

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0120-05

机载武器三维运动姿态摄像测量系统

晁志超¹ 姜广文¹ 伏思华¹ 邱志强¹ 周永兴² 于起峰^{1,3}

¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
² 中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092
³ 国防科学技术大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 通过在位于机身下方的吊舱中安装两台高速摄像机,从不同方向拍摄由机翼携带并随机翼运动的机载武器,并对采集到的序列图像进行处理,获得了机载武器在投放发射阶段的三维运动姿态参数。为了提高系统的测量精度和可靠性,首先对每个摄像机采集的图像进行单目摄像测量获得各自独立的运动姿态参数,再利用双目摄像测量算法同时处理两个摄像机采集的图像再次获得运动姿态参数。理论分析和实验结果表明该系统角度测量精度优于 0.1° ,位移测量精度优于 0.5 mm ,满足机载武器投放发射阶段的测试需求。

关键词 摄像测量;三维运动测量;三维姿态测量;机载武器

中图分类号 TP242;TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0120

Video-Metric System on Movement and Pose Measurement for Airborne Weapons

Chao Zhichao¹ Jiang Guangwen¹ Fu Sihua¹ Qiu Zhiqiang¹ Zhou Yongxing² Yu Qifeng^{1,3}

¹ Institute of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd. Chengdu, Sichuan 610092, China

³ College of Aerospace Engineering, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Key parameters of airborne weapon such as 3D velocity and 3D pose can be acquired by processing images taken by two high speed cameras mounted in the cabin, which is fixed under the fighter plane. In order to improve the precision and reliability of the video-metric system, a new design based on monocular and binocular video-metric is realized separately. Theory and measurement results show that the angular accuracy of this system is prior to 0.1 degree and its displacement accuracy is prior to 0.5 mm , which achieves the testing requirement in airborne weapon bombing/launching period.

Key words video-metric; 3D movement measure; 3D pose measure; airborne weapon

1 引言

随着科学技术的发展,以数字式高速摄像机为代表的测量设备不断更新,摄像测量、计算机视觉等光学测量方法以其客观、可靠、高精度、非接触和低成本等特点,在航空试验领域发挥了越来越重要的作用。新型机载武器(空射导弹、航空炸弹等)及其投放发射平台在研发与定型生产过程中需要进行大量的测试试验,获得必需的机载武器及其投放发射平台的相关参数,为测试、验证武器性能及进一步改进设计提供依据。

2 系统设计方案

系统的主要任务是测量由机翼携带并随机翼运动的机载武器的三维运动姿态参数。如图 1 所示,通过在固接于机身下方的吊舱中安装两台高速摄像机,摄像机之间有一定的距离间隔。选择合适的镜头,调整拍摄的视场区域,使得待测武器位于两个摄像机的视场内。事先在武器上喷绘若干“十”字丝、对顶角等标志作为被测标识点。在飞机起飞前和降落后分别标定摄像机,在飞机起降和飞行过程中两台摄像机同时记录含被测标识点的机载武器图像,

作者简介: 晁志超(1982—),男,博士研究生,主要从事摄像测量方面的研究。E-mail: bigchao666@yahoo.com.cn

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,博士,主要从事精密光测图像处理等方面的研究。E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

对图像进行处理获得机载武器在投放发射阶段的三维位移、三维姿态(俯仰角/偏航角/滚转角)等参数。再结合摄像机帧频即可得到其三维速度、三维加速度、俯仰/偏航/滚转角速度、俯仰/偏航/滚转角加速

