精度。

3 相机姿态自适应补偿方法实现

摄像机坐标系是以相机光心为原点,相机光轴为 Z 轴,图像的 X、Y 轴为坐标系的 X、Y 轴。若相机倾斜,则摄像机坐标系发生偏转,即瞄具分划线在摄像机坐标系下的坐标也相应改变,而它在世界坐标系中的坐标并未发生变化,因此,为避免相机倾斜对测量造成的影响,可以将摄像机坐标系变换到始终不变的世界坐标系。假设空间中一点 P 在世界坐标系

和摄像机坐标系下的齐次坐标分别为 $(x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 和 $(x_c, y_c, z_c, 1)^T$,则可通过公式(7)实现摄像机坐标系和世界坐标系之间的变换:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \times \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:R 为 3×3 正交单位矩阵;T 为 3 维平移向量, $0=(0, 0, 0)^T$; M_1 为两个坐标系之间的联系矩阵。

虽然通过公式(7)可以实现坐标系变换,但要使相机姿态得到自适应补偿,前提是五个圆形光斑构成的坐标系是一个标准坐标系。在红外图像形成过程中,由于受黑体控温精度、准直系统中反射镜的畸变、红外辐射源的辐射不均匀等因素^[7-8]影响,易使圆形光斑的形状和大小发生变化,很难保证五个圆形光斑构成的坐标系就是一个标准坐标系。

文中设计的相机姿态自适应修正方法,不仅能将摄像机坐标系统一到世界坐标系,还能较好地五个圆形光斑构成的坐标系还原成标准坐标系,其具体算法如下:通过重心法^[9-13]求得五个圆形光斑中心坐标 $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 、 $C(x_C, y_C)$ 、 $D(x_D, y_D)$ 、 $E(x_E, y_E)$,以 DE 为横轴,AB 为纵轴,建立直角坐标系,如图 4 所示。

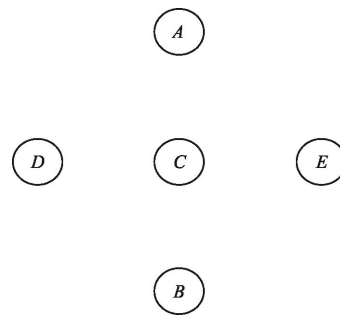


图 4 由靶标点确定的坐标系

Fig.4 Coordinate system determined by target points

将 $D(x_D, y_D)$ 、 $E(x_E, y_E)$ 两点坐标代入公式(8):

$$k_1 = \frac{y_E - y_D}{x_E - x_D} \quad (8)$$

得到横轴 DE 所在直线的斜率 k_1 ,即新坐标系的横轴斜率 k_1 。将横轴旋转 90°,由公式(9)

$$k_2 = -\frac{1}{k_1} \quad (9)$$

得到纵轴斜率 k_2 。

分别将 A、B、C、D 和 E 五个靶标点的横、纵坐标代入公式(10)和公式(11):

$$x_0 = (x_A + x_B + x_C + x_D + x_E) / 5 \quad (10)$$

$$y_0 = (y_A + y_B + y_C + y_D + y_E) / 5 \quad (11)$$

得到五个靶标点的中心点坐标 $P(x_0, y_0)$ 。

利用点到直线的距离公式及靶标点坐标 $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 、 $C(x_C, y_C)$ 、 $D(x_D, y_D)$ 、 $E(x_E, y_E)$, 分别得出 A、B 到纵轴距离的平方 Δ_{AY}^2 和 Δ_{BY}^2 , C、D 到横轴距离的平方 Δ_{DX}^2 和 Δ_{EX}^2 :

$$\Delta_{AY}^2 = \frac{(x_A * k_2 - (1024 - y_A) + y_0 - k_2 * x_0)^2}{1 + k_2^2} \quad (12)$$

$$\Delta_{BY}^2 = \frac{(x_B * k_2 - (1024 - y_B) + y_0 - k_2 * x_0)^2}{1 + k_2^2} \quad (13)$$

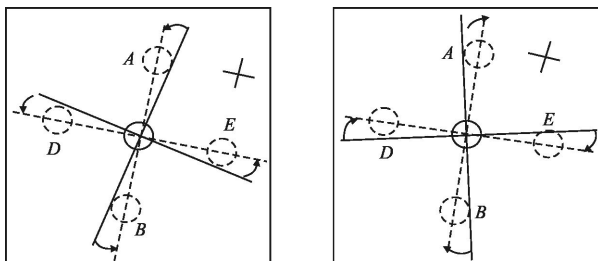
$$\Delta_{DX}^2 = \frac{(x_D * k_1 - (1024 - y_D) + y_0 - k_1 * x_0)^2}{1 + k_1^2} \quad (14)$$

$$\Delta_{EX}^2 = \frac{(x_E * k_1 - (1024 - y_E) + y_0 - k_1 * x_0)^2}{1 + k_1^2} \quad (15)$$

