

光电经纬仪姿态测量精度室内检测方法

田留德^{1,2} 刘朝晖¹ 赵建科¹ 段亚轩^{1,2} 潘亮¹ 赵怀学¹ 段炯¹ 龙江波¹ 王争锋¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现光电经纬仪等靶场光测姿态测量设备测量精度的室内测试和评价,介绍了光电经纬仪对空间轴对称目标的姿态交会测量的原理。利用检测架、平行光管、目标轮廓靶及光源室内模拟不同姿态角的无穷远目标。建立了利用目标特征点的方位角、俯仰角计算目标姿态角的精确数学模型。用高精度经纬仪对目标上的多个特征点进行测量,用最小二乘法按该数学模型对目标姿态进行拟合,得到模拟目标的姿态,经验证该方法的标定精度可达 0.05° 。以该标定结果为模拟目标姿态的真值,光电经纬仪对同一模拟目标姿态进行动态测量,将测量结果与真值进行比较,可确定光电经纬仪的姿态测量精度。

关键词 测量;姿态标定;最小二乘法;光电经纬仪;姿态模拟

中图分类号 TP317.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0812002

Indoor Test Method of Attitude Measurement Accuracy of Photoelectric Theodolite

Tian Liude^{1,2} Liu Chaohui¹ Zhao Jianke¹ Duan Yanxuan^{1,2} Pan Liang¹
Zhao Huaixue¹ Duan Jiong¹ Long Jiangbo¹ Wang Zhengfeng¹

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to realize indoor test and evaluation of attitude measurement accuracy of range optical attitude measurement equipment, some research work has been done. The principle of intersection surveying the attitude of spatial axisymmetric target with photoelectric theodolites is introduced. The device is introduced to simulate the attitude of infinite object indoor, which is composed of measurement rack, collimator, light source, and targets with different angles. Precise mathematical model is established, which is relation with target attitude angle and azimuth and elevation of target feature points. Firstly, several feature points on the target are measured with high precision theodolite. Secondly, according to the above mathematical model, the target attitude is fitted by using the least square method, then, the target attitude angle is got. It has been proved that the calibration precision can reach 0.05° . Consider the calibration results as true value of the target attitude angle, dynamic measurements are performed on the same target by using photoelectric theodolite and attitude measurement error of the theodolite can be obtained in comparison with two measurement results.

Key words measurement; attitude calibration; least square method; photoelectric theodolite; attitude simulation

OCIS codes 120.3930; 120.4640; 120.4800; 120.1680

1 引言

随着现代武器装备不断向高精度、高机动性和

高智能化方向发展,不仅要求靶场光测设备在性能上具有高精度、高分辨力、高可靠性和强实时性,而

收稿日期: 2014-02-10; 收到修改稿日期: 2014-03-31

基金项目: 中国科学院创新基金(Y154451ZZ0)

作者简介: 田留德(1984—),男,博士研究生,工程师,主要从事光电测量设备精密检测技术方面的研究。

E-mail: tianliude@126.com

导师简介: 刘朝晖(1965—),男,博士生导师,研究员,主要从事光学跟踪测量仪器总体技术、空间 ATP 技术、红外弱目标与红外深空探测技术等方面的研究。E-mail: lzh@opt.ac.cn

且要求在功能上突破传统的目标“质点化”的测量模式,将目标作为一个具有空间三维几何结构的“立体化”目标进行处理^[1-6],实现目标空间三维参数测量^[7-10],如导弹的起飞,飞行过程中的俯仰、偏航、滚动,导弹的再入,火箭的飘移、级间分离、助推器脱落,飞机发射导弹时导弹脱钩姿态,末端制导炮弹开仓点姿态,激光制导炸弹导引头与弹体夹角等测量。测量和记录每一时刻目标的飞行轨迹和三维姿态信息,可以判断目标入轨或攻击的准确性,为型号设计和改进提供依据。国内多位学者就目标三维姿态测量方法进行了研究,文献[1]提出了一种基于双站面面交会原理^[11-12]用光测设备获得的图像确定轴对称目标的俯仰角和偏航角的方法。文献[2]提出了一种基于目标特征点^[13-14]比例信息的单站姿态测量方法。文献[3]分析比较了光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交会两种方法测量飞机姿态的精度。文献[4]研究了基于惯量椭圆法的单站目标姿态测量方法。光学姿态测量设备出厂前需要对各性能指标进行测试,各项指标均满足技术要求才能出厂。目前,受室内条件的限制,姿态测量精度只能在外场进行测试和鉴定,需要耗费大量的人力和财力。因此,研究光学姿态测量设备室内姿态精度的测试方法,可以为靶场光测设备的设计和改进提供数据依据,对靶场光测设备的性能改进及发射场测控系统的发展具有重要意义^[15-16]。本文给出了一种室内姿态模拟方法,建立了利用目标特征点的方位角、俯仰角计算目标姿态角的精确数学模型,可以实现对模拟目标姿态的标定,从而解决光电经纬仪姿态测量精度室内测试和评价这一难题。