度等运动参数。吊舱应采取保温措施,保证摄像机能正常工作。武器表面的合作标志点的形状和布局根据实际情况确定。

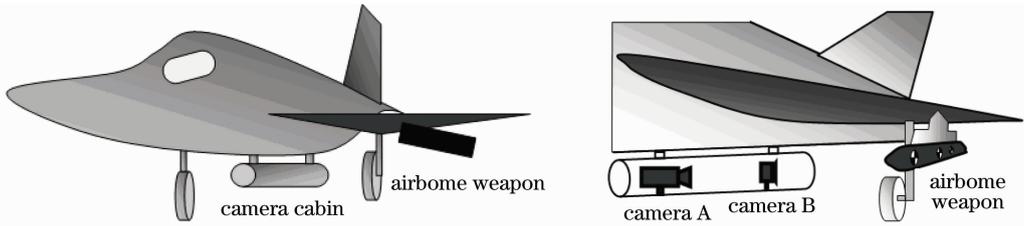


图 1 摄像系统设计方案示意图

Fig.1 Design sketch map of video-metric system

测量系统界面如图 2 所示。系统框图如图 3 所示,由试验任务管理、序列图像回放、图像预处理、摄像机标定、图像特征自动/半自动提取、武器三维位置姿态计算(单目摄像测量单元、双目摄像测量单元)、武器三维运动速度/加速度计算、结果图表化输出和结果三维动画显示等分系统组成。

可以求解出摄像机参数,也就是建立成像模型,这个过程称为摄像机标定。摄像机标定的结果对最终测量结果影响非常大,选择合适的摄像机模型并高精度地对摄像机进行标定十分重要。

当用摄像机对空间目标成像时,空间任意一点在图像上的成像位置可以用针孔模型近似表示,即点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在图像上的投影位置 $p(u, v)$,为光心 O_c 与 P 的连线与图像平面的交点,这种关系称透视投影,如图 4 所示,其中 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 表示世界坐标系, $O_c-X_c Y_c Z_c$ 表示摄像机坐标系, $O-xy$ 表示图像坐标系,坐标系均使用物理单位;以图像平面左上角为原点,摄像机 CCD 阵列的纵横方向分别为 u, v 轴建立图像像素坐标系 uv , 单位为像素。

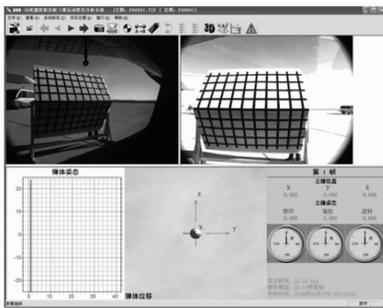


图 2 系统软件界面图(摄像机标定界面)

Fig.2 Photo of the system's software(camera calibration)

通过推导,可得摄像机成像公式

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $f_u = f/dx, f_v = f/dy$ (f 为摄像机焦距, dx, dy 为每个像素在 u, v 轴方向上的物理尺寸), 分别称为横、纵向有效焦距, (u_0, v_0) 为图像中心坐标。它们只与摄像机内部结构有关,称为内部参数。 \mathbf{R}, \mathbf{T} 为从摄像机坐标系到世界坐标系的转换,称为外部参数,其中 \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{T} 为平移向量, \mathbf{M} 为投影矩阵。

由于摄像机镜头存在像差,摄像机成像时并不严格满足透视投影关系。镜头像差可分为径向像差和切向像差。经过综合分析,采用 Weng's 摄像机系统标定与误差修正模型^[1]

