

多摄像机空间交会动态测量中遮挡问题的研究

王 伟¹ 于之靖² 郭 寅^{3*} 杨学友¹

(¹ 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072
² 中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300; ³ 清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要 遮挡问题是现有多摄像机测量网络在进行空间交会测量时存在的一个重要问题。当测量过程中有遮挡发生时,某些特征点可能仅能被一个像机观测到,传统的前方交会测量方法将不再可行。为了解决这一问题,通过特征点的几何约束来求解特征点在全局坐标系下的粗略位置作为进一步迭代优化的初值,并根据可用的特征点(可以是能被所有像机观测到,也可以是仅被部分像机观测到)的多光线约束来建立最优化目标函数,通过迭代算法最终解算得出被测目标可靠的位置姿态。实验结果表明,该方法在解决实际应用中遮挡问题的同时,也能提供较高的测量精度。

关键词 机器视觉;多像机测量网络;遮挡处理;空间交会测量

中图分类号 P234.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0415003

Study on the Occlusion Problem in Dynamic Space Intersection Measurement with Multi-Camera Systems

Wang Wei¹ Yu Zhijing² Guo Yin³ Yang Xueyou¹

(¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Department of Aviation Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China
³ Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Occlusion is a major problem in dynamic space intersection measurement with multi-camera systems. When occlusion occurs in measuring process, certain control points can only be observed by one camera, so the typical method of space intersection can't be useable. To process the occlusion problem, the locations of the control points can be roughly determined, the optimal results can be obtained through iterative optimization algorithms, and the objective function can be established by multi-plane constraints of the available control points (the points are observed not only by all the cameras, but also by parts of the cameras). The experimental results show that the method can solve the occlusion problem well, and provide reliable measuring accuracy at the same time.

Key words machine vision; multi-camera measuring net; occlusion processing; space intersection

OCIS codes 150.0155; 150.1135; 150.1488

1 引 言

多摄像机测量网络^[1-4]是针对工业现场全局测

量及控制的需求而发展起来的大尺寸网络式测量系统,具有精度高、扩展性好、可实现多任务自动化测

收稿日期: 2013-10-15; 收到修改稿日期: 2013-12-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费(3122013D019)、国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1333105)

作者简介: 王 伟(1987—),男,博士研究生,主要从事摄影测量和光电精密测量方面的研究。

E-mail: tju_wangwei@tju.edu.cn

导师简介: 杨学友(1949—),男,教授,博士生导师,主要从事计算机与视觉检测技术方面的研究。

E-mail: xueyouy@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: guoyin@tsinghua.edu.cn

量等优势,是大尺寸实时空间测量的优选解决方案^[5],在工业机器人自动定位、大型柔性多体系统的静态/动态监控和运动分析以及工作现场自动导航车(AGV)小车导航等领域得到了广泛的应用^[6-8]。在实际应用中,多摄像机测量网络通过光学多站交会式测量可实时测量多个特征点的坐标,然而若在动态测量过程中存在遮挡的情况,如目标物体自身遮挡及其他工件装置的遮挡等,光学通路被阻断,多站交会式测量往往难以实现。

针对这一问题,现有的解决方法主要分为三类:第一类最为简单直接的方法是通过使用大量的摄像机和特征点来提高系统的连通性。但是,由于成本较高,该方法并不是一个较好的选择;第二类是转站,即在不增加摄像机数量的情况下变换像机的位置,以达到遮挡位置的测量。但是明显此方法不适用动态物体的测量;考虑到成本、系统连通性及测量精度,第三类方法则通过优化算法设计摄像机以及特征点的布局来避免动态测量过程中遮挡问题的出现^[9-10]。尽管这类方法能够较好的解决遮挡问题,但其仍然存在弊端:1)由于存在像机可视角度有限和被测物体自身结构遮挡的原因,有时布局优化并不可行;2)布局优化为测量前预处理过程,而且对于特定测量环境和被测件需要特定的布局优化,不具有普遍可适性。

