

晃动平台上对空拍摄大视场摄像机的标定方法

关棒磊^{1,2} 孙祥一^{1,2} 尚 洋^{1,2} 于起峰^{1,2}

¹国防科学技术大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

²图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 针对晃动平台上对空拍摄大视场摄像机难以标定的情况,提出了利用无人机(UAV)作为动态控制点来现场标定摄像机参数的方法。该方法控制无人机在摄像机视场内飞行,并用与晃动平台固联的无人机定位测量系统对无人机位置进行测量,从而整个飞行过程中的无人机位置均可当作控制点对摄像机进行标定。实验中控制点数目充足,易满足控制点在空间和图像上均匀分布的要求,可以准确求解摄像机内外参数。突破了无法在视场中布设传统像机标定方法所需控制点,使晃动平台上大视场摄像测量无法现场采集参考图像进行高精度标定的局限。对实验条件要求低,最少只需要晃动平台基准坐标系下2个基准点和方位像机光心位置即可标定摄像机内外参数。该方法已成功应用于系泊状态下船舶中摄像机参数的标定。

关键词 测量; 摄像机标定; 晃动平台; 大视场; 无人机

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0712003

A Camera Calibration Method for Large Field Camera Pointing at Sky on Sway Platform

Guan Banglei^{1,2} Sun Xiangyi^{1,2} Shang Yang^{1,2} Yu Qifeng^{1,2}

¹College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

²Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A camera parameters field calibration method using dynamic control points created by unmanned aerial vehicle (UAV) is presented for large field camera difficult to calibrate air photograph on sway platform. The camera continuously shoots images when UAV is flying at the field of view, the position of UAV is measured by the designed system fixed on the sway platform, thus all the UAV's positions in the entire flight are used as control points for camera calibration, and the control points are easily distributed in space or in the calibration image rationally, the camera parameters are solved accurately by using the sufficient number of control points and images. The proposed method overcomes the contradiction that the condition of traditional camera calibration methods often cannot be constructed in some field experiments. The proposed camera calibration method requires low field experimental conditions that demand a minimum of coordinates of two reference points and azimuth camera optical center in the reference coordinate system on sway platform. The proposed method is successfully used in applications, such as calibrating the camera in the berthed ship.

Key words measurement; camera calibration; sway platform; large field; unmanned aerial vehicle

OCIS codes 120.3940; 280.3400; 150.1488; 150.5670

1 引 言

摄像测量技术基于摄像机等设备对目标成像,测量目标的结构、运动参数等,以及各种运动、变化过程

收稿日期: 2015-01-12; 收到修改稿日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(11332012)

作者简介: 关棒磊(1991—),男,博士研究生,主要从事位姿估计、计算机视觉等方面的研究。E-mail: banglei0909@126.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,中国科学院院士,主要从事空天图像测量与视觉导航方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

行测量方面应用广泛、优势突出^[1],如飞机着舰训练中运动参数的采集等。高精度标定摄像机参数是进行高精度摄像测量的基础。摄像机标定的任务是通过实验和计算确定像机参数,包括主点、焦距等内参数、描述摄像机安装位置、姿态的外参数和描述镜头畸变的像差系数。摄像机标定的实施方式有两大类:1)通过平行光管、精密转台等专用设备进行标定^[2];2)用摄像机拍摄标定参照物,即标定靶标的图像,再通过分析图像来求解像机参数^[3-4]。方法1)在实验室内精确标定摄像机内参数和像差系数,用于测量时还需要对摄像机的外参数进行标定,或者通过精确加工安装给出外参数。而方法2)通过分析靶标图像中参照物的空间坐标和对应像点的图像坐标直接得到摄像机内、外参数和像差系数,更适应于实际测量中现场调整摄像机焦距、安装位置、安装姿态角度等使用需求。

野外摄像测量实验中,会遇到这样的情形:摄像机已经固定安装在晃动平台上,对空拍摄且不易拆卸,需要现场标定摄像机的内参数和相对于晃动平台的外参数。例如摄像机装备在大型船舶中,用于测量飞行器着舰过程中的运动参数,摄像机作为测量设备需要定期进行检验标定,特别是经过维修后,必须进行标定。由于船舶不可能经常进船坞,所以摄像机标定工作必须能在系泊或航行状态中标定出摄像机相对于船体坐标系的参数。船舶等晃动平台上对空拍摄摄像机的标定,主要存在以下两个问题:1)由于视场内无场景信息,难以获得与晃动平台关系精准已知的控制点;2)高空区域中架设在视场区域和摄像机图像上都散布合适的控制点不现实,需要搭建数米甚至数十米的塔架,工程实施代价高。