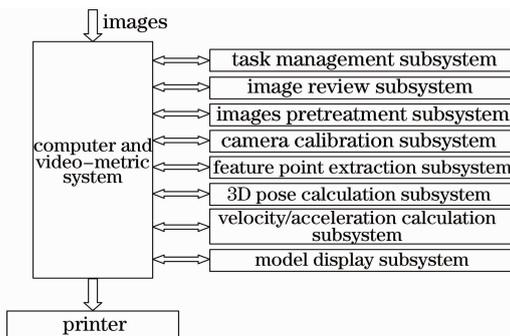


图 3 测量系统框图

Fig.3 Schematic of video-metric system

3 关键技术途径

3.1 摄像机模型建立与标定

要从摄像机获得的图像中解算出目标的三维信息,必须获得摄像机的成像模型。根据已知相对位置的目标点(标定控制点)及其在对应图像上的位置

$$\begin{cases} \delta_u(\hat{u}, \hat{v}) = k_1 \hat{u}(\hat{u}^2 + \hat{v}^2) + (k_2 + k_4) \hat{u}^2 + k_5 \hat{u} \hat{v} + k_2 \hat{v}^2 \\ \delta_v(\hat{u}, \hat{v}) = k_1 \hat{v}(\hat{u}^2 + \hat{v}^2) + k_3 \hat{u}^2 + k_4 \hat{u} \hat{v} + (k_3 + k_5) \hat{v}^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 为像差系数。

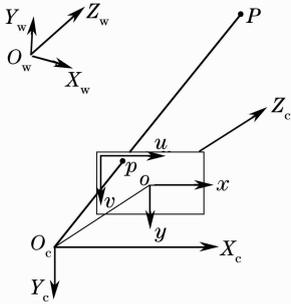


图 4 摄像机成像模型

Fig. 4 Camera projection model

目前,标定摄像机模型参数的方法有很多,转化为线性方程求解法、直接非线性求解法、两步法等^[2~6]。本系统结合任务实际,采取一种线性求解与非线性优化相结合的方法,求解精度较高^[7]。图 5 是求解摄像机参数的流程图。

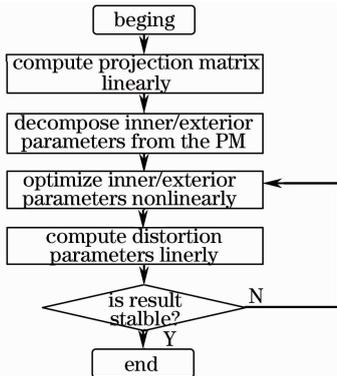


图 5 摄像机标定流程图

Fig. 5 Flow chart of camera calibration

首先不考虑像差的影响,摄像机投影模型是线性模型,用线性方法求解摄像机投影矩阵,然后从投影矩阵分解出摄像机内外参数的近似值,得到摄像机近似模型。对近似值进行非线性优化可提高内外参数的精度。在获得内外参数后可线性求解像差系数,将得到的像差系数代入近似模型则可得得到更精确的模型,如此迭代直至结果稳定。

3.2 双像机空间交汇测量目标位置姿态

对于空间物体表面任意一点 P ,如果用摄像机 C_1 和 C_2 同时观察 P 点,分别得到对应的像点 p_1 和 p_2 ,则通过双像机空间交汇可获得 P 点的三维位置,如图 6 所示。

设摄像机 C_1 和 C_2 已经标定,投影矩阵分别为 M_1 和 M_2 ,由共线方程有

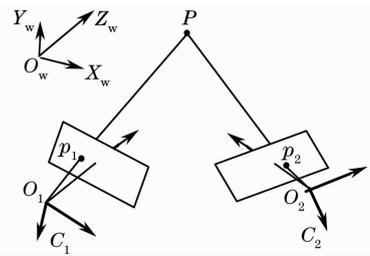


图 6 双像机摄像测量示意图

Fig. 6 Sketch map of binocular video-metric

$$Z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$Z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 $(u_1, v_1, 1), (u_2, v_2, 1)$ 分别为 p_1 和 p_2 点在各自图像中的齐次坐标, $(X_w, Y_w, Z_w, 1)$ 为 P 点在世界坐标系下的齐次坐标。分别消去 Z_{c1} 和 Z_{c2} 可得

$$\begin{bmatrix} u_1 m_9^1 - m_1^1 & u_1 m_{10}^1 - m_2^1 & u_1 m_{11}^1 - m_3^1 \\ v_1 m_9^1 - m_5^1 & v_1 m_{10}^1 - m_6^1 & v_1 m_{11}^1 - m_3^1 \\ u_2 m_9^2 - m_1^2 & u_2 m_{10}^2 - m_2^2 & u_2 m_{11}^2 - m_3^2 \\ v_2 m_9^2 - m_5^2 & v_2 m_{10}^2 - m_6^2 & v_2 m_{11}^2 - m_3^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_4^1 - u_1 m_{12}^1 \\ m_8^1 - v_1 m_{12}^1 \\ m_4^2 - u_2 m_{12}^2 \\ m_8^2 - v_2 m_{12}^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

