

舰载光电跟踪系统视场消旋方法研究

吕舒^{1,2} 张涯辉¹ 包启亮¹ 陈洪斌¹¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在舰载平台上的光电跟踪系统, 由于船体姿态的变化, 其视场会沿视轴转动从而引起跟踪误差。为了解决这一问题, 提出了一种基于四元数坐标变换的补偿方法。通过研究视场在各个坐标系下的状态, 定量地给出了船体姿态对视场旋转的影响, 并确定了视场旋转量与方向, 同时, 研究了跟踪系统装配误差对视场旋转的影响, 为实时消除由船摇引起的视场旋转提供了理论依据。

关键词 光学器件; 光电跟踪; 视场消旋; 四元数; 舰载

中图分类号 TP391.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.042303

Despinning Scheme of Shipboard Electro-Optical Tracking System

Lü Shu^{1,2} Zhang Yahui¹ Bao Qiliang¹ Chen Hongbin¹¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A kind of tracking error of shipboard electro-optical tracking system is caused by the rotation of vessel. In order to solve this problem, a method using coordinate transformation based on quaternion is proposed. By analyzing the viewing field in each coordinate system, the effect of vessel attitude on the viewing field is deduced. Meanwhile, the effect of the installation misalignment on the viewing field is deduced too. The result provides a theoretical basis for real-time despinning of shipboard electro-optical tracking system.

Key words optical devices; electro-optical tracking; despinning; quaternion; shipboard

OCIS codes 230.2090; 100.4999; 150.5495

1 引言

视场旋转在潜水导航^[1]、运动体精确测量^[2-5]和动平台下光电跟踪^[6-7]等任务中影响着目标定位的精度, 因为这些观测与传统的固定基观测是不同的。观测设备所在平台的姿态变化, 使得观测设备的视轴以及视场会受到较大的影响, 为精确测量定位带来了很大的困难。现行的解决方案大致分为两类: 其一为机械方法, 即设计稳定平台削弱或隔离平台姿态变化, 将测量系统置于稳定平台之上; 其二为补偿法^[8], 即计算出动平台对测量系统视轴方位俯仰方向上的影响, 通过控制系统加以补偿。

目前, 大部分动平台视轴稳定技术只关注动平台对测量视轴方位和俯仰方向上的影响, 而忽略了视轴的旋转, 而且将平台与观测设备简化为同一参考系。然而, 在一些特殊应用中, 测量点与视轴并不重合, 而是有一固定距离, 称为偏置量。当视轴旋转时, 视轴会依据测量点与偏置量而偏移, 从而引入测量误差。针对这一问题, 本文以舰载光电跟踪系统为例, 推算出视轴的旋转角, 来修正偏置向量, 从而消除因此引入的误差。

2 相关坐标系定义

与地基光电跟踪系统相比, 作为运动平台的船体的姿态变化使得舰载光电跟踪系统的描述更加复杂。本文采用坐标变换的方法, 涉及以下几个坐标系。

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-11-12; 网络出版日期: 2014-03-28

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 吕舒(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事信息融合方面的研究。E-mail: lvshu0523@163.com

导师简介: 包启亮(1967—), 男, 研究员, 主要从事控制系统方面的研究。E-mail: control@ioe.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

2.1 站点坐标系

站点坐标系 n 的原点在运动平台与其上的光电跟踪设备所在地面点上。如图 1 所示, x_n 轴指向正西, y_n 轴指向正北, z_n 轴垂直于 x_n 轴和 y_n 轴指向天空。

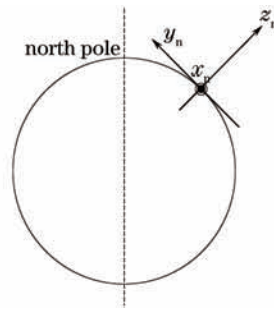


图 1 站点坐标系定义

Fig.1 Denfinition of the navigation reference frame

2.2 平台坐标系

平台坐标系 b 坐落于运动平台之上。如图 2 所示, z_b 轴指向平台上方, y_b 轴指向平台前方, x_b 轴遵循右手定则。

2.3 仪器坐标系

仪器坐标系 e 坐落于光电跟踪仪上, 由于装配过程有误差, 仪器坐标系与平台坐标系并不完全重合。如图 2 所示, z_e 轴指向仪器天顶, y_e 轴为仪器安装时的前方, x_e 轴根据右手定则规定。