由于无法达到自标定所需要的场景约束和运动约束条件^[5-6]、立体标定所需要的强立体条件^[7-8]、或者平面靶板标定所需要的绝对共面条件^[9],自标定方法或传统标定方法难以实施。另外,基于平面镜反射的摄像机标定方法能够利用非视场内控制点标定摄像机参数,但需要平面镜多次运动调整^[10],在外场实验中并不适用。因此要解决此类问题,必须人为地在待标定摄像机视场内创造控制点,本文提出了利用无人机(UAV)作为动态控制点,标定晃动平台上对空拍摄大视场摄像机参数的新思路和方法,并设计了由方位像机和宽波束激光测距仪组成无人机定位测量系统,用于测量无人机在该系统坐标系(即方位像机坐标系)下的三维坐标。由于无人机定位测量系统安装在晃动平台上,与晃动平台固联关系不变,最终将整个飞行过程中的无人机位置均可当做异面控制点标定晃动平台下的大视场摄像机参数。实验中无人机轨迹可以根据待标定摄像机视场进行调整,易满足控制点在空间和图像上都均匀散布的要求。该方法对标定实验条件要求低,最少只需要晃动平台基准坐标系下2个基准点和方位摄像机光心位置即可标定摄像机内外参数。

2 无人机定位测量系统

2.1 无人机定位测量系统的硬件构成

无人机定位测量系统用于测量无人机飞行过程中的位置参数,其设备硬件主要包括:方位摄像机、宽波束激光测距仪、棱镜、全球定位系统(GPS)同步控制器、图像采集控制及数据采集计算机等,系统设备实物如图1所示。由于窄波束激光测距仪与转台等跟踪系统配合的定位方法无法在晃动平台上跟踪测量无人机坐标,故系统选用宽波束激光测距仪。方位摄像机和宽波束激光测距仪固联在同一测量平台,两者安装位置距离较近。棱镜安装在无人机机身下部。方位摄像机按照固定频率采集无人机图片,用于测量无人机的方位,参数进

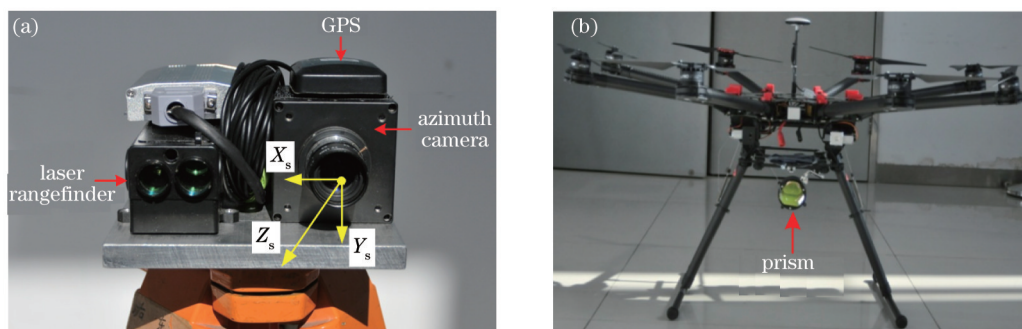


图1 无人机定位测量系统设备组成。(a) 无人机定位测量系统;(b) 无人机及棱镜

Fig.1 Constitute of the measurement system for UAV positioning. (a) Measurement system for UAV positioning; (b) UAV and prism

并以方位像机坐标系为系统坐标系 $O_s - X_s Y_s Z_s$;宽波束激光测距仪以相同的频率测量无人机的距离,其测量范围为以光束为轴线的圆锥。该系统的主要工作流程是计算机通过 GPS 同步控制器,控制高速摄像机和激光测距仪同步工作,获取无人机的方位和距离信息,进一步解算无人机各时刻在该系统坐标系下的三维坐标。