(5)式为包含三个变量 X_w, Y_w, Z_w 的 4 个线性方程,用最小二乘法即可求出 (X_w, Y_w, Z_w) 。利用双目空间交会测量出目标上若干特征点的空间位置后,即可解算出目标的三维姿态。

3.3 单像机测量目标位置姿态

在计算机视觉和摄像测量学中,由刚体上特征点(线)的空间位置关系和对应的图像求刚体坐标系与摄像机坐标系之间的位置姿态关系是一类典型问题,目前主要有投影矩阵法、线性求解法和迭代优化法等算法^[8~11]。

投影矩阵法(Projection Matrix)与上面所述的像机标定过程类似,首先求出投影矩阵 M ,再由 M 分解出摄像机的内外参数即可得到刚体坐标系到摄像机坐标系的转换关系 R 和 T 。线性求解法主要是指 NPL(N Point Linear)问题或 NLL(N Line Linear)问题,NPL 的主要思想是基于对各个像点的

深度恢复,利用 N 个空间点之间的 $N(N-1)/2$ 个距离信息对摄像机的姿态和位置进行解算。迭代优化算法的一般步骤是针对某一具体的问题,首先提出一个目标函数,然后运用各种方法逐步地对该目标函数进行迭代最优化从而得到所需要的解。投影矩阵法算法简单,计算量小,但由于其求解过程中摄像机内、外参数耦合在一起,因而对噪声比较敏感,需要大量空间点来保证精度;线性求解法提供了一种求解刚体空间姿态位置关系的解析方法,精度和可靠性方面也比投影矩阵法高,但线性求解法算法比较复杂,尤其是随着空间点个数 N 的增加,算法的计算量呈指数级增加;迭代优化法是目前广泛使用的姿态估计算法之一,特别是利用最优化物空间共线误差作为目标函数的正交迭代法收敛速度快,求解精度高,该方法的全局收敛性使得其逐渐成为其他算法进行比较的对象^[8~10]。

将待测量的机载武器视为刚体建立弹体坐标系,利用上述的正交迭代法分别求解出每帧图像中弹体坐标系到摄像机坐标系的转换关系 R_i 和 T_i ($i = 1, 2, \dots, n$),以机载武器投放发射前的状态作为基准,即可测得机载武器投放发射的三维运动姿态。

如图 7 所示,对空间任意一点 P ,设其在摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 中的坐标为 P_c ,在弹体初始坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 中的坐标为 P_1 ,在弹体运动后坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 中的坐标为 P_2 。

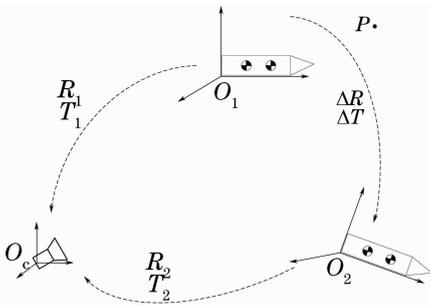


图 7 单像机摄像测量示意图

Fig. 7 Sketch map of monocular video-metric

则有

$$P_c = R_1 P_1 + T_1 = R_2 P_2 + T_2. \quad (6)$$

设坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 相对坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的姿态和位移关系为 $\Delta R, \Delta T$, 即

$$P_1 = \Delta R P_2 + \Delta T, \quad (7)$$

由(6)式,(7)式可得

$$\begin{cases} \Delta R = R_1^{-1} R_2 \\ \Delta T = R_1^{-1} (T_2 - T_1) \end{cases} \quad (8)$$

