

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.019

## 基于最小二乘法标定寻北仪基座倾角测量系统的测量当量

仲启媛<sup>1</sup>, 谭立龙<sup>1</sup>, 黄先祥<sup>1</sup>, 王亮<sup>2</sup>, 王姣<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 西安 710025;

2. 第二炮兵工程大学研究生旅, 西安 710025)

**摘要:** 为得到准确的基座倾斜量, 提出一种基于最小二乘法标定寻北仪基座倾角测量系统的测量当量方法。阐述基于电解质型倾角传感器的寻北仪基座倾角测量系统的工作原理, 对基座倾斜的大小和方向进行准确测量, 利用基座倾斜与寻北精度影响量之间的数学模型, 进行误差补偿, 根据最小二乘法建立数据模型, 进行数据拟合, 当标定的当量与理论设计值相差较大时, 可调整电路放大倍数, 进行重新标定; 当测量当量调整到与设计值基本一致, 将最后测量当量标定值记录下来, 写入单片机相应 flash 单元即可。结果表明: 该测量方法可以快速简洁地确定测量当量, 保证寻北精度。

**关键词:** 寻北仪; 基座; 测量当量; 最小二乘法; 标定; 倾角传感器

**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

## Demarcating Measuring Unit of Pedestal Obliquity Measuring System of Gyroscope Based on Least Squares Method

Zhong Qiyuan<sup>1</sup>, Tan Lilong<sup>1</sup>, Huang Xianxiang<sup>1</sup>, Wang Liang<sup>2</sup>, Wang Jiao<sup>2</sup>

(1. National Key Discipline Lab of Armament Launch Theory &amp; Technology, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China; 2. Brigade of Postgraduate, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to obtain accurate pedestal oblique quantity, a method of demarcating measuring unit of the pedestal obliquity measuring system of gyroscope based on the least squares method was put forward. The essential principle of pedestal obliquity measuring system of gyroscope based on electrolyte obliquity sensor was introduced. The value and direction of the pedestal oblique were measured accurately. According to the data model between pedestal oblique and north-seeking precision effect, the north-seeking error was compensated. And the data were fitted according to the data model established by the least squares method. When the discrepancy between the measuring unit demarcated and theoretical design value was great, the unit could be demarcated again by adjusting the circuit magnification multiple. When the measuring unit demarcated was accord with the theoretical design value, the measuring unit demarcated was recorded and written into the flash unit of single-Chip microcomputer. Analysis result showed that measuring unit could be demarcated fast and easy by this measuring method, and the precision of north-seeking could be ensured.

**Key words:** gyroscope; pedestal; measuring unit; least squares method; demarcation; obliquity sensor

### 0 引言

磁悬浮陀螺寻北仪必须在静基座条件下工作, 基座必须精确调平, 否则会对寻北精度产生很大影响。已知当基座出现横倾角  $\gamma$  和纵倾角  $\theta$  时, 横倾角  $\gamma$  对寻北误差有影响, 纵倾角  $\theta$  对寻北精度几乎没有影响<sup>[1]</sup>。现有的调平方法是在基座外壳上安装长水准器, 架设时依据水准器的指示, 利用调平系统将水准器气泡调居中, 即认为寻北仪基座是水平的。这种调平方法简单, 容易实现, 但会受到长水准器的精度、安装误差、环境变化、温度变化以及操作人员熟练程度等因素的影响, 使陀螺寻北仪基座在工作时有时处于倾斜状态<sup>[2]</sup>。如果不能得到基座准确的倾斜量, 就不能修正基座倾斜对寻北仪精度的影响。为了得到基座准确的倾斜量, 必须要知

道测量当量, 即倾角每变化  $1''$  时, 输出电压的变化量。由于测量当量的实际值受传感器个性差异、电路参数、放大倍数的微小不同等因素的影响, 输出电压与倾角之间并不是严格的线性关系, 必须对当量进行重新标定。笔者根据最小二乘法建立数据模型, 进行数据拟合, 以精确地确定测量当量。

### 1 倾角测量系统工作原理

倾角测量系统采用的传感器为电解质型倾角传感器, 其工作原理如图 1 所示。在一个密封壳体内装有电解质导电液, 3 根电极浸入其中, 引出接成差动电桥的形式, 由交流电源  $U_c$  激励。当传感器处于水平位置时, 3 根电极浸入的深度相同, 电桥平衡, 输出为零; 当传感器倾斜某一角度  $\varepsilon$  时, 3 根电极浸入的深度发生改变, 电桥失去平衡, 输出大

