

## 手眼相机位姿测量精度理论分析及验证

马 军,张 鹰,邸 男,聂真威

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘 要:** 从理论和实验上对手眼相机位姿测量精度进行了研究。首先,根据靶标设计形式和 P3P 算法介绍位姿测量原理。接着,从理论上分析了位置测量精度和姿态测量精度,即靶标沿 X 轴平移位置测量精度和靶标绕 X 轴、Y 轴、Z 轴旋转测量精度。然后,对通常的检测方法进行分析,提出了以产生相对位姿实现六维自由度变化的检测方法,提出用中误差对测量精度进行评价,并具体介绍了检测方法。最后,对手眼相机测量精度进行了实际检测,将实验数据与理论数据进行了对比分析。实验结果表明:距离测量精度最大为 25.60 mm,旋转测量精度最大为 1.4°,均满足测量精度的要求。

**关键词:** 机器视觉; 手眼相机; 位姿测量; 测量精度

**中图分类号:** TH741; TP70 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4094-06

## Theoretical analysis and validation on position-pose measurement accuracy of hand-eye camera

Ma Jun, Zhang Ying, Di Nan, Nie Zhenwei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to realize position-pose measurement of hand-eye camera, an measurement accuracy test system was established. Firstly, based on the target design forms and P3P algorithm, position-pose measurement principle was presented. Secondly, the position measurement accuracy and pose measurement accuracy were analyzed in theory, i.e., the translational position measurement accuracy along the X axis of the target and the rotational pose measurement accuracy about the X-axis, Y-axis and Z-axis of the target. Thirdly, the usual test method was presented, a new test way to achieve six degree of freedom by relative position-pose production was proposed. Root mean square error was introduced as an evaluation for measurement accuracy, and the test method was described in detail. Finally, practical test for measurement accuracy of an hand-eye camera was carried out, and the experimental data was compared with the theoretical data. The experimental results indicate that the maximum measurement accuracy for distance is 25.60 mm and the maximum measurement accuracy for rotation is 1.4°. It can satisfy the system requirements for accuracy.

**Key words:** machine vision; hand-eye camera; position-pose measurement; measurement accuracy

收稿日期: 2014-04-26; 修订日期: 2014-05-25

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新基金 (Y2CX1SS125)

作者简介: 马军(1960-),男,研究员,博士,主要从事精密光学检测技术、光学干涉测量设备的研制等方面的研究。

Email: [mj-4856@163.com](mailto:mj-4856@163.com)

### 0 引 言

视觉测量技术是建立在机器视觉<sup>[1-4]</sup>研究基础上的一门新兴技术,是根据摄像机获得的视觉信息对目标的位置和姿态进行的测量<sup>[5-6]</sup>。根据视觉测量中使用的相机数目,可以把视觉测量系统分为单目视觉系统、双目视觉系统和多目视觉系统。单目视觉测量是指仅利用一台相机或摄像机拍照片来进行测量工作,因其仅需一台视觉传感器,所以该方法的优点是操作方便、结构简单、相机标定也简单,同时还避免了立体视觉中的视场小、立体匹配难的不足<sup>[7-10]</sup>,因而单目视觉测量成为目前研究的热点。

在高精度应用情况下,必须对机器视觉系统的位姿测量精度进行检测,进而得到位姿测量误差及其变化规律,并在测定出的位姿信息的基础上加以订正,以便消除位姿测量误差的影响<sup>[11]</sup>。

文中以实际应用中的手眼相机为例,从其测量位姿信息原理入手,介绍了一种机器视觉测量位姿的方法并从理论上分析了测量精度,提出了一种便于实验室操作的检测测量精度检测方法。实验证明,利用相对位姿测量精度的方法,在保证测量要求的同时,使测量变得简单、快捷,更适合在实验室情况下使用。