2 面面交会姿态测量原理

靶场被测目标如导弹、火箭、炸弹等可以认为是轴对称的,根据光电经纬仪等摄像测量设备拍摄的目标的数字图像,应用图像处理技术可以确定所拍摄目标图像的二维中轴线,该中轴线是被测目标中轴线在靶面上的投影^[17]。目标图像的二维中轴线与摄像系统的光学中心唯一确定一个空间平面,被测目标的中轴线必然在这个平面上。用两台光电经纬仪就能得到两个空间平面,这两个平面交于一条空间直线,这条直线就是被测目标的空间中轴线。求得被测目标的中轴线方程,就能方便得到被测目标的俯仰角、偏航角,其示意图如图1所示。若用多台经纬仪测量就能得到多个平面,由于测量存在误差,这些平面可能不交于同一直线。这时可用加权

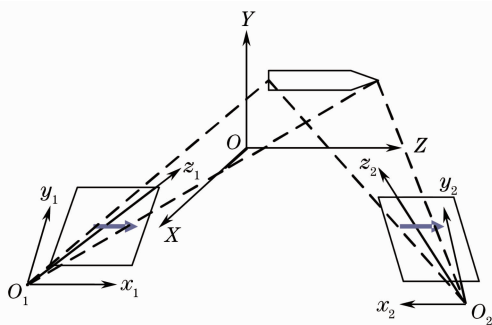


图1 交会测量原理

Fig. 1 Principle of intersection survey

平均的方法确定目标姿态角。

2.1 提取目标中轴线

目标在摄像机靶面上的图像如图2所示。对图像进行二值化处理,采用 Hough 变换,再用拟合算法可获得目标的边缘轮廓直线,设被测目标两条轮廓直线的方程为

$$x \cos \alpha_1 + y \sin \alpha_1 - p_1 = 0, \quad (1)$$

$$x \cos \alpha_2 + y \sin \alpha_2 - p_2 = 0, \quad (2)$$

式中 α_1, α_2 为直线的法线与 x 轴的夹角, p_1, p_2 为原点到直线的距离。

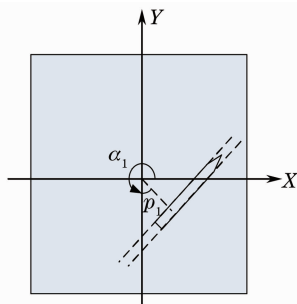


图2 目标中轴线

Fig. 2 Middle axis line of the target

则目标像的二维中轴线的方程为

$$x(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) + y(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) - (p_1 + p_2) = 0, \quad (3)$$

简写为

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha - p = 0. \quad (4)$$

2.2 目标俯仰角和偏航角

将各个测量设备的摄像坐标系下的平面方程转换成统一的全局空间坐标系下的平面方程,就可以交会求出这些平面的交线,即求出目标的空间中轴线。设平面方程为

$$a_1 x + b_1 y + c_1 z = 0, \quad (5)$$

$$a_2 x + b_2 y + c_2 z = 0. \quad (6)$$

目标中轴线的方向数为

x 方向：

$$l = \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

y 方向：

$$m = \begin{vmatrix} c_1 & a_1 \\ c_2 & a_2 \end{vmatrix}, \quad (8)$$

z 方向：

$$n = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

目标中轴线的姿态角为
偏航角：

$$\psi = \arctan\left(\frac{n}{l}\right), \quad (10)$$

俯仰角：

$$\phi = \arctan\left(\frac{m}{\sqrt{l^2 + n^2}}\right). \quad (11)$$

3 目标姿态模拟与标定

3.1 姿态交会测量不确定度来源

基于中轴线法多站交会测量空间目标的姿态，影响姿态测量的不确定度分量有：站点地理坐标的不确定度、站摄像坐标系不确定度、方位角和俯仰角的不确定度、摄像机焦距不确定度、目标中轴线的倾斜角和截距的不确定度^[18-19]。根据当前靶场的测试条件和各不确定度分量的大小，仿真结果表明：目标中轴线的倾斜角误差是最大的不确定度分量，其他分量相对较小，可以忽略不计。受实验室条件及场地等客观因素的限制，光电经纬仪姿态测量精度的室内测试方法可简化为：测量光电经纬仪对目标中轴线斜率的测量误差。