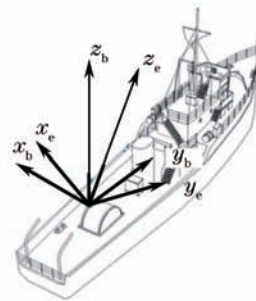


图 2 平台坐标系与仪器坐标系定义

Fig.2 Definition of the vessel reference frame and the equipment reference frame

2.4 透视模型坐标系

透视模型坐标系视场坐标系 s 位于光电跟踪仪的视轴之上, z_s 轴与视轴重合, 从仪器内指向外, y_s 轴与视场纵轴重合, x_s 轴与视场横轴重合。

3 求取视场旋转角

3.1 视场旋转角

所谓的视场旋转角, 是指视场的 x_s 轴与水平面的夹角, 如图 3 所示。图中, $ABCD$ 表示视场, $O'_s x'_s$ 是视场 x_s 轴在水平面 xOy 上的投影, θ 角为视场旋转的角度。

本文将采用的方法为坐标变换法, 即将视场的 x_s 轴转换至站点坐标系下, 再求取其与水平面射影之夹角 θ 。

3.2 坐标变换表示方法

传统的坐标变换多使用欧拉角的转换矩阵。然而, 四元数被用于计算机图形学之后, 四元数法以其表示的运动方程无奇异点、计算量较欧拉角小近 30% 等优点^[8-11], 迅速在坐标变换等领域被广泛应用。

四元数是包含四个分量的超级复数, 可以表示旋转, 其基本形式为

$$q = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T = \left[\cos \frac{\theta}{2} \quad x \sin \frac{\theta}{2} \quad y \sin \frac{\theta}{2} \quad z \sin \frac{\theta}{2} \right]^T, \quad (1)$$

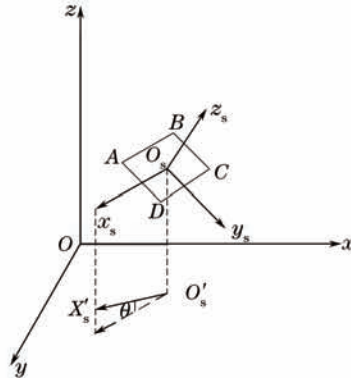


图3 视场旋转角示意图

Fig.3 Illustration of the gyrating angle

式中 θ 为旋转角, $[x \ y \ z]^T$ 为旋转轴, 且 $\|q\| = 1$ 。

设 $r_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ 为坐标系 C_0 下的坐标, $r_1 = (x_1, y_1, z_1)^T$ 为坐标系 C_1 下的坐标, q 表示坐标系 C_0 到坐标系 C_1 的旋转, 坐标变换公式为

$$[0 \ r_1^T]^T = q^* \otimes [0 \ r_0^T]^T \otimes q, \quad (2)$$

式中 $q^* = [q_0 \ -q_1 \ -q_2 \ -q_3]^T$, \otimes 为四元数乘法。

将其写成变换矩阵的形式:

$$r_1 = T r_0, \quad (3)$$

$$\text{式中 } T = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}.$$

3.3 透视模型坐标系内

在透视模型坐标系 $O_s x_s y_s z_s$ 下, 将代表视场 x_s 轴的向量定义为

$$r_s = (1, 0, 0)^T. \quad (4)$$

3.4 仪器坐标系内

透视模型视场坐标系是由仪器坐标系经姿态变化而得到。若设仪器的方位俯仰角分别为 A, E , 则根据设备的构造透视模型坐标系 $O_s x_s y_s z_s$ 到仪器坐标系 $O_e x_e y_e z_e$ 的旋转为沿 x_s 旋转 $-E$, 再沿 z_s 旋转 $-A$, 因此, 表示由 s 系到 e 系旋转关系的四元数为

$$q_{se} = \begin{bmatrix} \cos \frac{E}{2} \\ 0 \\ \sin \frac{E}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \cos \frac{A}{2} \\ 0 \\ \sin \frac{A}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{A}{2} \cos \frac{E}{2} \\ \cos \frac{A}{2} \sin \frac{E}{2} \\ -\sin \frac{A}{2} \sin \frac{E}{2} \\ \sin \frac{A}{2} \cos \frac{E}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{se0} \\ q_{se1} \\ q_{se2} \\ q_{se3} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