收稿日期: 2012-07-11; 修回日期: 2012-08-13

基金项目: 第二炮兵工程大学 2011 年重点基金项目 (XY2011JJA06)

作者简介: 仲启媛(1973—), 女, 江苏人, 博士研究生, 副教授, 从事兵器发射理论与技术研究。

小正比于该倾角正切的信号。当  $\varepsilon$  角较小 ( $\varepsilon < 5^\circ$ ) 时, 输出电压与倾角成正比 ( $\tan \varepsilon \approx \varepsilon$ ), 信号的极性与倾斜方向有关<sup>[3-4]</sup>。

由于选用的是电解质型倾角传感器, 因此电桥驱动输入必须是一个交变信号, 否则传感器的电解液将会发生电解, 图 1 中 CON3 的 1、2 和 3 点接倾角传感器的 3 根电极, 电阻  $R_{03}$  和  $R_{04}$  与电极 1、2 之间电阻和电极 2、3 之间电阻构成测量电桥, 在 CON3 的 1、3 两点间加激励信号, 随着倾角大小和方向的不同, CON3.2 对地信号幅值及与初始激励信号的相位不同<sup>[5]</sup>。

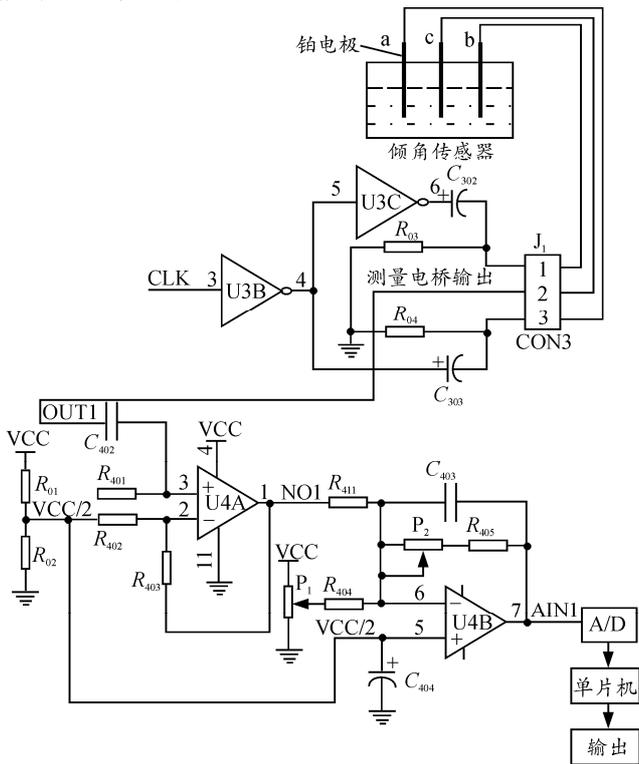


图 1 倾角测量系统工作原理

激励的原始输入来自 C8051F120 单片机的 PCA0(可编程逻辑阵列)产生的 1 kHz 方波信号, 经过 U3B 反相器隔离后, 分为 2 路驱动信号, 其中一路信号再经过 U3C 反相器, 从而产生极性相反、幅值相同的 2 路信号, 这 2 路信号通过  $C_{302}$ 、 $C_{303}$  电容滤去直流分量, 加载在电解质型倾角传感器 2 个电极上, 因为输入是同一方波源; 所以, 在传感器 2 个电极上就会出现 1 kHz 幅值相等、极性相反的方波交变信号作为驱动信号。加载传感器上的激励信号(图 1 中 CON3 接头 1、3 两点间信号)如图 2<sup>[6]</sup>。

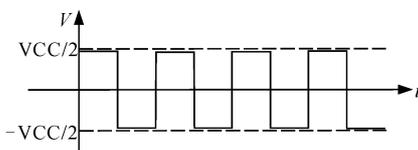


图 2 激励信号时序

当倾角的大小和方向不同时, 测量电桥输出信号幅值也不同, 且输出信号的相位与初始激励信号的相位也不同, 图 3 所示的是倾角方向和大小不同时传感器输出信号的幅值和相位的变化。