3.2 姿态板设计

靶场测试目标多数为轴对称目标，它们在摄像机靶面上的影像近似为矩形，因此，选择具有不同倾斜角的矩形图案模拟目标。由于目标的形状和大小会影像中轴线倾角的测量精度，目标的大小采用尺寸缩比等效的方法在实验室内用固定焦距的平行光管模拟。目标尺寸的计算模型为

$$l_m = \frac{L}{R} \cdot f', \quad (12)$$

式中 R 为目标的距离， f' 为平行光管焦距， L 为被测目标的尺寸， l_m 为姿态板上模拟目标尺寸。

为便于模拟目标姿态的标定，在姿态板的中心设计了十字丝，在十字丝对称位置刻有两组小十字丝。为了模拟多种目标的不同姿态，目标中轴线相

对十字丝夹角分别设计为 15° 、 20° 、 30° 和 60° ，加工后角度以标定值为准。目标姿态板如图 3 所示。

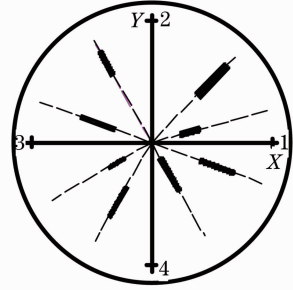


图 3 目标姿态板

Fig. 3 Attitude target

3.3 目标姿态标定模型

靶场测量中，光电经纬仪测量目标的俯仰角是以大地水平面为基准的，姿态板在平行光管焦平面上安装也具有随机性，因此，姿态板上各刻线所模拟目标的俯仰角也是未知的，该角度又是姿态角测量的标准，标定的精度直接影响测试和评估的精度，因此需要精确标定。下面给出目标倾斜角的标定模型。

图 4 表示了平行光管焦面上任意一点 $P(x, y)$ 所模拟无穷远目标的方位角和俯仰角。 O 是平行光管的像方节点， O' 是姿态板的中心， $XO'Y$ 坐标系为姿态板平面坐标系， P 为姿态板上任意一点， P' 为 P 在 Y 轴上的投影。 OC 为铅垂线， DOF 所在的平面为水平面。 $O-CDF$ 为球面。过 $O'C$ 的大圆弧交水平面于 D 。 OP 交球面于 B ，过 CB 的大圆弧交水平面于 F 。 OP' 交球面于 A 。记 O' 点的方位角为 A_0 ，俯仰角为 E_0 。

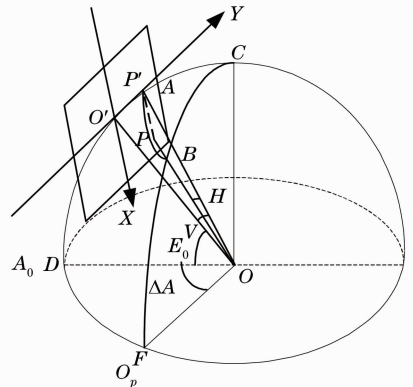


图 4 姿态板标定原理

Fig. 4 Principle of object attitude calibration

由摄像机的物像关系可得

$$H = \angle AOB = \arctan\left(\frac{x}{f'}\right), \quad (13)$$

$$V = \angle O'OA = \arctan\left(\frac{y}{f'}\right). \quad (14)$$

则 H 水平规划后对应的角度为

$$\Delta A = \angle DOF = \angle DCF, \quad (15)$$

在球面三角形 ABC 中,应用球面余切定理得到

$$c \tan \widehat{AB} \sin \widehat{AC} = c \tan \angle ACB \sin \angle CAB + \cos \angle CAB \cos \widehat{AC}, \quad (16)$$

$$c \tan H \cdot \cos(E_0 + V) = c \tan \Delta A \sin 90^\circ + \cos 90^\circ \sin(E_0 + V), \quad (17)$$

$$\tan \Delta A = \frac{\tan H}{\cos(E_0 + V)}, \quad (18)$$

$$\tan H = \tan \Delta A \cdot \cos(E_0 + V). \quad (19)$$

再次利用余切定理得到

$$c \tan \widehat{BC} \sin \widehat{AC} = c \tan \angle BAC \sin \angle BCA + \cos \angle BCA \cos \widehat{AC}, \quad (20)$$