2.2 无人机定位测量系统的定位原理

事先在实验室内标定无人机定位测量系统中方位像机的内参数^[9],其中图像主点为 (C_x, C_y) ,等效焦距为 (F_x, F_y) ,设获取的无人机在第 k 帧图像中的坐标为 (x_k, y_k) , $k = 1, 2, \dots, m$,则可算得其对应的方位角 θ_h^k 和俯仰角 θ_v^k :

$$\begin{cases} \theta_h^k = \arctan\left(\frac{x_k - C_x}{F_x}\right) \\ \theta_v^k = \arctan\left(\frac{y_k - C_y}{F_y}\right) \end{cases} \quad (1)$$

在无人机上安装的反射棱镜,用于反射宽波束激光测距仪发射的激光光束,获取无人机的距离 D 。考虑到无人机到方位像机的距离要远远大于激光测距仪和方位像机之间的安装距离,因此两者的安装距离可以忽略不计。结合无人机的方位信息,即可求出第 k 帧无人机在系统坐标系 $O_s - X_s Y_s Z_s$ (即方位像机坐标系)的位置坐标分别为

$$\begin{pmatrix} X_s^k \\ Y_s^k \\ Z_s^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D \cos \theta_v^k \sin \theta_h^k \\ D \sin \theta_v^k \\ D \cos \theta_v^k \cos \theta_h^k \end{pmatrix} \quad (2)$$

3 标定对空拍摄大视场像机

3.1 标定思路

摄像机固联在晃动平台,平台随着时间存在刚体变化,如图 2 所示,图中实线表示晃动前的平台,虚线表示晃动后的平台,实心三角标志表示的晃动平台上基准点, C 表示相机。主要的标定思路如下:1) 在晃动平台上架设无人机定位测量系统,确保方位像机能够看到平台上 2 个以上基准点,平台与无人机定位测量系统固联关系不变;2) 控制无人机在摄像机视场与无人机定位测量系统测量范围的公共区域内飞行,无人机定位测量系统与摄像机同步采集各时刻无人机图像和距离信息,图中展现了带棱镜无人机的飞行轨迹;3) 处理得到无人机在无人机定位测量系统坐标系下的三维坐标,根据晃动平台基准坐标系下 2 个基准点和方位像机光心位置,计算系统坐标系 $O_s - X_s Y_s Z_s$ 与基准坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 的转化关系,可求得各时刻无人机在晃动平台基准坐标系下的坐标,利用整个飞行过程中的无人机位置当做控制点标定摄像机参数。

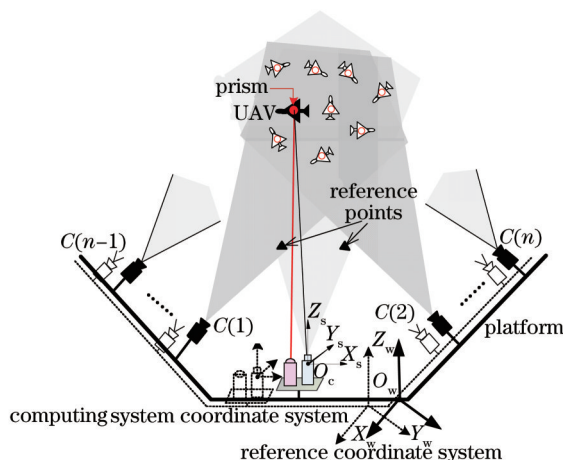


图 2 摄像机标定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of camera calibration

3.2 无人机定位测量坐标系与基准坐标系的转化

已知无人机定位测量系统中方位摄像机内参和像差系数,方位像机光心和2个以上基准点在平台基准坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 中的坐标,即能解算方位摄像机在基准坐标系中的像机姿态。具体过程如下:

设基准点在基准坐标系中的坐标 X_i 为 $(X_i, Y_i, Z_i)^T$, $i = 1, 2, \dots, n$, $n \geq 2$ 。方位摄像机光心在基准坐标系中的坐标 X_{o_c} 为 $(X_{o_c}, Y_{o_c}, Z_{o_c})^T$, 则基准点在将基准坐标系原点平移到摄像机光心的坐标系下的坐标 $X'_i = (X'_i, Y'_i, Z'_i)^T$ 为

$$X'_i = X_i - X_{o_c}. \quad (3)$$

由光心指向基准点的单位方向向量 X'_i 为

$$X'_i = \frac{1}{\sqrt{X_i'^2 + Y_i'^2 + Z_i'^2}} (X'_i, Y'_i, Z'_i)^T. \quad (4)$$