4 实验验证和精度分析

4.1 实验验证

为了对系统所使用的摄像测量方法进行原理验证和精度测试,设计并完成了如下实验。实验装置如图 8 所示。首先标定两个摄像机参数,然后将待测目标体放置于六维精密转台上,控制精密转台分别沿 X 轴, Y 轴, Z 轴方向进行旋转运动和平移运动并记录对应的转台数据。由于精密转台精度极高(角度控制精度达 5 arc sec,位移控制精度达 0.01 mm),因此可采用其数据作为目标体运动参数的真值。用两个分辨率为 1600×1200 ,视场大小约为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 的数字摄像机分别采集待测目标体的序列图像,目标体大小约为 $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,采用本系统对目标体的位移和姿态进行求解,求解过程分为以下 3 个部分:1)利用左、右摄像机采集的左、右序列图像进行双目交汇得到目标体的运动参数;2)利用左摄像机采集的序列图像进行单目姿态测量得到目标体的运动参数;3)利用右摄像机采集的序列图像进行单目姿态测量得到目标体的运动参数。最后再将所测量的运动参数分别与事先所记录的转台运动参数进行比较,取多次实验结果误差的标准差作为精度,测量数据如表 1 所示。由表中数据可以看出,系统角度测量精度优于 0.1° ,位移测量精度可达 0.1 mm 左右。

表 1 测量误差的标准差

Table 1 Standard deviation of measurements

| | Pitch angle | Yaw angle | Roll angle | Translation |
|--------------|-------------|------------|------------|---------------|
| | / $^\circ$ | / $^\circ$ | / $^\circ$ | / mm |
| Left camera | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.11 |
| Right camera | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 |
| Binocular | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 0.05 |

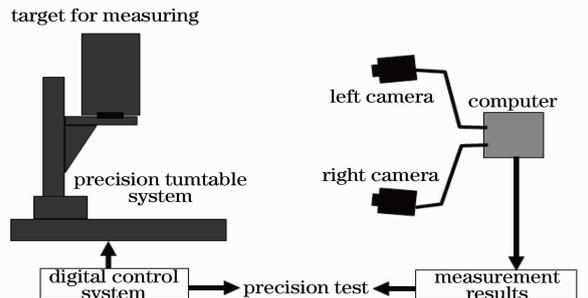


图 8 系统测试示意图

Fig. 8 Sketch map of test system

4.2 系统精度分析

位移测量的精度主要与摄像机的分辨率、摄像机视场大小及标志的提取精度有关。实验中两个摄

像机的分辨率为 1600×1200 , 视场大小约为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$, 系统采用模板匹配的方法对顶角、十字丝标志的提取精度一般可达到 0.1 pixel 左右, 则在垂直于摄像机光轴方向上位移的测量精度为

$$\Delta d = \frac{0.1}{1600} \times 1200 \text{ mm} \approx 0.07 \text{ mm}$$

对于具有一定离面角度 θ 的位移测量, 其位移测量精度于上述测量精度之间存在一个 $1/\cos \theta$ 的比例因子, 一般情况下 $\theta < 45^\circ$, 此时位移测量精度约为 0.1 mm 左右, 从表 1 数据可以看出, 位移测量精度分析与实验测量结果基本相符。

实际应用中采用的高速摄像机的分辨率为 1600×1200 , 视场大小约为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 由上述分析可知此时位移测量精度约为 0.33 mm , 完全满足机载武器投放发射阶段位移测量精度 (1 mm) 的要求。

姿态测量的精度分析比较复杂, 除了与摄像机的分辨率、标志的提取精度有关外, 还与标志的数目、标志的空间分布、目标体尺寸在视场中的比例及具体的姿态求解算法等相关, 一般可以根据直线面内旋转的转角测量精度进行一个粗略的估计。