因此, 视场 x_s 轴在 $O_e x_e y_e z_e$ 系下的坐标为

$$r_e = T_{se} r_s, \quad (6)$$

$$\text{式中 } T_{se} = \begin{bmatrix} q_{se0}^2 + q_{se1}^2 - q_{se2}^2 - q_{se3}^2 & 2(q_{se1} q_{se2} + q_{se0} q_{se3}) & 2(q_{se1} q_{se3} - q_{se0} q_{se2}) \\ 2(q_{se1} q_{se2} - q_{se0} q_{se3}) & q_{se0}^2 - q_{se1}^2 + q_{se2}^2 - q_{se3}^2 & 2(q_{se2} q_{se3} + q_{se0} q_{se1}) \\ 2(q_{se1} q_{se3} + q_{se0} q_{se2}) & 2(q_{se2} q_{se3} - q_{se0} q_{se1}) & q_{se0}^2 - q_{se1}^2 - q_{se2}^2 + q_{se3}^2 \end{bmatrix}.$$

3.5 平台坐标系内

大多数视轴稳定的补偿方案中, 由于初装设备时的调平, 认为平台坐标系与仪器坐标系完全重合。但平台坐标系与仪器坐标系之间由于一些其他的原因, 仍然需要配准, 它们之间的配准关系需要一个转换矩阵 T_{eb} 来表示。该矩阵可以通过标定获得。因此, 视场 x_s 轴在 $O_b x_b y_b z_b$ 系下的坐标为

$$r_b = T_{cb} r_c \quad (7)$$

3.6 站点坐标系内

设平台的偏航、颠簸和横滚角分别为 Y, P, R , 则平台坐标系 Ox_b, y_b, z_b 到站点坐标系 Ox_n, y_n, z_n 的旋转为沿 x_b 旋转 $-R$, 再沿 y_b 旋转 $-P$, 最后沿 z_b 旋转 $-Y$, 如图 4 所示。

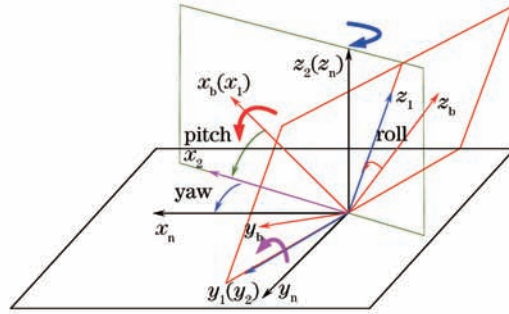


图 4 平台姿态旋转示意图

Fig.4 Illustration of vessel attitude gyrating

因此, 表示由 b 系到 n 系旋转关系的四元数为

$$q_{bn} = \begin{bmatrix} \cos \frac{R}{2} \\ 0 \\ \sin \frac{R}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \cos \frac{P}{2} \\ \sin \frac{P}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \cos \frac{Y}{2} \\ 0 \\ 0 \\ \sin \frac{Y}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{Y}{2} \cos \frac{P}{2} \cos \frac{R}{2} + \sin \frac{Y}{2} \sin \frac{P}{2} \sin \frac{R}{2} \\ \cos \frac{Y}{2} \sin \frac{P}{2} \cos \frac{R}{2} + \sin \frac{Y}{2} \cos \frac{P}{2} \sin \frac{R}{2} \\ \cos \frac{Y}{2} \cos \frac{P}{2} \sin \frac{R}{2} - \sin \frac{Y}{2} \sin \frac{P}{2} \cos \frac{R}{2} \\ -\cos \frac{Y}{2} \sin \frac{P}{2} \sin \frac{R}{2} + \sin \frac{Y}{2} \cos \frac{P}{2} \cos \frac{R}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{bn0} \\ q_{bn1} \\ q_{bn2} \\ q_{bn3} \end{bmatrix}$$

因此, 视场 x_s 轴在 O_b, x_b, y_b, z_b 系下的坐标为

$$r_n = T_{bn} r_b = (r_{nx}, r_{ny}, r_{nz})^T \quad (8)$$

$$\text{式中 } T_{bn} = \begin{bmatrix} q_{bn0}^2 + q_{bn1}^2 - q_{bn2}^2 - q_{bn3}^2 & 2(q_{bn1}q_{bn2} + q_{bn0}q_{bn3}) & 2(q_{bn1}q_{bn3} - q_{bn0}q_{bn2}) \\ 2(q_{bn1}q_{bn2} - q_{bn0}q_{bn3}) & q_{bn0}^2 - q_{bn1}^2 + q_{bn2}^2 - q_{bn3}^2 & 2(q_{bn2}q_{bn3} + q_{bn0}q_{bn1}) \\ 2(q_{bn1}q_{bn3} + q_{bn0}q_{bn2}) & 2(q_{bn2}q_{bn3} - q_{bn0}q_{bn1}) & q_{bn0}^2 - q_{bn1}^2 - q_{bn2}^2 + q_{bn3}^2 \end{bmatrix}$$