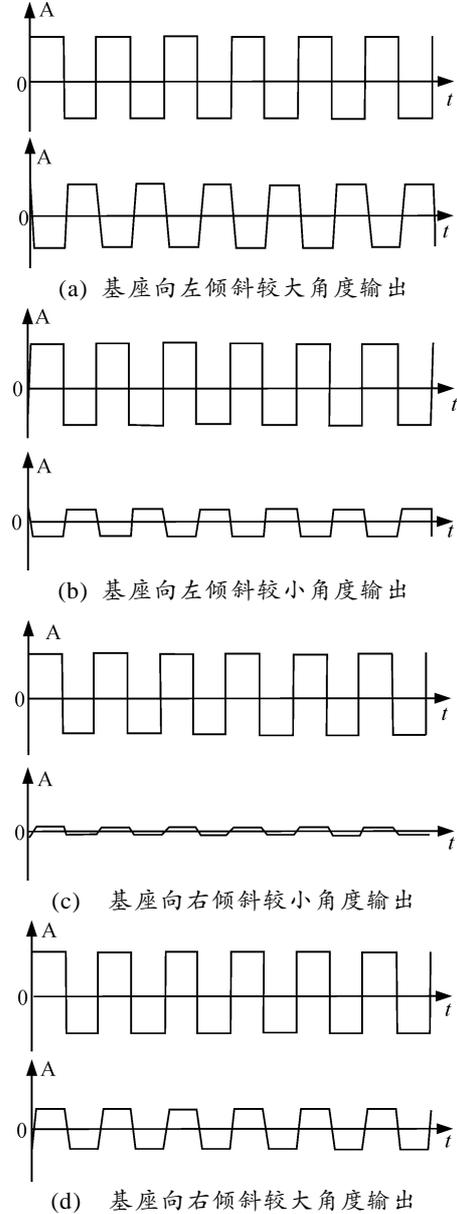


图 3 测量电桥输出信号波形随倾角大小和方向的变化

信号放大电路是一个同相交流放大器, 电桥输出的含有倾角大小和方向信息的方波信号经电容  $C_{402}$  隔直后, 加在放大器的同相输入端。由于传感器输出的信号是极性信号(即有正有负), 而系统又是单电源(+5 V)供电, 导致后续处理存在 2 个难点: 1) 负值模拟电压的采集及转换实现较为困难; 2) 在软件处理时需要将绝对值相同的信号同倾角一一对应起来。为解决此问题, 笔者在 VCC 和地之间经过精密电阻分压得到  $VCC/2$  参考电压, 同时加在 U4A 的同相输入端和反相输入端, 从而在输出端得

到一个  $VCC/2$  的直流偏移电压,如图 1 所示。当加入测量电桥输出的交流信号后,是在  $VCC/2$  的基础上变化而不是在地电位上下变化,相当于加入了  $VCC/2$  的直流分量,从而使放大器输出均为正值<sup>[7]</sup>。

信号放大电路的交流放大倍数为

$$\frac{u_{10}}{u_{i1}} = 1 + \frac{R_{402}}{R_{401}} \quad (1)$$

信号放大电路输出信号对地电位  $U_{10}$  为

$$U_{10} = \frac{VCC}{2} + u_{i1} \cdot \left(1 + \frac{R_{402}}{R_{401}}\right) \quad (2)$$

图 4 是不同倾角和方向下信号放大电路实际输出波形图。

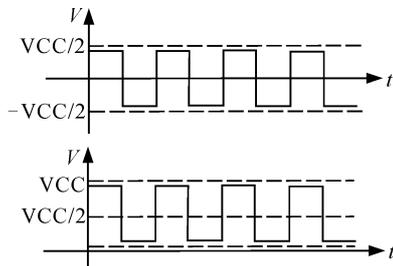


图 4 不同倾角和方向下放大电路输出变波形

为了控制倾角测量范围,采用轨至轨运算放大器 U4B,可调电位器  $P_1$ 、 $P_2$ ,外围电阻  $R_{404}$ 、 $R_{405}$ 、 $R_{411}$  和电容  $C_{403}$  等组成的低通滤波放大电路。运算放大器 U4B 的同相输入端接电阻  $R_{01}$  和  $R_{02}$  对电源  $VCC$  分压得到的参考电压  $VCC/2$ ,如图 1,电位器  $P_1$  的中间抽头通过电阻  $R_{404}$  接入运算放大器 U4B 的反相输入端,调节  $P_1$  抽头的位置,可调节偏置。电容  $C_{403}$  和  $R_{404}$ 、 $R_{405}$ 、 $R_{411}$  组成低通网络 RC,接入运算放大器反馈回路,构成有源低通滤波器,其截止频率  $f$ <sup>[5]</sup>为