实验中摄像机的分辨率为 1600×1200 , 视场大小约为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$, 待测目标体大小约为 $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 则目标体在图像中所占用的有效像素约为 $500 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$ 左右, 系统对合作标志的提取精度一般可达 0.1 pixel , 则面内转角的测量精度为

$$\sigma = \arctan(0.1/300) = 0.02^\circ$$

从表 1 数据可以看出, 三个姿态角的测量精度与上述面内转角的测量精度基本相当。

实际应用中视场大小将变为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 但由于待测目标尺寸在视场中的比例基本保持不变, 姿态测量精度也将保持不变, 完全满足机载武器投放发射阶段姿态测量精度 (0.1°) 的要求。

5 结 论

本系统利用目前比较成熟的基于图像的精密测量与运动测量方法, 采用光学测量的手段实现了对机载武器投放发射阶段三维运动姿态的无接触式测量, 解决了在完全不干扰武器正常投放发射情况下的测量难题。系统利用两台摄像机同时获取机载武器投放发射的序列图像, 分别采用单目测量、双目测量的方案独立获得测量数据, 既提高了测量精度, 又使得实际试验时在一个摄像机没有采集到图像的情况下依然能获得试验数据。通过对 2 部或 1 部高速

摄像机采集到的序列图像文件进行分析处理, 即可得到待测目标的三维位移、速度、加速度、角位移、角速度、角加速度等运动参数。根据所采集图像质量的好坏, 系统分别提供了图像特征自动提取、半自动提取的模式供用户选择, 在保证精度的情况下有效提高了测量效率。系统综合利用了数字图像处理、模式识别、摄影测量、计算机视觉、图像特征亚像素提取等精密光测手段, 技术含量丰富, 测量精度高, 可靠性好, 利用 Visual C++ 语言开发的数据处理软件具有测量结果精确、工作稳定、界面友好、管理方便、操作简单等特点。

机载武器投放发射三维测量系统结束了国内航空试验停留在地面静态测试的历史, 大大提高了航空试验能力和水平, 使航空试验手段进入了数字化、实时(准实时)化的时代。而且, 在此基础上研制的系统同样可用于各种地面、空中、水下目标的运动测量, 具有明显的经济效益和社会效益, 必将产生巨大的战斗力。

参 考 文 献

- Juyang Weng, Paul Cohen, Marc Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 1992, **14**(10): 965~980
- Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. Image-Based High Precision Movement Measurements [M]. Beijing: Science Press, 2002
于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳 著. 基于图像的精密测量与运动测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer Vision [M]. Beijing: Science Press, 1998
马颂德, 张正友. 计算机视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- R. Y. Tsai. A versatile cameras calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **31**(4): 323~344
- Xu Yunxi, Jiang Yunliang, Chen Fang. Generalized orthogonal iterative algorithm for pose estimation of multiple camera systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 72~77
许允喜, 蒋云良, 陈方. 多摄像机系统位姿估计的广义正交迭代算法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 72~77
- Zhang Jing, Zhu Dayong, Zhang Zhiyong. Nonmetric calibration of camera lens distortion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1552~1557
张靖, 朱大勇, 张志勇. 摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1552~1557
- Qiu Zhiqiang. Research on Key Techniques of Optical Measurement System [D]. Postdoctoral research report of National University of Defense Technology, 2007
邱志强. 光测图像系统中若干关键技术研究 [D]. 国防科技大学博士后研究工作报告, 2007
- A. Ansar, K. Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines [J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 2003, **25**(5): 578~589
- L. Quan, Z. Lan. Linear N-point camera pose determination [J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 2006, **21**(8): 774~780
- C. P. Lu, G. D. Hager, E. Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 2000, **22**(6): 610~622
- Zhang Zhiyong, Zhu Dayong, Zhang Jing. An improved pose estimation algorithm for real-time vision applications [C]. *Communications, Circuits and Systems Proceedings*, 2006, **1**: 402~406