有关目标体位置姿态的测量国内已展开了较为详细的研究^[11-13],但对于应用多摄像机网络实现遮挡情况的测量并未深入研究。为了更好的解决动态测量过程中的遮挡问题,本文提出了一种基于摄像机测量网络的遮挡处理方法。该方法利用多个(至少4个)特征点的几何约束求解所有特征点位粗略位置,再根据可用的特征点的多光线约束来建立最优化目标函数,通过迭代算法最终解算得出被测目标的位置姿态。

2 多摄像机测量网络

随着摄像机硬件设施的飞速发展和摄影测量技术的不断完善,多摄像机测量网络得到了广泛的应用。它是在典型的双目视觉系统的基础上发展而来,在测量空间内通过多个摄像机同时测量来建立空间立体测量网络。其测量原理是空间前方交会,即每个特征点将被多个摄像机观测到,通过空间直线交会可以求得特征点的坐标;如果存在多个特征

点,则所有的测量光束将在空间中组成一个复杂的交会网络,这时可以通过光束平差方法对各特征量进行优化处理。

值得注意的是,在开始测量之前,需要确定各摄像机之间的相互位置关系,即定向过程。在实际应用过程中,是在控制场内安放多个位置已知的控制点,所以可通过光束平差法解算各参数。而在测量过程中,特征点至少需要被两个摄像机观测到才能求解方位信息,如果被多个摄像机观测到则可通过冗余信息求解最优解。

如果被测物体由于自身结构或是运动等原因存在遮挡,安装于其上的被测目标往往仅能被部分摄像机观测到,甚至被完全遮挡。在这种情况下,被测目标的坐标无法通过交会测量获取,目标物体的位姿自然无法测得。

3 动态测量中的遮挡处理

3.1 测量原理及数学模型

为了解决上述问题,本文提出了一种多摄像机测量网络在遮挡条件下的测量方法,其测量原理如图1所示。 $N(N \geq 2)$ 个摄像机分布于测量空间四周, M 个特征点固定于运动目标上随其移动,特征点为圆形定向反光标标记点(如图2中小图所示),文中将统一命名运动物体为被测目标,反光标标记点为特征点。特征点在运动目标坐标系下的坐标已通过预先标定得到,预先标定是通过美国GSI公司的V-STARS系统测量得到,被测目标尺寸约为 $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,其三维测量精度可控制在 0.01 mm 以内,故可将V-STARS系统的测量值作为实验标准值。

根据第 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 个摄像机与第 $i(i = 1, 2, \dots, M)$ 个特征点建立测量数学模型,前提是要通过预先标定确定摄像机的相关参数,其中摄像模型采用针孔模型,同时考虑镜头的径向畸变和切向畸变。相关的参数如下^[14]:有效焦距(c)、像元水平和垂直方向的尺寸因子(dx, dy)和图像主点坐标(x_0, y_0);径向畸变(k_1, k_2, k_3)、切向畸变(p_1, p_2, p_3)。

以上参数确定后,当第 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 个摄像机观测到第 $i(i = 1, 2, \dots, M)$ 个特征点位时,摄像机成像中心、特征点与其像点满足共线性方程^[15]:

$$\begin{cases} x_p = -c \frac{m_{11}(X_p - X_0) + m_{12}(Y_p - Y_0) + m_{13}(Z_p - Z_0)}{m_{31}(X_p - X_0) + m_{32}(Y_p - Y_0) + m_{33}(Z_p - Z_0)} \\ y_p = -c \frac{m_{21}(X_p - X_0) + m_{22}(Y_p - Y_0) + m_{23}(Z_p - Z_0)}{m_{31}(X_p - X_0) + m_{32}(Y_p - Y_0) + m_{33}(Z_p - Z_0)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 (X_p, Y_p, Z_p) 为空间点 P 在全局坐标系中的坐标, (x_p, y_p) 为对应的畸变修正后的图像坐标, (X_0, Y_0, Z_0) 为摄像机坐标系原点在全局坐标系中的坐标, $m_{11} \sim m_{33}$ 为全局坐标系到摄像机坐标系的转换矩阵的参数, c 为有效焦距。