$$f = \frac{1}{2\pi R_{411} C_{403}} \quad (3)$$

通过选择合适的电路参数,可将截止频率控制在 500 Hz,从而使电路滤去绝大部分干扰。

调节  $P_2$  抽头的位置,可调节信号放大倍数。设电位器  $P_1$  中心抽头的偏置电压为  $U_{offset}$ ,上级整流电路输出(本级输入)电压为  $U_{in}$ ,则运放最终输出电压  $U_{out}$  表达式为

$$U_{out} = \frac{VCC}{2} + \frac{R_{405} + P_2}{R_{404}} \left(\frac{VCC}{2} - U_{offset}\right) + \frac{R_{405} + P_2}{R_{411}} \left(\frac{VCC}{2} - U_{in}\right) \quad (4)$$

## 2 测量当量标定与调整

为了计算并显示寻北仪基座倾角的偏差值,只知道零位电压是不够的,还必须知道测量当量。所

谓测量当量是指倾角每变化  $1^\circ$  时,输出电压的变化量,或者说电压每变化  $5/2^{12}$  V(即 1.22 mV)时,倾角变化量(采样幅度最大为 5 V,ADC 采样位数为 12 位),然后通过所建立的数学模型,才能换算出倾角的大小及方向。

在系统设计过程中,把量程定在传感器的线性输出范围  $\pm 0.5^\circ$ ,即当系统输出电压分别为 0 V 和 5 V 时,输出倾角应对应  $-0.5^\circ$  和  $+0.5^\circ$ ,因此系统的设计当量理论值应为 0.72 mV/s,受到 AD 采样位数的限制,系统分辨率为  $0.88''$ ,与所选传感器分辨率  $0.5''$  相当。实际上在系统装配集成后,测量当量的实际值受传感器个性差异、电路参数和放大倍数的微小不同等影响,输出电压与倾角之间并不是严格的线性关系,因此必须对当量进行重新标定。

### 2.1 标定方法

测量当量标定试验系统如图 5 所示,在可调平基座上固定一个平面镜装置,沿平面镜法线方向用硅胶粘接需要标定的传感器,将传感器与其配套的处理电路一一对应,选用测量精度高的  $0.5''$  级 T3A 自准直经纬仪(也可以用 T2002 电子经纬仪代替)与平面镜装置准直,微调可调平基座,读取 T3A 自准直经纬仪垂直角示值  $x_i$ ,测量出基座相对倾角,倾角测量系统测出基座倾角所代表的电压  $y_i$ ,重复  $m$  次,读出一组数据,然后经过最小二乘法数据拟合完成标定。



图 5 倾角测量当量标定方法

### 2.2 最小二乘法数据拟合

设  $(x_i, y_i) i = 1, 2, \dots, m$  为一组测量数据,  $y_i$  为当前倾角所代表的测量电压,  $x_i$  为对应的倾角值,他们近似地满足函数<sup>[8]</sup>

$$y = ax + b \quad (5)$$

其中常数  $a$  就是要标定的测量当量。

根据最小二乘法原理, 常数  $a, b$  的选择是根据偏差的平方和最小来选择的, 偏差的平方和为

$$M = \sum_{i=1}^m [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (6)$$

式 (6) 的值最小时, 应满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^m [y_i - (ax_i + b)]x_i = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^m [y_i - (ax_i + b)] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

经过整理可得:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^m x_i^2 + b \sum_{i=1}^m x_i = \sum_{i=1}^m y_i x_i \\ a \sum_{i=1}^m x_i + mb = \sum_{i=1}^m y_i \end{cases} \quad (8)$$

求出式 (8) 的解  $a, b$ , 就得到了测量当量。

以上只考虑了线性拟合, 如果考虑多项式拟合, 则变量  $x, y$  之间的数学模型为

$$y = \sum_{j=0}^n a_j x^j = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n \quad (n < m) \quad (9)$$

用最小二乘法确定方程系数  $a_0, a_1, \dots, a_n$  即完成了数据处理, 建立起数学模型。在用计算机进行运算时, 只需直接调用最小二乘法运算函数即可。