### 1 手眼相机位姿测量原理

#### 1.1 靶标设计

手眼相机位姿测量原理是根据相机采集到图像中合作靶标标志点的位置信息和标志点的物理坐标位置,计算出手眼相机坐标系相对于抓捕标志器坐标系间的位姿矩阵。

合作靶标是满足系统测量精度的关键组件,不仅要考虑计算机测量,还要考虑宇航员的视觉感受,目前借鉴加拿大空间站的靶标设计方式,如图 1 所示。



图 1 靶标示意图

Fig.1 Sketch map of target

#### 1.2 位姿测量原理

通过检测相机图像中靶标上的 A、B、C 三点,采用 P3P 算法求解相机坐标系与靶标坐标系间相对位姿变换矩阵,流程如下:

已知  $O_c$  为摄像机光心, A、B、C 为空间中的三个点, B、C 为靶标上平面两点, A 为立体点。  $|AB|=|AC|=R$ ,  $|BC|=a$ ,  $A'(x_1, y_1)$ 、 $B'(x_2, y_2)$ 、 $C'(x_3, y_3)$  分别为每个点在摄像机成像平面上成的像, 坐标为相对于原点  $O'$  的坐标。  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为两点之间的夹角,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为每个点距离光心的距离。靶标成像如图 2 所示。

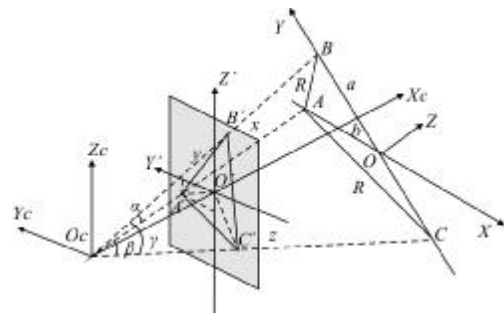


图 2 靶标成像示意图

Fig.2 Sketch map of target imaging

- (1) 根据像点在图像坐标系的位置  $A'(x_1, y_1)$ 、 $B'(x_2, y_2)$ 、 $C'(x_3, y_3)$ , 可以求出  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  角。
- (2) 根据  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  角, 求 A、B、C 点距离光心的距离  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 。
- (3) 根据  $x$ 、 $y$ 、 $z$ , 求出点 A、B、C 在摄像机坐标系  $X_c Y_c Z_c$  下的坐标。

(4) 根据 A、B、C 三点在摄像机坐标系  $X_c Y_c Z_c$  下的坐标和在物体坐标系  $XYZ$  下的坐标。求出旋转矩阵  $R$ , 平移向量  $T$ 。

#### 1.3 P3P 求解唯一性

周鑫<sup>[12]</sup>等证明了当特征点构成的三角形是等腰三角形, 并且摄像机在某些特定区域时, 所构成的 P3P 问题具有唯一解。如图 3 所示, AK 垂直于 AC,

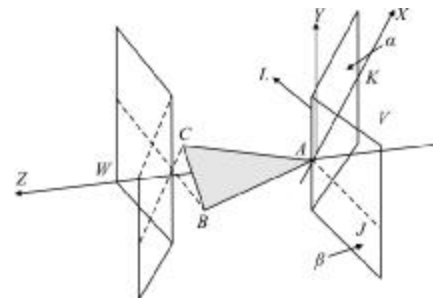


图 3 布置实例的空间示意图

Fig.3 Sketch map of space layout of points

AJ 垂直于 AB, 且 AK, AJ 都在平面 ABC 上, 直线 L 过点 A 且垂直于平面 ABC, 直线 L 和射线 AK 构成平面  $\alpha$ , 直线 L 和射线 AJ 构成平面  $\beta$ , 平面  $\alpha$  和平面  $\beta$  所夹的空间区域称为 V, 则当光心 O 出现在 V 区域时, P3P 有唯一解。

根据靶标的尺寸可求出,  $\angle BAC=93^\circ$ ,  $\angle JAK=(\pi-\angle BAC)=87^\circ$ , 即要求相机绕 Y 轴旋转范围为  $[-43.5^\circ, 43.5^\circ]$ 。文中规定相机绕 Y 轴旋转角度范围为  $[-15^\circ, 15^\circ] \in [-43.5^\circ, 43.5^\circ]$ ; 绕 Z 轴旋转角度范围为  $[-60^\circ, 60^\circ] \in [-90^\circ, 90^\circ]$ ; 绕 X 轴旋转角度范围内  $[-15^\circ, 15^\circ] \in [-90^\circ, 90^\circ]$ ; 因此, 可以保证 P3P 算法解唯一。