各摄像机在全局坐标系下的位置关系可由前期定向获得, 常用的方法是利用公共视场下控制点的空间坐标约束, 得出每个摄像机测量坐标系之间的位姿矩阵。因此上式可简化为空间直线方程, 即点在直线上:

$$\begin{cases} a_{j1}^i X + b_{j1}^i Y + c_{j1}^i Z + d_{j1}^i = 0 \\ a_{j2}^i X + b_{j2}^i Y + c_{j2}^i Z + d_{j2}^i = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 (X, Y, Z) 表示特征点 P_j 在全局坐标系下的坐标, $(a_{j1}^i, b_{j1}^i, c_{j1}^i, d_{j1}^i; a_{j2}^i, b_{j2}^i, c_{j2}^i, d_{j2}^i)$ 表示过点 P_j 的空间直线方程在全局坐标系下的系数, 其可通过像机参数和像机到全局坐标系的转站参数求得, i 和 j 分别表示第 i 个摄像机和第 j 个特征点。

3.2 数学解算

测量发生遮挡时, 遮挡情况可分为三种: 1) 测点至少能同时被两个像机观测, 但不能被所有摄像机观测到, 如图 1 中 P_1 和 P_2 点, 用“局部遮挡”表述; 2) 测点只能被某一个摄像机观测到, 用“遮挡”表述; 3) 测点被完全遮挡, 用“完全遮挡”表述。假设在测量过程中发生遮挡, 若运动目标上存在至少 2 个“局部遮挡”的点 [如图 1 中 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 所示, 即第一种情况], 即可通过以下方法粗略求解运动目标坐标系到全局坐标系的转换关系。

假设只有 2 个“局部遮挡”点位, 其余都是“遮挡”或“完全遮挡”点位 (最恶劣情况)。通过空间交会求得 2 个“局部遮挡”点位的坐标, 再通过其与“遮挡”点 P_j 的距离约束 (由预先标定目标体获得) 建立方程组:

$$\begin{cases} (x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2 = (D_{1j})^2 \\ (x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2 = (D_{2j})^2 \end{cases}. \quad (3)$$

并与 P_j 所在直线约束 [(2) 式] 联立, 即可求得“遮挡”点 P_j 的坐标。

当点位坐标已知量达到四个, 即可通过线性方法粗略求解运动目标坐标系到全局坐标系的转换关

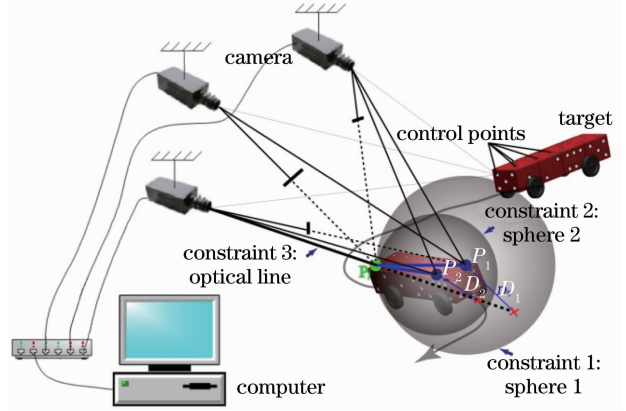


图 1 遮挡测量原理图

Fig. 1 Schematic of vision measurement with occlusion. 定义特征点在目标坐标系与全局坐标系下的坐标分别为 $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ 与 $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$ 。其中, p_i 已通过标定预先得到, 而 P_i 为未知量。因此, 被测运动目标的位姿可由下式给出:

$$P_i = \mathbf{R}_j p_i + \mathbf{T}_j, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{R}_j = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 为目标坐标系变换为全局坐

标系的旋转矩阵, $\mathbf{T}_j = (t_x \ t_y \ t_z)^T$ 为对应的平移向量。

显而易见, 所需求解的 \mathbf{R}_j 与 \mathbf{T}_j 共包括 12 个未知参数。根据 (4) 式, 每个特征点均可以给出三个方程, 因此, 只需线性求解方程组即可。得到 \mathbf{R}_j 与 \mathbf{T}_j 后, 目标体上所有的特征点在全局坐标系下的粗略坐标即可获得。