方位摄像机中基准点对应的像点坐标 $(x_i, y_i, 1)^T$, 其归一化图像坐标 $(x_{d_i}, y_{d_i}, 1)^T$, 从光心到像点的单位方向向量 x_i 为

$$x_i = \frac{1}{\sqrt{x_{d_i}^2 + y_{d_i}^2 + 1^2}} (x_{d_i}, y_{d_i}, 1)^T. \quad (5)$$

在满足中心透视投影模型假设的前提下,光心、像点和物点满足共线方程,即三点共线,因此单位方向向量 x_i 、 X'_i 满足如下关系式

$$X'_i = R x_i. \quad (6)$$

为保证旋转矩阵 R 的单位正交性,采用方法是 Cayley 变换^[11],已知摄像机光心坐标,当基准点及其对应像点个数 $n \geq 2$ 时,组成超定线性方程系

$$[x + X'_i] \omega = x - X'_i, \quad (7)$$

式中 $[x + X'_i]$ 表示三维列向量的反对称矩阵, ω 为像机姿态矩阵 R 带角度大小的旋转轴矢量。

第 k 帧时刻,计算无人机在基准坐标系的位置 X_w^k

$$X_w^k = R^{-1} \times X_s^k + X_{o_c}. \quad (8)$$

3.3 标定大视场摄像机参数

基于空间坐标已知的控制点标定像机的方法和算法是经典的、常用的像机标定方法。首先线性求解像机的线性参数,然后考虑摄像机的像差模型,其中像差系数的初值设为0,对摄像机参数初值进行迭代优化。目标函数为各时刻无人机位置坐标进行投影得到的重投影像点与实际像点之间的偏差最小化,即重投影误差函数达到最小化,表达式为

$$F = \min \sum_{k=1}^m \left\| \tilde{x}_k - \tilde{x}(A, K, R, T, X_w^k) \right\|^2, \quad (9)$$

式中 $\tilde{x}(A, K, R, T, X_w^k)$ 表示第 k 帧无人机位置 X_w^k 重投影到图像平面上的像素坐标值, \tilde{x}_k 表示实际提取的像素坐标值, A 为摄像机的内参数, K 为像差系数, R 为基准坐标系到像机坐标系的旋转矩阵, T 表示基准坐标系原点在像机坐标系中的坐标,本文采用 Levenberg-Marquardt 迭代算法得到(9)式的最优摄像机参数。

3.4 标定实施流程

提出的针对晃动平台对空拍摄大视场摄像机参数标定的一种典型流程为:

- 1) 无人机定位测量系统中方位像机的室内标校,在实验室标定方位像机内参数,包括:焦距、主点、像差。
- 2) 在晃动平台上调整并安装无人机定位测量系统,保证在摄像机测量视场内摆放2个以上基准点,同时,保证无人机定位测量系统的测量范围与待标定的摄像机的公共视场尽量大。
- 3) 根据测量任务需求在平台建立基准坐标系,并确定各个基准点以及无人机定位测量系统中方位像机光心在基准坐标系中的坐标,该过程可借助全站仪、经纬仪等外测设备进行。根据基准点在方位像机中的图像坐标,确定无人机定位测量系统坐标系与晃动平台上基准坐标系的转化关系。

4) 将反射棱镜装在无人机上,控制无人机在待标定大视场摄像机视场与无人机定位测量系统测量范围的公共区域内飞行,GPS同步控制采集无人机图像。事后处理得到无人机各时刻在无人机定位测量系统坐标系的坐标,并转化得到各时刻无人机在晃动平台基准坐标系下的空间坐标。

5) 在摄像机标定图像上跟踪提取无人机坐标,利用整个飞行过程或选取部分时刻的无人机位置当做控制点,逐步解算摄像机参数。

4 外场验证实验

4.1 外场实验条件和实施过程

外场实验目的是在舰船维修后标定摄像机相对于船体坐标系的参数,舰船上两部摄像机组成双目测量系统对 500~1500 m 观测范围进行拍摄和交会测量,摄像机均安装在船体上,为系泊状态。摄像机型号为 CL600 高速像机,图像分辨率为 1280 pixel×1024 pixel,帧频为 50 Hz,镜头焦距为 135 mm,横向视场角度约 7°。左摄像机架设位置离晃动平台高度约 10 m,右摄像机架设位置离晃动平台约 0.5 m,摄像机基线约 70 m,两部摄像机光轴夹角约 8°。该双目测量系统中摄像机处于晃动平台上,不可拆卸,且对空拍摄,主要用于空中目标的运动参数测量,现需要对双目测量系统进行标定。