## 2 测量精度分析

### 2.1 位置测量精度

当靶标在 X 方向移动时, 假设靶标中心到光心距离为 d, 靶标水平两点距离为  $a=140\text{ mm}$ , 像元尺寸为 p, 焦距为 f, x 为靶标水平两点间成像像元数。则有

$$d = \frac{a \times f}{x \times p} \quad (1)$$

$$\frac{\partial d}{\partial x} = -\frac{a \times f}{p \times x^2} = -\frac{d^2 \times p}{a \times f} \quad (2)$$

$\partial d$  即 Z 方向的位置测量精度,  $\partial x$  为点定位精度。

相机的主要参数如下。

- (1) 图像传感器像元尺寸:  $6.45\ \mu\text{m} \times 6.45\ \mu\text{m}$ ;
- (2) 有效像元数:  $1\ 024\ \text{pixel} \times 1\ 024\ \text{pixel}$ ;
- (3) 焦距:  $6.8\ \text{mm}$ ;
- (4) 视场角:  $52^\circ \times 52^\circ$ 。

根据前面公式计算不同距离下, 靶标沿 X 轴平移位置测量精度如表 1 所示。

表 1 沿 X 轴平移位置测量精度

Tab.1 Translational position measurement accuracy along the X axis

Distance/mm	Point positioning accuracy/pixel	Position measurement accuracy along the X axis/mm
1 500	1	15.24
500	1	1.69
200	2	0.54

对实际应用中的手眼相机, 由于在 Y、Z 方向存在机械冗余设计, 笔者最关心的是 X 轴方向的测量精度, Y 轴、Z 轴方向平移测量精度仅与像元分辨率有关, 在此不做多余分析。

### 2.2 姿态测量精度

#### 2.2.1 绕 X 轴旋转测量精度

当靶标绕 X 轴旋转时, BC 间直线旋转如图 4 所示。x 为靶标旋转时 C 点移动的像素数。

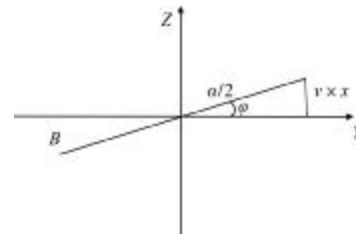


图 4 靶标绕 X 轴旋转示意图

Fig.4 Sketch map of target rotation about X-axis

假设不同距离下的像元分辨率为 v, 则  $v =$

$\frac{d \times p}{f}$ , 根据正弦定理得:

$$\frac{v \times x}{\sin \varphi} = \frac{a/2}{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2})}$$

$$\varphi = 2 \arcsin(v \times x / a) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{2v}{\sqrt{a^2 - v^2 x^2}}$$

由于靶标绕 X 轴旋转角度范围为  $[-60^\circ, 60^\circ]$ , 因此当  $\varphi = \pm 60^\circ$  时, 误差  $\partial \varphi$  最大, 此时  $vx = 70\ \text{mm}$ , 由此计算不同距离下, 靶标绕 X 轴旋转角度测量精度如表 2 所示。

表 2 绕 X 轴旋转角度测量精度

Tab.2 Rotational angle measurement accuracy about the X-axis

Distance/mm	Point positioning accuracy/pixel	Angle measurement accuracy about the X axis/( $^\circ$ )
1 500	1	1.34
500	1	0.45
200	2	0.36

#### 2.2.2 绕 Y、Z 轴旋转测量精度

靶标绕 Y 轴或 Z 轴旋转如图 5 所示。

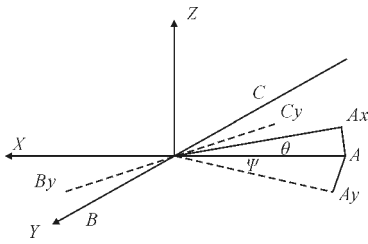


图 5 靶标绕 Y 轴、Z 轴旋转示意图

Fig.5 Sketch map of target rotation about Y-axis and Z-axis

其中立柱高为  $b$ , 绕 Y 轴旋转时, A 点旋转到  $A_x$  点位置; 绕 Z 轴旋转时, A、B、C 三点旋转到  $A_y$ 、 $B_y$ 、 $C_y$  点。 $x$  为靶标旋转时立柱点 A 移动的像素数。根据正弦定理得:

$$\theta, \Psi = 2\arcsin(v \times x / 2b)$$

$$\frac{\partial \theta, \Psi}{\partial x} = \frac{v}{\sqrt{b^2 - \frac{1}{4}v^2 x^2}} \quad (4)$$