联合公式(12)~(15)得到公式(16):

$$\Delta_{\text{总}} = \Delta_{AY}^2 + \Delta_{BY}^2 + \Delta_{DX}^2 + \Delta_{EX}^2 \quad (16)$$

通过顺时针和逆时针旋转拟建立的坐标系, 如图 5 所示。



(a) 逆时针旋转坐标轴

(b) 顺时针旋转坐标轴

(a) Anticlockwise rotation of coordinate axis

(b) Clockwise rotation of coordinate axis

图 5 相机姿态校正示意图

Fig.5 Correction of camera pose schematic diagram

依次遍历搜索区, 分别计算出逆时针和顺时针搜索时的距离平方和最小值 $\Delta_{\text{总 min}}$ 和 $\Delta'_{\text{总 min}}$, 由公式(17)得出最佳斜率 K :

$$K = \{K_i | \min\{\Delta_{\text{总 min}}, \Delta'_{\text{总 min}}\}, i=1, 2, \dots, 400\} \quad (17)$$

式中: $i=1, 2, \dots, 400$ 限定了搜索范围, 是一经验值, 对于小角度倾斜来说足矣。 K 即新坐标系横轴斜率, 代入公式(9)推算出纵轴斜率为 $-1/K$, 进而得出新坐

标系的横、纵坐标轴, 求得新坐标系下的瞄具分划线的坐标, 代入公式(1)、(2)即可推算出瞄具零位走动量。

4 实验及结果分析

为验证该方法的正确性及稳定性, 将该方法应用于某型红外瞄具零位走动量检测系统, 图 6 所示为测量软件界面。

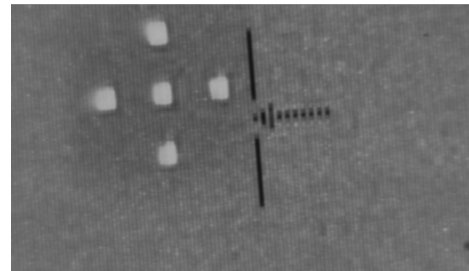
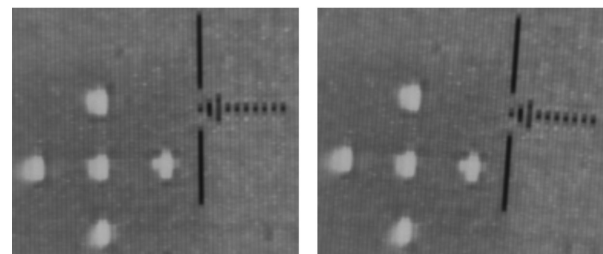


图 6 测量软件界面

Fig.6 Measuring software interface

首先, 分别将 CCD 相机保持与铅垂面大致平行, 如图 7(a)所示, CCD 相机顺时针旋转大约 9° , 如图 7(b)所示, 将 CCD 相机逆时针旋转大约 11° , 如图 7(c)所示。

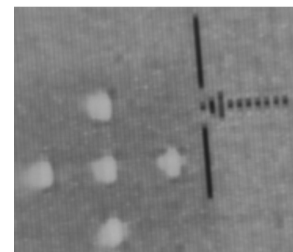


(a) 相机无倾斜

(b) 将相机顺时针旋转 9°

(a) Camera without tilt

(b) Camera rotated clockwise 9°



(c) 将相机逆时针旋转 11°

(c) Camera rotated anticlockwise 11°

图 7 三种相机姿态的实测图

Fig.7 Three kinds of camera pose measured drawing

然后应用文中提出的解算方法, 针对这三种相

机姿态下,分划中心到靶标点确定的坐标系横轴 X 和纵轴 Y 的角位移 θ_x 、 θ_y ,进行对比测量,实验数据如表 1 所示。

表 1 对比实验数据表

Tab.1 Contrast experiment data table

Order number	Zero momentum θ_x and θ_y when CCD camera is tilted angle of α/mil					
	$\alpha \approx 0^\circ$		$\alpha \approx 9^\circ$		$\alpha \approx -11^\circ$	
	θ_{x1}	θ_{y1}	θ_{x2}	θ_{y2}	θ_{x3}	θ_{y3}
1	8.30	3.81	8.30	3.80	8.31	3.80
2	8.31	3.82	8.31	3.81	8.30	3.81
3	8.30	3.81	8.29	3.80	8.30	3.80
4	8.32	3.81	8.30	3.79	8.29	3.82
5	8.30	3.81	8.29	3.80	8.31	3.80
6	8.31	3.80	8.30	3.81	8.31	3.81
7	8.30	3.81	8.30	3.79	8.30	3.80
8	8.31	3.81	8.30	3.81	8.31	3.82
9	8.30	3.80	8.29	3.80	8.30	3.81
10	8.30	3.80	8.31	3.79	8.31	3.80
Average value	8.305	3.808	8.299	3.80	8.304	3.807
σ	0.007 1	0.006 3	0.007 4	0.008 2	0.007	0.008 2