在晃动平台区域布置无人机定位测量系统和 2 个基准点。若无人机定位测量系统中方位像机光心和各个基准点在船体坐标系中的坐标已知,则不需要借助其他设备建立基准坐标系。实验中,根据实验条件中先用全站仪建立基准坐标系,其中 X 方向由左弦指向右弦, Y 方向由舰尾指向舰首,与待标定摄像机的深度方向基本一致, Z 方向垂直向上,测出无人机定位测量系统中方位像机光心和各个基准点在基准坐标系中的坐标。再通过基准坐标系与船体坐标系之间 3 个以上同名点相互进行坐标系转换。实验结果均在基准坐标系中给出。

实验时,无人机共飞行两次,控制无人机定位测量系统和双目测量系统同步采图。第一次飞行中的无人机位置坐标作为控制点,用于标定两部摄像机的参数;第二次飞行中的无人机位置作为待测目标,基于摄像机参数标定结果交会测量无人机的位置坐标,与无人机定位测量系统测出的结果进行比对。

4.2 实验结果

图 3 为第一次飞行实验中双目测量系统中左摄像机拍摄图像,图中虚线为无人机的飞行轨迹。无人机飞行距离在 500 m 以上,因此判读过程中利用最小二乘匹配定位无人机棱镜图像坐标,定位精度优于 1 pixel,无人机位置指向测量精度优于 0.01°。宽波束激光测距仪采用单脉冲激光测距原理,脉冲回波时间差采用 600 MHz 时钟进行计数,读数精度为 0.25 m,实际考虑确定脉冲发出时刻和脉冲回波接收时刻精度的影响,距离测量精度优于 1 m。

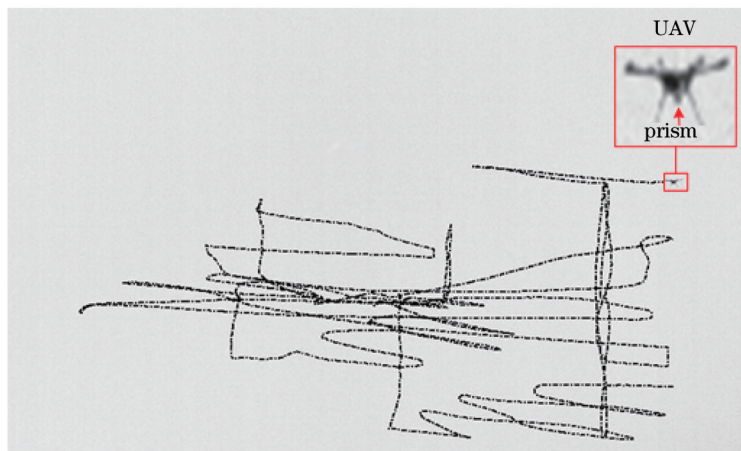


图 3 左摄像机拍摄图像及无人机飞行判图轨迹

Fig.3 Images captured by the left camera and the flight trajectory of UAV

利用第一次飞行实验标定摄像机参数,标定结果如表 1 所示。

表1 摄像机标定结果

Table 1 Results of camera calibration

Calibration parameters	Left camera	Right camera
Principal point (C_x, C_y) /pixel	(638.2894, 510.7606)	(642.5282, 508.5511)
Equivalent focal length (F_x, F_y) /pixel	(9616.6571, 9621.9129)	(9632.3262, 9635.8209)
Lens distortion (Ref.[7])	(-0.0808, 0.0049, -0.0031, -0.0029, -0.0022)	(-0.1498, 0.0023, -0.0048, -0.0023, 0.0015)
Euler angle (R_x, R_y, R_z) /($^\circ$)	(171.8662, 0.3519, 87.2252)	(176.6186, 1.5816, 87.8971)
Translation vector (T_x, T_y, T_z)/m	(-26.4800, 3.7599, 68.9758)	(20.8711, 11.8849, 25.3094)
RMS of reprojection errors (du, dv) /pixel	(0.4272, 0.3840)	(0.4951, 0.3317)