由于靶标绕 Y、Z 轴旋转角度范围  $[-15^\circ, 15^\circ]$ , 因此当  $\theta, \Psi = \pm 15^\circ$  时,  $vx = 67 \times \sin(15^\circ/2) \times 2 = 17.49 \text{ mm}$  最大, 误差最大, 由此计算不同距离下, 靶标高度对靶标绕 Y 轴或 Z 轴旋转角度测量精度的影响如表 3 所示。

表 3 绕 Y 轴或 Z 轴旋转角度测量精度

Tab.3 Rotational angle measurement accuracy about Y-axis or Z-axis

Distance/mm	Point positioning accuracy/pixel	Angle measurement accuracy about the X axis/( $^\circ$ )
1 500	1	1.17
500	1	0.35
200	2	0.22

### 3 实验

#### 3.1 检测方法

通常情况下, 对手眼相机测量精度进行检测, 应使目标产生三维位姿的变化, 再由手眼相机测出位姿信息, 计算测量精度。这样, 首先需要使目标能够产生三个相互垂直方向的平移和旋转, 考虑到实际操作和装置稳定性等问题, 单纯使目标产生三维位姿不易实现。笔者提出了一种相对位姿检测方法, 既可实现对手眼相机位姿精度的精确检测, 又便于实验实现, 具体步骤如下。

为了产生位置和姿态变化, 利用三个相互垂直的平移台(X、Y、Z 轴)和三个旋转轴(T1 轴、T2 轴、R 轴)相互垂直的旋转台构成六自由度位姿发生器。将手眼相机放置在平台上, 该平台可沿两个垂直方向(X 轴、Z 轴)平移, 将合作靶标放置在三维旋转台上, 同时该旋转台可沿 Y 轴平移, 两部分共同完成靶标与相机之间的六个自由度的相对位姿变化, 如图 6 所示。

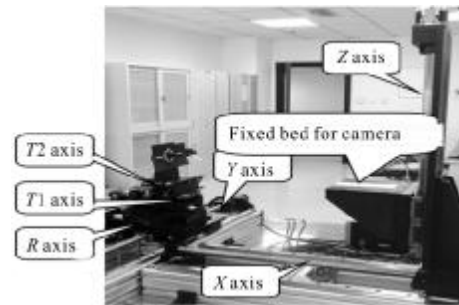


图 6 六自由度位姿发生器组成关系

Fig.6 Relationship between six DOF generator

用六自由度位姿发生器产生位姿  $V_0$ , 将  $V_0$  作为约定真值, 用手眼相机测量 100 次该位姿, 记录输出值  $V_i (i=1, 2, \dots, 99, 100)$  作为观测值, 计算中误差:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (V_i - V_0)^2}{100}} \quad (5)$$

用  $m$  来评价测量精度, 具体位姿状态选取如下。

#### (1) 距离测量精度

##### 1) Z 向

在 200~1500 mm 间取 11 个点, 具体值为: 1500 mm、1200 mm、1000 mm、800 mm、600 mm、550 mm、500 mm、450 mm、400 mm、300 mm、200 mm;

##### 2) Y 向(Z=1500 mm)

在 -200~200 mm 间取 5 个点, 具体值为: -200 mm、-100 mm、0 mm、100 mm、200 mm;

##### 3) X 向(Z=1500 mm)

在 -300~200 mm 间取 6 个点, 具体值为: -300 mm、-200 mm、-100 mm、0 mm、100 mm、200 mm;

#### (2) 旋转测量精度

在 Z=1500 mm 处分别绕 X、Y、Z 轴旋转, 具体角度为:

X 轴  $-15^\circ, 0^\circ, +15^\circ$ ;

Y 轴  $-15^\circ, 0^\circ, +15^\circ$ ;

Z 轴  $-60^\circ, 0^\circ, +60^\circ$ ;

在  $Z=490$  mm 处, 在相机视场内分别绕 X、Y、Z 轴旋转一随机角度。

### 3.2 检测结果

首先对六自由度发生装置进行了标定<sup>[13-14]</sup>, 由于篇幅所限, 此处不做详细说明。

#### (1) 距离测量精度

以手眼相机为基准, 定义抓捕标志器与手眼相机距离为  $Z$ (单位:m), 位置测量精度应优于按如下公式计算出的结果:

$$20(Z-0.2)^2-3(Z-0.2)+1.5(\text{mm}) \quad (6)$$

#### (2) 旋转测量精度

以手眼相机为基准, 定义抓捕标志器与手眼相机距离为  $Z$ , 在距离 0.2~0.5 m 单轴测量精度不大于  $0.8^\circ$ , 在距离 0.5~1.5 m 单轴测量精度不大于  $2^\circ$ 。

位姿测量精度检测结果详见表 4~表 6, 为了便于比较, 将理论分析的测量精度也列在了表中。

表 4 X 向距离测量精度 (单位:mm)

Tab.4 Distance measurement accuracy along X-axis (Unit: mm)

Conventional true value $V_0$	Request for measurement accuracy	Theoretical measurement accuracy	Root mean square error ( $\pm$ )	Relative error of measurement accuracy
1 500	31.4	15.2	25.60	0.693%
1 200	18.5	9.8	16.67	0.573%
1 000	11.9	6.8	10.52	0.372%
800	6.9	4.3	6.43	0.266%
600	3.5	2.4	3.01	0.102%
550	2.9	2.0	2.55	0.100%
500	2.4	1.7	2.09	0.078%
450	2	1.4	1.75	0.078%
400	1.7	1.1	1.42	0.080%
300	1.4	0.6	1.14	0.180%
200	1.5	0.54	1.10	0.290%

检测结果表明, 距离测量精度的检测相对误差最大不超过 0.7%, 旋转测量精度的检测相对误差在较远处( $X=1\ 500$  mm)最大不超过 1.6%, 而在较近处的相对误差最大达到了 14.3%, 这是由于用于测量的旋转角度(约定真值)较小造成的, 实际上理论误差与中误差相差并不大, 仅为  $0.1^\circ$ 。检测结果满足测

量精度的要求, 采用中误差表征检测结果符合统计学规律, 检测结果合理可信。

表 5  $X=1\ 500$  mm 处旋转测量精度 (单位:  $^\circ$ )

Tab.5 Rotation measurement accuracy where  $X=1\ 500$  mm (Unit:  $^\circ$ )

Conventional true value $V_0$	Request for measurement accuracy	Theoretical measurement accuracy	Root mean square error ( $\pm$ )	Relative error of measurement accuracy	
About X axis	15	2	1.17	1.4	1.533%
	0	2	1.16	0.5	/
	-15	2	1.17	1.4	1.533%
About Y axis	15	2	1.17	1.1	0.467%
	0	2	1.16	0.7	/
	-15	2	1.17	1.0	1.133%
About Z axis	-60	2	1.34	1.0	0.567%
	0	2	1.16	0.6	/
	60	2	1.34	1.0	0.567%

表 6  $X=490$  mm 处旋转测量精度 (单位:  $^\circ$ )

Tab.6 Rotation measurement accuracy where  $X=490$  mm (Unit:  $^\circ$ )

Conventional true value $V_0$	Request for measurement accuracy	Theoretical measurement accuracy	Root mean square error ( $\pm$ )	Relative error of measurement accuracy	
About X axis	-1.5	0.8	0.34	0.38	2.667%
About Y axis	0.7	0.8	0.34	0.24	14.286%
About Z axis	5	0.8	0.38	0.40	0.400%