为了得到更为准确的结果, 可以采用最优化解算方法, 目标函数可根据有效测点 (包括除“完全遮挡”测点外其他所有测点) 在其对应成像光束上约束和点间距离约束来建立:

$$E = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (e_j^i)^2 + \sum (\Delta d)^2 = \min, \quad (5)$$

式中方程的未知量是特征点在全局坐标系下的坐标, N 为像机的数量, n 为有效测点的数量, Δd 为特征点间的距离约束, e_j^i 为第 i 个特征点到其在第 j 个摄像机下成像光线 (射线) 的距离。求取 (5) 式最小值的问题即为一非线性最优化问题, 可以通过如 Levenberg-Marquardt 算法等迭代优化算法求解。

其迭代初值可通过前面提到的对(4)式的线性求解直接得到。

详细的解算流程图如图 2 所示。

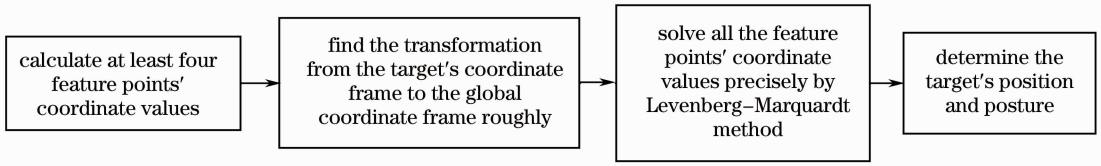


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

4 实 验

实际操作中,将装有特征点的目标体安装在机器人的末端关节,通过控制机器人运动来模拟运动物体。同时在其周围摆放三个摄像机来构成测量网络(如图 3 所示),实现有遮挡(由于被测目标自身结构)的测量,并进行比对来验证本文方法的可行性及

测量精度。

为了简化实验且不失一般性,被测目标体上分四个平面共装有 20 个特征点(如图 3 中小图所示),被测目标尺寸约为 150 mm×100 mm×100 mm,特征点大小约为 6 mm,其在目标坐标系下的坐标值已通过 V-STARS 系统测量得到。



图 3 实验场景图

Fig. 3 Scene of the experiment

在距离被测目标约 3.5~4 m 处分别布有 3 个摄像机,选定摄像机 1 为全局坐标系。像机的有效视场约为 3 m×3 m×2 m 的空间,因此在此范围内

进行光束平差^[16]定向,得到另外两个摄像机坐标系在全局坐标系下的位置信息,即系统外参数(单位: mm):

$$\mathbf{R}_G^2 = \begin{bmatrix} 0.9682 & -0.2138 & -0.1298 \\ 0.0554 & 0.6893 & -0.7223 \\ 0.2439 & 0.6922 & 0.6793 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_G^2 = \begin{bmatrix} 120.6046 \\ 1953.1833 \\ 910.7692 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_G^3 = \begin{bmatrix} 0.9534 & 0.2255 & 0.2007 \\ -0.3003 & 0.6421 & 0.7053 \\ 0.0302 & -0.7327 & 0.6799 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{T}_G^3 = \begin{bmatrix} -145.3829 \\ -2040.2868 \\ 1129.3831 \end{bmatrix}.$$

在实验过程中,控制工业机器人使其运动至工作空间中的 12 个不同位置。在每个位置处,由于自身结构的遮挡,被测目标上的某些特征点会被遮挡不能被所有像机都观测到。摄像机与被测目标的位置关系重构图如图 4 所示,图中只显示了被测目标

移动过程中的部分(4 个)位置。

利用本文方法在有遮挡情况下测得被测目标上的特征点坐标,并与 V-STARS 系统测量结果(标准值)进行比对,比对前两种测量结果同时转换到物件坐标系下。在每个测量位置,统计所有测点分别在