标定结果表明标定重投影误差不超过 0.5 pixel。通过第二次飞行实验检验双目测量系统的标定效果,利用以上摄像机参数对第二次飞行的无人机位置进行交会测量,与无人机定位测量系统测量结果对比,平均误差和均方根误差(RMS)统计如表 2 如示。

表2 标定摄像机交会测量结果误差统计

Table 2 Statistical errors intersection measurement results of calibration camera

Statistics	Intersection measurement errors of calibration results /m		
	X error	Y error	Z error
Mean /m	0.0215	-0.2346	0.0089
RMS /m	0.1171	0.9182	0.0486

由表 2 可见,采用本文方法标定并交会测量结果误差的均方差均在米量级,高于等距离测量条件下的雷达测量精度,表明本文标定方法可行且精度满足要求。实验结果也与无人机定位系统的测量精度情况相符。交会测量结果中深度方向 Y 分量误差较其他坐标分量误差大,这是由于双摄像机交会测量角度较小,即基高比远小于 1,使得在视场纵深方向交会测量误差较大^[12]。船舶实验验证了本文方法能有效地标定晃动平台对空拍摄大视场摄像机。

5 结 论

提出了针对晃动平台对空拍摄大视场摄像机的标定思路和方法,并设计了由方位像机和宽波束激光测距仪组成的无人机定位测量系统。利用无人机标定晃动平台对空拍摄大视场摄像机参数,对标定实验条件要求低,突破了由于无法在视场中布设传统像机标定方法所需空间分布控制点,使晃动平台上大视场摄像测量无法现场采集参考图像进行高精度标定的局限,具有重要的应用价值。实验中无人机轨迹可以根据待标定摄像机视场进行调整,较易满足控制点在空间和图像上都散布合理的要求,外场验证实验表明,所提出的摄像机标定方法能够有效用于晃动平台对空拍摄大视场摄像机标定,并将进一步运用于在航状态下船舶中摄像机的标定。

参 考 文 献

- 1 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches[M]. Beijing: Science Process, 2009.
于起峰,尚 洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- 2 Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. Grouped approach algorithm for mapping camera calibration based on method of exact measuring angle[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0112005
远国勤,丁亚林,惠守文,等. 基于精密测角法的测绘相机分组渐进标定算法[J]. 光学学报. 2012, 32(1): 0112005.
- 3 Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu, *et al.*. Calibration method for large field of view camera based on infinite homography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0715002.
苑 云,朱肇昆,张小虎,等. 基于无穷单应的大视场摄像机标定方法[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0715002.
- 4 Bu Penghui, Zhao Hong, Gu Feifei, *et al.*. A fully automatic camera calibration method based on planar target[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015004.
卜鹏辉,赵 宏,谷飞飞,等. 一种基于平面靶标的全自动标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015004.
- 5 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015004.

- Sinica, 2010, 30(2): 465-472.
- 霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 465-472.
- 6 Xu Song, Sun Xiuxia, Liu Xi, *et al.*. Geometry method of camera self-calibration based on a rectangle[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1115002.
- 徐 嵩, 孙秀霞, 刘 希, 等. 基于矩形的摄像机自标定几何方法[J]. 光学学报. 2014, 34(11): 1115002.
- 7 Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- 8 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0915001.
- 杨博文, 张丽艳, 叶 南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0915001.
- 9 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 10 Li X, Long G C, Guo P Y, *et al.*. Accurate mirror-based camera pose estimation with explicit geometric meanings[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(12): 2504-2513.
- 11 Jiao Chunlin, Gao Mantun, Shi Yikai. 3D terrain registration based on stereo vision[J]. Computer Engineering and Applications 2008, 44(23): 206-208.
- 焦春林, 高满屯, 史仪凯. 基于立体视觉的 3D 地形拼接[J]. 计算机工程与应用. 2008, 44(23): 206-208.
- 12 Shang Yang. Researches on Vision-Based Pose Measurements for Space Targets[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- 尚 洋. 基于视觉的空间目标位置姿态测量方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.

栏目编辑: 苏 岑