## 4 结 论

文中根据机器视觉高精度应用的要求, 以实际应用中的手眼相机为例, 介绍了机器视觉测量位姿信息的原理, 并从理论上对测量精度进行了分析。从实验上对位姿测量精度进行验证, 提出了以产生相对六维位姿变化进行测量精度检测的方法, 并以中误差作为测量精度的评价依据。检测结果表明, 距离测量精度最大为 25.60 mm, 旋转测量精度最大为  $1.4^\circ$ , 均满足测量精度的要求。



## 参考文献:

- [1] Chen Manlong. Error analysis of thread measurement with machine vision [J]. *Laser Technology*, 2014, 38 (1): 109-113. (in Chinese)  
陈曼龙. 机器视觉螺纹测量的误差分析 [J]. *激光技术*, 2014, 38(1): 109-113.
- [2] Yan Zugen, Li Ming, Xu Kefei, et al. High-speed robot auto-sorting system based on machine vision [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2014, 32(1): 28-31. (in Chinese)  
晏祖根, 李明, 徐克非, 等. 高速机器人分拣系统机器视觉技术的研究[J]. *包装与食品机械*, 2014, 32(1): 28-31.
- [3] Wei Guang, Tan Qingchang. Measurement of shaft diameters by machine vision[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3246-3253.
- [4] He Boxia, He Yong, Bu Xiongzhu, et al. Cooperative measurement method of multi-FOV for machine vision [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(12): 2821-2829. (in Chinese)  
何博侠, 何勇, 卜雄洙, 等. 机器视觉多视场协同测量方法 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2821-2829.
- [5] Ye Shenghua, Zhu Jigui, Wang Zhong, et al. Visual inspection technology and its application [J]. *China Engineering Science*, 1999, 1(1): 262-263. (in Chinese)  
叶声华, 郝继贵, 王仲, 等. 视觉检测技术及应用[J]. *中国工程科学*, 1999, 1(1): 262-263.
- [6] Liu Yu, Chen Feng, Huang Jianming, et al. Study on vision measurement technology of space robotic arm [J]. *Manned Spaceflight*, 2014, 20(2): 127-133. (in Chinese)  
刘玉, 陈凤, 黄建明, 等. 空间机械臂视觉测量技术研究 [J]. *载人航天*, 2014, 20(2): 127-133.
- [7] Huang Guiping, Li Guangyun, Wang Baofeng, et al. Evolution for monocular vision measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(4): 314-317.  
黄桂平, 李广云, 王保丰, 等. 单目视觉测量技术研究[J]. *计量学报*, 2004, 25(4): 314-317.
- [8] Tang Wei, Ye Dong, Yuan Feng, et al. Application of grey incidence method to error analysis of binocular vision measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 503-513. (in Chinese)  
唐巍, 叶东, 袁峰, 等. 灰色关联分析法在双目视觉测量系统误差分析中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 503-513.
- [9] Cui Yi, Zhou Fuqiang, Wang Yexin, et al. Precise calibration of binocular vision system used for vision measurement [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9134-9149.
- [10] Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen, et al. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312001-1-0312001-7. (in Chinese)  
晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312001-1-0312001-7.
- [11] Zhou Gen. The application of computer in automatic measure of the non-round degree of the parts[J]. *Basic Automation*, 2001, 8(6): 50-53. (in Chinese)  
周亘. 微机在工件不圆度自动测量中的应用 [J]. *基础自动*, 2001, 8(6): 50-53.
- [12] Zhou Xin, Zhu Feng. A note on unique solution conditions of the P3P problem [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(12): 1696-1701. (in Chinese)  
周鑫, 朱枫. 关于 P3P 问题解的唯一性条件的几点讨论 [J]. *计算机学报*, 2003, 26(12): 1696-1701.
- [13] Xu Tao, Li Bo, Liu Tingxia, et al. Initial calibration of tracking turntable for vehicle-borne opto-electronic tracking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 782-789. (in Chinese)  
徐涛, 李博, 刘廷霞, 等. 车载光电跟踪系统跟踪转台的初始标定[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 782-789.
- [14] Li Xingfei, Yao Wang, Zhao Xinhua, et al. Joint calibration of multi-sensor measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2877-2883. (in Chinese)  
李醒飞, 姚旺, 赵新华, 等. 多传感器测量系统的联合标定 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2877-2883.