表 1 为其中一个倾角通道标定完成之后的测试数据, 原始数据图形如图 6(a), 根据这一组数据, 分别用线性拟合 ( $n=1$ ) 和二次多项式拟合 ( $n=2$ ), 得到图 6(b) 和图 6(c), 其中线性拟合时,  $a_1$  值为 0.875 6, 用二次多项式拟合时,  $a_1$  为 0.884, 与线性拟合值基本一致, 而  $a_2$  为  $1.93 \times 10^{-6}$ , 非常小, 同时, 2 种拟合残余误差水平分别为 67.38 和 66.99 (如图 6(d) 所示), 基本一致, 这就说明在其它外界因素不变的情况下, 倾角与所测量电压呈线性关系。拟合多项式中的  $a_1$  就是所谓的“测量当量”。

表 1 测量当量标定测试记录

序号	T3A 示值	ADC0 采样值		倾角变化/(")	备注
		16 进制表示	10 进制表示		
0	89°31'06"	0x010	16	0	开始状态
1	89°36'21"	0x17a	378	315	
2	89°42'12"	0x2e3	739	666	
3	89°48'01"	0x46a	1 131	1 015	
4	89°53'31"	0x5f3	1 518	1 345	
5	89°59'27"	0x7a9	1 961	1 701	
6	90°03'51"	0x8c4	2 244	1 965	
7	90°09'54"	0xa2c	2 604	2 328	
8	90°14'41"	0xbbc	3 004	2 615	
9	90°19'17"	0xccd	3 277	2 871	
10	90°24'36"	0xe60	3 680	3 210	
11	90°28'47"	0xf54	3 924	3 461	

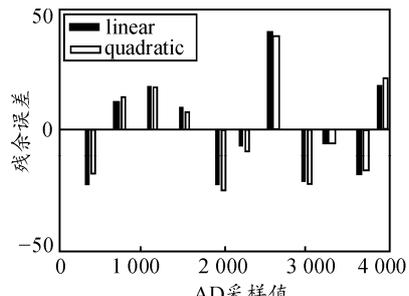
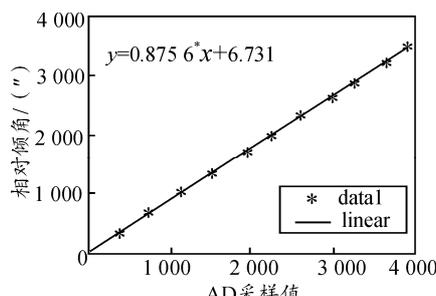
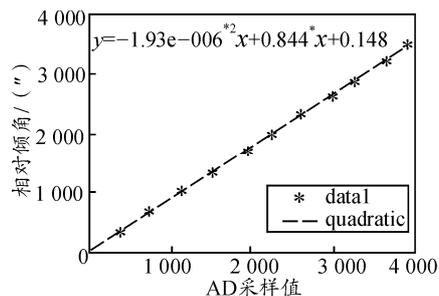
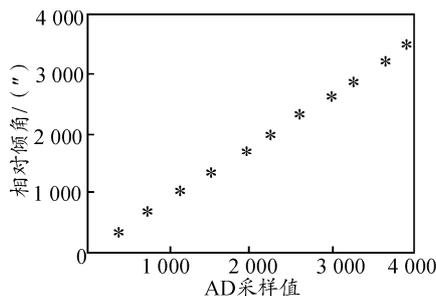


图 6 测量当量标定数据

### 3 结论

采用基于最小二乘法来进行当量标定时, 如果标定的结果与理论设计结果相差较大时, 可通过调整图 1 中的电位器  $P_2$ , 改变电路放大倍数来调整当量, 然后利用前述方法重新标定, 并将最后测量当量写入数据 flash 单元记录下来。

本研究方法在测量温度基本不变的环境下对测量当量标定非常准确, 室温下长期多次标定, 结果一致性很好。由于电解质型倾角传感器性能受环境温度影响比较大, 不同的测量温度下, 测量当量会有较大变化, 对于高精度倾角测量系统不可容忍; 所以带温度补偿或校正的非线性当量标定方法与系统是今后研究的方向。

\*\*\*\*\*

(上接第 75 页)