$$c \tan E \cos(E_0 + V) = c \tan 90^\circ \sin \Delta A + \cos \Delta A \sin(E_0 + V), \quad (21)$$

$$\tan E = \tan(E_0 + V) \cos \Delta A, \quad (22)$$

$$V = \arctan(\tan E / \cos \Delta A) - E_0, \quad (23)$$

$$x = \tan \Delta A \cos(E_0 + V) \cdot f', \quad (24)$$

$$y = \tan V \cdot f'. \quad (25)$$

(24)式和(25)式为目标姿态标定的精确模型。

3.4 实验结果及分析

将姿态板任意安装在平行光管焦面上,用测角精度为 $0.5''$ 的经纬仪对各目标姿态进行精确测量。具体方法为:首先,对姿态板的中心进行测量,方位角 $A_0 = 0^\circ 0' 0''$,俯仰角 $E_0 = 36^\circ 18' 11.3''$;然后,沿各目标中轴线选取多个测量点,依次用经纬仪对各测量点进行测量,记录各测量点的方位俯仰角 (A_i, E_i),最后用前面建立的数学模型,用线性最小二乘法拟合各目标中轴线的斜率,按公式 $\theta = \arctan k$ 计算各目标的倾斜角。其中,1号,2号,3号目标的测量结果分别如表 1~3 所示。

表 1 1号目标测量结果

Table 1 Target measurement results of No. 1

Order number	A_i	E_i
1	359°46'10.2"	36°15'8.0"
2	359°48'19.3"	36°15'36.2"
3	359°53'45.2"	36°16'44.5"
4	359°56'44.1"	36°17'26.8"
5	0°1'51.4"	36°18'33.6"
6	0°5'50.8"	36°19'28.5"
7	0°10'6.8"	36°20'24.6"
8	0°14'20.4"	36°21'23.1"
9	0°27'30.8"	36°24'19.1"
10	0°31'45"	36°25'19.6"

Tilt angle: -20.5587°

表 2 2号目标测量结果

Table 2 Target measurement results of No. 2

Order number	A_i	E_i
1	359°51'50.8"	36°31'10.1"
2	359°52'51.1"	36°29'28.7"
3	359°55'45.2"	36°24'57.4"
4	359°59'15.2"	36°19'21.5"
5	0°1'39.0"	36°15'38.7"
6	0°2'55.9"	36°13'33.9"
7	0°4'38.4"	36°10'54.6"
8	0°8'2.9"	36°5'30.7"
9	0°9'18.0"	36°3'31.3"
10	0°13'14.3"	36°57'11.2"

Tilt angle: 69.5513°

表 3 3号目标测量结果

Table 3 Target measurement results of No. 3

Order number	A_i	E_i
1	0°15'40.0"	36°10'31.2"
2	0°16'15.6"	36°10'17.5"
3	0°16'47.4"	36°9'59.1"
4	0°17'14.6"	36°9'47.9"
5	0°17'45"	36°9'33.3"
6	0°18'32.7"	36°9'10.9"
7	0°19'5.9"	36°8'53.9"
8	0°19'42.3"	36°8'34.2"
9	0°20'30.0"	36°8'11.0"
10	0°20'50.9"	36°8'3.4"

Tilt angle: 39.6362°

表 4 测量结果比较

Table 4 Comparison of measurement results

Angle	Measured value	True value	Error
Angle between 1 and 2	89.890°	89.945°	-0.055°
Angle between 1 and 3	60.195°	60.144°	0.051°

用德高马尔公司生产的三坐标测量机对姿态板上各目标之间的夹角进行精确标定,其标定精度为 0.01° ,作为真值。经纬仪标定的结果与真值之差即为该方法的姿态角标定误差,从表 4 可以看出,用经纬仪对目标多点测量,然后用线性最小二乘法拟合目标倾角的方法的误差约为 0.05° 。引起该误差的主要因素有:选取的测量点偏离目标中轴线、经纬仪测量误差、平行光管焦距测量误差。其中,测量点选取误差对测量结果的影响最为严重,可以通过增加测量点个数来提高测量精度。

4 结 论

用平行光管模拟无穷远目标,采用尺寸缩比等

效方法制作具有不同姿态的目标板,在实验室内完成了远处不同姿态目标的模拟。采用高精度经纬仪对目标进行多点测量,用目标靶面位置坐标与其方位俯仰角的模型用最小二乘法拟合目标的倾斜角,完成了目标姿态的标定。标定结果与德国马尔公司生产的三坐标测量机测量结果比对,误差为 0.05° 。和外场通过较飞试验评价光电经纬仪姿态测量精度相比,该方法具有测试设备简单、成本低廉、能够较早地发现问题的优点,但是,由于室内模拟的目标是静止的,靠被测经纬仪运动来实现动态测量,而实际测量中目标和经纬仪都是运动的,因此,室内检测方法的精度低于较飞试验的鉴定精度。目前,光电经纬仪姿态测量精度在 1° 左右,能够满足光电经纬仪等光学姿态测量设备测量精度的室内测试和评价。