视场 x 轴在 O_b, x_b, y_b, z_b 系 x_b, O_y_b 平面上投影的向量坐标为

$$r_{ns} = (r_{nx}, r_{ny}, 0)^T \quad (9)$$

3.7 视场旋转角

由于实际船摇的大小有限, 因此由船摇引起的视场倾斜也有限。考虑船摇的范围, 设视场倾斜角为 θ , 则有

$$\theta = \begin{cases} \arccos \left(\frac{r_n \cdot r_{ns}}{|r_n| |r_{ns}|} \right), r_{nz} \leq 0 \\ -\arccos \left(\frac{r_n \cdot r_{ns}}{|r_n| |r_{ns}|} \right), r_{nz} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

若不考虑装配的误差, 即(7)式, 可以推得

$$\theta = f_1(A, P, R), \quad (11)$$

(11)式表示 θ 为关于 A, P 和 R 的函数, 视场旋转角只受到了仪器方位角(A)和平台部分姿态(P, R)的影响。而考虑配准误差, 结合(4)~(10)式, 可以推得

$$\theta = f_2(A, Y, P, R, T_{cb}). \quad (12)$$

从(12)式中可以看出, 视场的旋转角受到仪器方位角(A)、平台姿态(Y, P, R)以及装配误差(T_{cb})的影响, 较(11)式更加贴近实际情况。

3.8 误差传递分析

得到消旋角与各个状态量之间的关系后, 分析传感器观测误差如何传递到消旋角。

设 $A = A_0 + \alpha, Y = Y_0 + \beta, P = P_0 + \gamma, R = R_0 + \phi$, 其中 $\alpha, \beta, \gamma, \phi$ 为各个角度测量误差, 且远远小于各测量值。

将(4)~(10)和(12)式联立,同时认为 $\alpha, \beta, \gamma, \phi$ 很小,忽略高阶小项,可得到旋转角的误差与各测量值的误差。考虑到与船体姿态角相比,跟踪系统的指向角绝对值较大,因此将视场旋转角误差表达式整理为如下形式:

$$\theta_{err} = \cos(\theta - \Delta\theta) - \cos\theta = C_1 \sin(A_0 + \varphi_1) \sin(\lambda_1 Y_0 + \lambda_2 P_0 + \lambda_3 R_0 + \varphi_2) \sin(\lambda_4 \beta + \lambda_5 \gamma + \lambda_6 \phi) + C_2 \sin(\lambda_7 \alpha + \varphi_3), \quad (13)$$

式中 $C_1, C_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ 为各因变量的系数表达式, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 为公式调整的补偿角度表达式。从以上形式可以看出,误差传递的大小主要与仪器方位角 A 相关,在方位角满足 $A_0 = \frac{2k \pm 1}{2} \pi - \varphi_1 (k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots)$ 时,传递至视场旋转角的误差最大。

4 补偿偏置向量

根据前文解算出的旋转角,可以修改偏置向量。设原偏置向量为 $p_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$,补偿后偏置向量为 p_1 旋转 θ 角度,有

$$p_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

5 仿真实验

进行仿真实验分析数据处理流程的性能。船体姿态的数据采用了三级海况下数据。同时因为惯性传感器存在一定的滞后,所以需要对传感器数据进行数据配准。仿真两种情况:1)仿真假定观测目标不动,即设备方位角在小范围内变化;2)仿真假定观测目标围绕设备及平台做圆周运动,即设备方位角在大范围内变化。表1为仿真的两种情况结果误差比较,图5为观测定点时的旋转角仿真结果图线。图6为观测运动体时的旋转角仿真结果图线。

从误差比较表格表1可以看出,单纯滤波的误差并不尽如人意,与之相比,经过数据配准的结果误差减小较为明显。对比图5和图6可以看出,旋转角与旋转角误差随仪器方位角变化明显。工程中可认为船体姿态与仪器方位俯仰角的测量误差为高斯噪声,然而经过3.8节可知,原本测量的高斯噪声,传递到旋转角时,已经不再是高斯噪声,与船体姿态和仪器方位有着严重的耦合。由此可知,在求取旋转角的滤波过程中需要考虑噪声的特殊性质,采用一定的补偿机制。