由表 1 可知,CCD 相机无倾斜、CCD 相机顺时针倾斜 9° 及逆时针倾斜 11° 时测得 θ_x 分别为 8.305 mil、8.299 mil 和 8.304 mil,相机倾斜与无倾斜时的测试数据相比,最大偏差为 0.006 mil,最小偏差为 0.001 mil, θ_y 分别为 3.808 mil、3.80 mil 和 3.807 mil,相机倾斜与无倾斜时的数据相比,最大偏差为 0.008 mil,最小偏差为 0.001 mil。由测量数据的标准差可知, $\sigma \leq 0.0082$,重复性良好。因此,测量过程中,无论相机倾斜与否,应用该方法可以有效减小相机倾斜对零位走动量测量引入的误差,提高零位走动量的测量精度。

5 结 论

文中设计了一种 CCD 相机姿态小角度变化自适应补偿方法,利用自适应补偿代替坐标系变换,建立相机姿态解算新模型,并将其应用于红外瞄具零位走动量测量中。然后针对相机无倾斜和倾斜小角度的情况进行了对比实验,结果表明,该方法易操

作、快捷有效,测量精度优于 0.01 mil,能够使相机姿态得到较好的修正,解决了由相机倾斜引入零位走动量测量误差无法剔除的难题,对提高红外瞄具零位走动量测量精度具有重要的理论意义和实用价值。

参考文献:

- [1] Lu Jun, Li Qinghui, Jiang Hua. Measure method of the attitude of UAV based on the optical image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 102–106. (in Chinese)
陆钧,李庆辉,姜华.基于光测图像的无人机姿态测量方法[J].红外与激光工程,2008,37(1):102–106.
- [2] Wang Feng, Cao Jianzhong, Zhou Renkui, et al. Image processing method used in flying objects pose measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(11): 1780–1783. (in Chinese)
王锋,曹剑中,周仁魁,等.飞行目标姿态测量中的图像处理方法[J].光子学报,2006,35(11):1780–1783.
- [3] Tong Xiaomin, Zhang Yanning, Yang Tao. Robust object tracking based on adaptive and incremental subspace learning [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(12): 1483–1494. (in Chinese)
仝小敏,张艳宁,杨涛.基于增量子空间自适应决策的目标跟踪[J].自动化学报,2011,37(12):1483–1494.
- [4] Zhao Rujin, Zhang Qiheng, Xu Zhiyong, et al. A method of measuring attitude based on inclined angle of the line between feature points[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(2): 320–324. (in Chinese)
赵汝进,张启衡,徐智勇,等.一种基于特征点间线段倾角的姿态测量方法[J].光子学报,2010,39(2):320–324.
- [5] Tobias O, Seara R. Image segmentation by histogram thresholding using fuzzy sets [J]. *Transaction on Image Processing, IEEE*, 2002, 11(12): 1457–1465.
- [6] Liu Zhongling, Yu Zhenhong, Geng Jianjun, et al. Target detection in infrared image based on morphological filter algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 249–252. (in Chinese)
刘忠领,于振红,耿建君,等.基于形态滤波的红外图像目标检测方法[J].红外与激光工程,2013,42(S1):249–252.
- [7] Xia Qing, Hu Zhenqi, Wei Beilei, et al. New edge detection method for images of infrared thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 318–322. (in Chinese)
夏清,胡振琪,位蓓蕾,等.一种新的红外热像仪图像边缘检测方法[J].红外与激光工程,2014,43(1):318–322.
- [8] Ai Rui, Shi Zelin, Zhang Chengshuo. Line segment detection

- in low -SNR infrared image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 278-284. (in Chinese)
- 艾锐, 史泽林, 张程硕. 低信噪比红外图像直线段检测算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 278-284.
- [9] Su Xinzhu, Ji Hongbing, Gao Xinbo. Detection method for dim small IR targets based on mathematical morphology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33 (3): 307-310. (in Chinese)
- 苏新主, 姬红兵, 高新波. 一种基于数学形态学的红外弱小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 307-310.
- [10] Cai Weike, Wen Gongjian, Xi Fei, et al. A method for pose estimation based on single camera and object model [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(3): 513-518. (in Chinese)
- 蔡伟柯, 文贡坚, 习飞, 等. 一种基于模型的单相机姿态估计方法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(3): 513-518.
- [11] Cao Yu, Feng Ying, Zhao Lishuang, et al. Effect of attitude installation error of camera on precision of monocular visual odometry [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(12): 23-30. (in Chinese)
- 曹毓, 冯莹, 赵立双, 等. 相机姿态安装误差对单目视觉定位精度的影响[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(12): 23-30.
- [12] Zhang Dexin, Ma Guangfu, Qu Guozhi. Calculation attitude disturbance image motion of one aerial reconnaissance CCD camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(3): 27-33. (in Chinese)
- 张德新, 马广富, 曲国志. 某型航帧 CCD 相机姿态扰动像移计算[J]. 光电工程, 2010, 37(3): 27-33.
- [13] Singh A, Pettersson R L, Karlholm J M. A two-stage approach for target identification and pose estimation in infrared images[C]//SPIE, 2004, 5613: 177-188.