参 考 文 献

- 1 Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Chen Guojun. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(2): 15-19.
于起峰,孙祥,陈国军.用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J].国防科技大学学报,2000,22(2):15-19.
- 2 Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Qiu Zhiqiang. Approach of determination of object's 3D pose from mono-view [J]. Optical Technique, 2002, 28(1): 77-82.
于起峰,孙祥,邱志强.从单站光测图像确定空间目标三维姿态[J].光学技术,2002,28(1):77-82.
- 3 Zhao Lirong, Liu Yuhan, Zhu Wei, et al.. Measurement of aircraft attitude by spatial cosine relationship in single-station and planes to intersection in multi-station of electro-optical theodolite [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 11(17): 2786-2793.
赵立荣,柳玉哈,朱玮,等.光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交汇的飞机姿态测量[J].光学精密工程,2009,11(17):2786-2793.
- 4 Peng Xiaodong, Zhou Sizhong, Liu Bo, et al.. Application of ellipse of inertia in measuring the object's 3D pose from mono-view [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 568-573.
彭晓东,周泗忠,刘波,等.惯量椭圆法在单站光测目标三维姿态测量中的应用[J].光子学报,2007,36(3):568-573.
- 5 He Zhaocai, Hu Baoan. Optical Measurement System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 267-276.
何照才,胡保安.光学测量系统[M].北京:国防工业出版社,2002.267-276.
- 6 Hao Gangtao, Du Xiaoping. Advances in optical measurement of position and pose for space non-cooperative target [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080028.
郝刚涛,杜小平.空间非合作目标位姿光学测量研究现状[J].激光与光电子学进展,2013,50(8):080028.
- 7 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.
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.
- 8 Fu Sihua, Yu Qifeng, Wang Mingzhi, et al.. Railway geometric parameters measurement system based on videometrics [J]. Acta

- Optica Sinica, 2010, 30(11): 3203-3208.
伏思华,于起峰,王明志,等.基于摄像测量原理的轨道几何参数测量系统[J].光学学报,2010,30(11):3203-3208.
- 9 Wang Xiaoming, Qiao Yanfeng, Song Liwei, et al.. Measurement of three-dimensional attitude by single optoelectrical and radar integration instrument [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1779-1786.
王晓明,乔彦峰,宋立维,等.用单站光电雷达一体化系统测量目标三维姿态[J].光学精密工程,2011,19(8):1779-1786.
- 10 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.
- 11 Sun Nan, Zhang Liyan, Ye Nan, et al.. Calibration of binocular stereo measurement system based on calibration cross [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412001.
孙楠,张丽艳,叶楠,等.基于十字靶标的双目立体测量系统标定[J].光学学报,2012,32(4):0412001.
- 12 Wen Qingchuan, Da Feipeng, Fang Xu. Calibration for gaze tracking system based on binocular stereo vision [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1015002.
温晴川,达飞鹏,方旭.基于双目立体视觉的视线跟踪系统标定[J].光学学报,2012,32(10):1015002.
- 13 Li Jing, Yuan Feng, Hu Yinghui. Attitude measurement of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1635-1641.
李晶,袁峰,胡英辉.基于多点合作目标的多线阵CCD空间物体姿态测量[J].光学精密工程,2013,21(6):1635-1641.
- 14 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua, et al.. Study on deformation measurement of position and attitude based on monocular vision [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, 20(6): 775-778.
姜广文,晁志超,伏思华,等.基于单摄像机的物体位置和姿态变形测量研究[J].光电子·激光,2009,20(6):775-778.
- 15 Dai Dongkai, Wang Xingshu, 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.
- 16 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.
- 17 Ai Lili, Yuan Feng, Ding Zhenliang. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1): 161-165.
艾莉莉,袁峰,丁振良.应用线阵CCD的空间目标外姿态测量系统[J].光学精密工程,2008,16(1):161-165.
- 18 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312001.
晁志超,伏思华,姜广文.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.
- 19 Gao Xuehai, Xu Kejun, Zhang Han. Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 1479-1485.
高学海,徐科军,张瀚.基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法[J].仪器仪表学报,2007,28(8):1479-1485.