表1 旋转角处理结果误差比较

Table 1 Comparison of gyrating angle of error

	Items	Error mean /rad	Error standard deviation /rad
Measuring fixed point	Gyrating angle with noise	0.0302	0.2606
	Gyrating angle filtered	0.0367	0.5158
	Gyrating angle aligned	0.0294	0.0803
Measuring moving point	Gyrating angle with noise	0.0080	0.2608
	Gyrating angle filtered	0.0221	1.6689
	Gyrating angle aligned	0.0056	0.1867

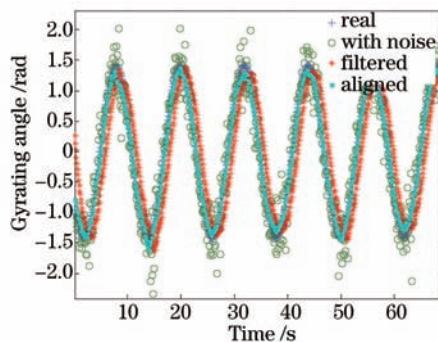


图5 观测定点视轴旋转角处理结果图

Fig.5 Illustration of gyrating angle when measuring fixed point

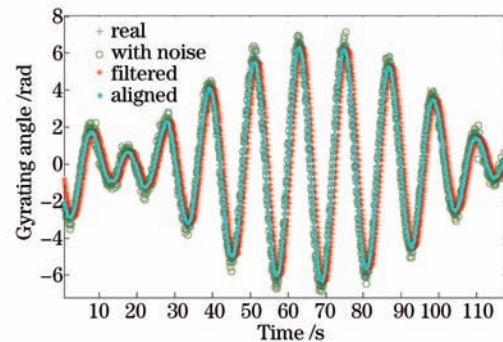


图6 观测动点视轴旋转角处理结果图

Fig.6 Illustration of gyrating angle when measuring moving point

6 结 论

舰载平台的姿态变化会给跟踪系统跟踪精度带来两方面的误差,大部分文献研究了视轴稳定的方法,而本文针对舰载光电跟踪系统由船摇引起的视场旋转,推导了船摇参数与视场旋转角度及方向之间的关系。此外,还考虑了实际测量系统与运动平台之间配准关系带来的影响。所得结论对于其他动平台光电跟踪系统的视场消旋同样适用。

参 考 文 献

- 1 James L Hench, Johanna H Rosman. Analysis of bottom-track and compass error in a self-contained acoustic doppler diver navigation console[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2010, 27: 1229-1238.
- 2 Francesco Conte, Valerio Cusimano, Alfredo Germani. Robust planar tracking via a virtual measurement approach[J]. *Eur J Control*, 2013,19(2): 146-156.
- 3 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.
- 4 Shen Fahua, Sun Dongsong, Wang Zhongchun, *et al.*. Beam scanning and wind inversion technique of a mobile Doppler lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0312004.
沈法华,孙东松,王忠纯,等.移动式多普勒激光雷达光束扫描及风场反演技术研究[J].*光学学报*, 2012, 32(3): 0312004.
- 5 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.
- 6 Ge Bing, Gao Huibin. Stabilization of LOS for carrier-based theodolite[J]. *Ship Science and Technology*, 2006, 28(6): 93-95.
葛兵,高慧斌.舰载经纬仪视轴自稳定方法研究[J].*舰船科学技术*, 2006, 28(6): 93-95.
- 7 Zou Dongming, Liu Qishan, Chen Changqing, *et al.*. Stabilization analysis of LOS for carrier-based electro-optical tracking equipment[J]. *Armament Automation*, 2003, 21(1): 15-19.
邹东明,刘栖山,陈长青,等.舰载光电跟踪设备视轴稳定分析[J].*兵工自动化*, 2003, 21(1): 15-19.
- 8 Farouki R T, Dospra P, Sakkalis T. Scalar-vector algorithm for the roots of quadratic quaternion polynomials, and the characterization of quintic rational rotation-minimizing frame curves[J]. *J Symbolic Computation*, 2013, 58: 1-17.
- 9 Iztok Fister, Xin-She Yang, Janez Brest, *et al.*. Modified firefly algorithm using quaternion representation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(18): 7220-7230.
- 10 Ding Guangtao. Quaternion method in polarization optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0726001.
丁光涛.偏振光学的四元数方法[J].*光学学报*, 2013, 33(7): 0726001.
- 11 Xu Qiaoyu, Yao Huai, Che Rensheng. Online calibration of stereo vision measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,29(6): 1546-1551.
徐巧玉,姚怀,车仁生.立体视觉测量系统现场校准技术[J].*光学学报*, 2009, 29(6): 1546-1551.