X、Y、Z 三个方向上与标准值差值的均方根误差 (REMS)。图 5 所示横坐标表示测量位置,纵坐标表示均方根误差,实线、虚线和点画线分别表示 X、Y、Z 三个方向。所有特征点的总体位置测量精度优于 0.015 mm。

被测目标的姿态测量主要包含姿态旋转和位置平移两部分,图 6 根据已求得的特征点的三维坐标,

分别给出这两部分的测量值与标准值的偏差量。由图 6 可见,以 V-STARS 系统的测量结果作为参考,在测量距离 4 m 和测量区域 1 m³ 以内,被测目标的姿态旋转估计精度优于 ±0.001°,位置平移估计精度优于 ±0.06 mm。实验结果表明,本文提出的方法适用于存在遮挡时的位姿估计,并且能够保证较高的测量精度。

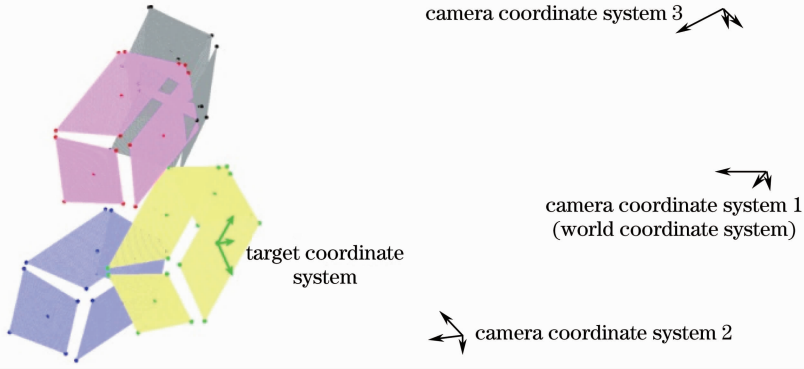


图 4 被测目标与摄像机的三维重构图

Fig. 4 Three-dimensional (3D) reconstruction of measured targets and cameras

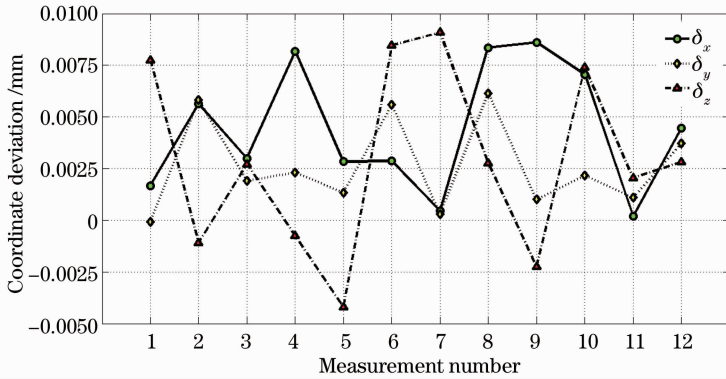


图 5 比对实验结果

Fig. 5 Comparison experiment result

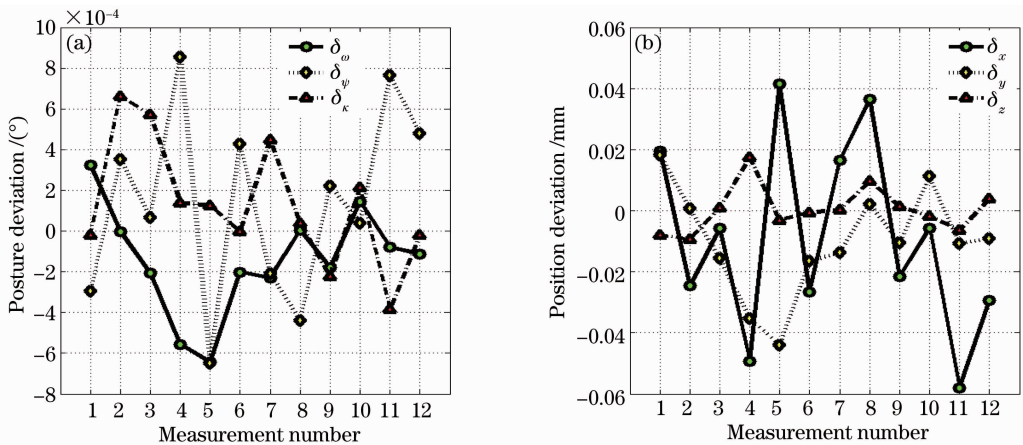


图 6 被测目标位姿估计结果

Fig. 6 Posture and position results of the measuring object

4 结 论

针对多摄像机测量网络在实时空间点位测量中存在的遮挡问题,提出了一种遮挡条件下的测量方法。该方法通过至少4个特征点的几何约束求解所有特征点位粗略位置,然后根据可用的特征点的多光线约束来建立最优化目标函数,通过迭代算法最终解算得出被测目标较为准确的位置姿态。不需要额外增加摄像机和特征点位的数量,也不需要复杂耗时的前期布局分析,因此,是一种低消耗的、简单易行的解决方法。实验结果表明,该方法在解决遮挡问题的同时,也能够提供较为可靠的测量精度。

参 考 文 献

- 1 F Chen, X Chen, X Xie, *et al.*. Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(9): 1044–1052.
- 2 D Alexiadis, D Zarpalas, P Daras. Real-time, full 3-D reconstruction of moving foreground objects from multiple consumer depth cameras [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(2): 339–358.
- 3 J I Park, S Inoue. Acquisition of sharp depth map from multiple cameras [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 1998, 14(1): 7–19.
- 4 N Okada, J Qiu, K Nakamura, *et al.*. Multiple self-organizing maps for a visuo-motor system that uses multiple cameras with different fields of view [J]. *Artificial Life and Robotics*, 2009, 14(2): 114–117.
- 5 Liu Jianwei, Lian Jin, Liang Xinhe, *et al.*. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 126–134.
刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 126–134.
- 6 J Hefele, C Brenner. Robot pose correction using photogrammetric tracking [C]. *Intelligent Systems and Smart Manufacturing*. International Society for Optics and Photonics, 2001: 170–178.