- [8] 刘颖, 郝安民, 唐岚, 等. 摄像头安装角度对机器人作业的影响分析[J]. 机电产品开发与创新, 2005, 18(2): 54-55.
- [9] 陈利红, 毛剑飞, 诸静. CCD 摄像机标定与修正的简便方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 37(4).
- [10] TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986: 364-374.
- [11] WONG W. Mathematical formulation and digital analysis in close range photogrammetry[J]. Photogrammetric Eng Remote Sensing, 1975, 41(11): 1355-1373.
- [12] WENG Y, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [13] 郑志刚. 高精度摄像机标定和鲁棒立体匹配[D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2008, 05.
- [14] Tsai R Y. A versatile calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses: Radiometry[M]. Jones and Bartlett publishers, Inc., 1992: 221-244.
- [15] Janne H, Olli S. A Four-Step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction[M]. 1997.
- [16] Mc P F, Murray D W. Active Calibration for a Head-Eye Platform using the Variable State-Dimension Filter[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(1): 15-22.
- [17] Bouguet J. Camera Calibration toolbox for matlab: <http://www.vision.caltech.edu/Bougueti/calib.doc>. 2003.
- [18] 韩啸. 基于遗传算法的摄像机内参数标定研究[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2008, 04.
- [19] 吴文琪, 孙增圻. 机器视觉中的摄像机标定方法综述[J]. 计算机应用研究, 2004(2): 4-6.
- 参考文献:
- [1] 卜继军, 魏桂玲, 吕志清. 二位置陀螺寻北仪静态误差分析[J]. 压电与声光, 2000, 22(5): 309-312.
- [2] 王立东, 王夏宵, 张春熹. 光纤陀螺寻北仪多位置寻北误差分析[J]. 压电与声光, 2007, 29(1): 42-44.
- [3] 电解质型倾角传感器设计 [OL]. <http://www.Vigortech.com>.
- [4] SX-003D-NULU ULTRA HIGH RESOLUTION NULLING SENSOR DATASHEET[S]. 上海: Shanghai Vigor Technology Development Co. Ltd., 2003.
- [5] 张陪仁, 孙力. 基于 C8051F 系列微控制器原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 63-81.
- [6] 邱仁峰, 胡晓东. 一种高精度数字倾角测量系统的设计[J]. 电子技术应用, 2005(6): 18-22.
- [7] 梁胜. 基于微处理器的磁敏角位移传感器温度补偿系统的设计研究[D]. 武汉: 华南师范大学, 2007: 68-75.
- [8] 孔祥莹, 殷玉枫, 袁文旭. 最小二乘法在滑动轴承实验研究中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2004(5): 37-38.
- [20] 陈泽志, 吴成珂. 计算机视觉测量系统的误差模型分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(5): 389-394.
- [21] 赵艳华. 摄像机标定及同心拼图技术研究[D]. 南京理工大学, 2004, 02.
- [22] Abdel-Aziz Y I, Karara H M. Direct linear transformation into Object space coordinates in close-range photogrammetry[M]. Pro.Symy.Close-Range Photogrammetry. 1971: 1-18.
- [23] Marguaardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. SLAM Journal on Applied Mathematics, 1963, 11: 431-441.
- [24] Albert Einstein. Feature-Level Fusion of Laser Scanner and Video Data for Advanced Driver Assistance Systems[D]. Ulm university universit ä t DISSERTATION (DR-ING) 29.juni 20070.
- [25] Zhang Q, Pless R. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder[C]. in Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2004.
- [26] Dupont R, Keriven R, Fuchs P. An improved calibration technique for coupled single-row telemeter and CCD[M]. 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM); 2005
- [27] Sergio A, Rodriguez F. Vincent Fr émont and Philippe Bonifait. Extrinsic Calibration between a Multi-Layer Lidar and a Camera[C]. published in "IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, MFI 2008, Korea, Republic of (2008)" DOI: 10.1109/MFI.2008.4648067
- [28] Chatterjee C, Roychowdhury V P. Algorithms for Coplanar Camera Calibration[J]. Machine Vision and Applications, 2000(12): 84-97.
- [29] 胡国元, 何平安, 等. 视觉测量中的相机标定问题[J]. 光学与光电技术, 2004(3): 9-12.
- [30] 曾建兰, 黄昶. 摄像机标定精度的比较研究[J]. 中国科技信息, 2007(22): 56-59.