- 7 P F Pai, S Ramanathan, J Hu, *et al.*. Camera-based noncontact metrology for static/dynamic testing of flexible multibody systems [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(8): 085302.
- 8 J Yu, P Lou, X Wu. A dual-core real-time embedded system for vision-based automated guided vehicle [C]. *Control, Automation and Systems Engineering*, 2009. CASE 2009. IITA International Conference on. IEEE, 2009: 207–211.
- 9 F Franceschini, M Galetto, D Maisano, *et al.*. A review of localization algorithms for distributed wireless sensor networks in manufacturing [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2009, 22(7): 698–716.
- 10 M Galetto, B Pralio. Optimal sensor positioning for large scale metrology applications [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(3): 563–577.
- 11 Feng Xiaoyong, Zhu Weikang, Qiao Yanfeng, *et al.*. A dynamic, real-time, high-precision optical method of level attitude measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0312001.
冯小勇, 朱伟康, 乔彦峰, 等. 动态实时光学精密水平姿态测量方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0312001.
- 2 Dai Dongkai, Wang Shengshu, Hu Chunsheng, *et al.*. Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0312005.
戴东凯, 王省书, 胡春生, 等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0312005.
- 13 Chen Peng, Hu Guangda, Liu Xiaojun. Camera pose estimation based on virtual control points [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108003.
陈鹏, 胡广大, 刘晓军. 基于虚拟控制点的像机姿态测量算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108003.
- 14 J Weng, P Cohen, M Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on*, 1992, 14(10): 965–980.
- 15 Zhu Jigui, Yu Zhijing. *The Principle of Vision Metrology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2012. 17–18.
郝继贵, 于之靖. *视觉测量原理与方法* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012. 17–18.
- 16 B Triggs, P F McLauchlan, R I Hartley, *et al.*. *Bundle Adjustment—a Modern Synthesis* [M]. *Vision Algorithms: Theory and Practice*. Springer Berlin Heidelberg, 2000. 298–372.

栏目编辑: 李志兰