

# 基于转台的线阵激光雷达地面检校方法研究

李小朋<sup>①·②</sup>, 唐伶俐<sup>①</sup>, 周梅<sup>①</sup>, 黎荆梅<sup>①</sup>

(<sup>①</sup> 中国科学院光电研究院, 北京 100190; <sup>②</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**介绍了一种基于转台的线阵激光雷达地面检校方法,该方法通过布设物方检校控制场,使用指示激光器建立激光测距值与物方控制点之间的对应关系并引入激光测距的加/乘常数与外方位元素一并作为检校参数,通过坐标转换列出误差方程式;最后使用最小二乘平差解算所有的检校参数。文中给出了实测数据的实验结果分析及精度评定,验证了本文方法的可行性。

**关键词:**检校;线阵;激光雷达;加/乘常数

doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2011.06.018

中图分类号:TP751 文献标识码:A 文章编号:1000-3177(2011)118-0087-05

## Research on Linear Array LiDAR Calibration Based on Rotating Platform

LI Xiao-peng<sup>①·②</sup>, TANG Ling-li<sup>①</sup>, ZHOU Mei<sup>①</sup>, LI Jing-mei<sup>①</sup>

(<sup>①</sup> The Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

<sup>②</sup> Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** A method of linear array LiDAR calibration based on rotating platform is proposed in this paper. After layout of object control field, two indicative laser sensors are used to find corresponding relationship between the laser ranging and object control points. Error equations are established via coordinate transformation, the addition constant and multiplication constant of LiDAR as well as the exterior orientation parameters are considered. Least squares adjustment is used to solve all the parameters. At last, the experiments and accuracy assessment are presented in this paper, which verified feasibility of the method.

**Key words:** calibration; linear array; LiDAR; addition/multiplication constant

### 1 引言

随着地球空间信息科学和地球空间信息产业的蓬勃发展,三维空间信息的快速获取与自动处理技术是地球空间信息获取技术的核心与发展前沿。特别是随着“数字城市”的提出,人们越来越不满足于二维城市信息的获取,而是希望能够直接得到三维城市信息,而激光雷达的出现恰好简化了三维信息的获取,因此得到了广泛的应用。

目前的激光雷达系统,无论是车载还是机载,多数都是单脉冲测量目标表面上一个点的坐标,通过

棱镜旋转控制激光光束偏转来实现对一定视场的扫描。在要求扫描大视场并且获取高密度点云的情况下,诸如此类的激光雷达系统耗费的扫描时间通常令人难以接受;另一方面,当激光器在震动的环境中,例如正在作业的工地或者厂矿,激光雷达获取的数据质量受到震动的影响也与扫描时间密切相关<sup>[1]</sup>。而线阵扫描型激光雷达的出现很好地解决了扫描效率的问题,其最大特点是每次激光脉冲获取目标上多个点的三维坐标,极大地提高了数据获取的效率。

线阵激光雷达搭载在转台上,通过旋转实现其

收稿日期:2010-10-12 修订日期:2011-03-12

基金项目:科技部国际科技合作项目(2010DFA72290);中科院对外合作重点项目(GJHZ200805)。

作者简介:李小朋,男,中国科学院研究生院硕士研究生,主要研究方向是 CCD 和激光雷达检校技术。

E-mail: xpli@aoe.ac.cn

对物方目标的扫描,转台则实时输出各行扫描点所对应的姿态信息。由于激光雷达中心与转台中心不重合,且二者的坐标轴也不平行,激光雷达与转台之间存在着3个平移参数和3个旋转参数,即激光雷达的外参数。若要从激光测距数据解算出物方真实的三维激光点云,则必须检校出这些外参数。目前对检校线阵激光雷达外参数的研究并不多,方法也都不成熟,主要是因为激光雷达中心和扫描光束都是不可见的,这样很难确定一条扫描线是否扫描到了用来联合解算的物方控制点上<sup>[2]</sup>。本文使用指示激光建立起激光测距数据与物方控制点之间的联系,提出一种可行的检校方法。同时本文还将影响激光测距的加常数和乘常数等参数也考虑在内,同外参数一起整体平差求解。

## 2 地面检校系统

### 2.1 线阵激光雷达

本文实验中使用的是中国科学院上海技术物理研究所研制的线阵激光雷达,该仪器主要包括发射端和接收端两个部分。发射端由一个激光器发射脉冲,经过多元分束处理形成一排均匀排列的激光束。经过实验室光学标校,各激光束在同一平面内,且激光束之间的分束角固定;接收端则是由多元雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)阵组成,分别接收对应的发射端激光束。此外,在发射端中的两束激光上分别附加了指示激光器,同样经过实验室光学标校,指示激光束与其对应的测距激光束中心严格对准。当测距激光对物方控制场某点测距后,可在相应指示激光光斑处布设控制点,由此建立起激光测距与物方控制点之间的联系。

### 2.2 转台系统

转台型号为昆机 FK15110T,可上下及左右方向作二维转动。实验时将线阵激光雷达放置在转台上,通过转台上下转动实现对物方一个条带的扫描,然后通过左右转动来扫描不同的条带。在此过程中,转台可输出转动的姿态信息。

### 2.3 检校控制场

为了确定线阵激光雷达的外参数,本文实验中设计了一个地面检校控制场。在距搭载线阵激光雷达的旋转平台约200m处布设如图(1)所示的控制场,整个检校场宽约4.5m,高1.5m。以一块控制板为中心,在其后方左右两旁分别是另一块控制板和一面墙,与中心控制板有3m~4m的纵深,整个控制场形成品字形。其中,控制板表面材料选用实木

板,控制板背面用不易变形龙骨加以固定,尺寸为1.5m×1.5m。

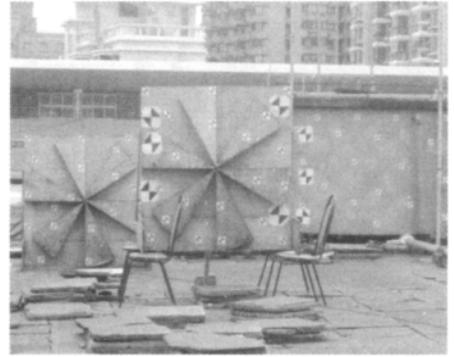


图1 控制场布设全景图

指示激光光斑在200m处大小尺寸约为20cm,故激光控制点靶标设计成图2所示规格。为了使用全站仪测得控制点的三维坐标,控制点中心贴有2cm×2cm规格的全站仪激光反射标。

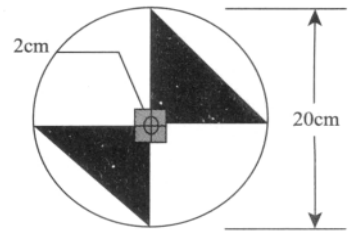


图2 激光控制点靶标

### 2.4 坐标系统定义

线阵激光雷达地面检校涉及包括控制场全局坐标系 G-XYZ、转台坐标系 S-XYZ 和激光空间坐标系 L-XYZ 在内的3个坐标系统,分别定义如下。

#### (1) 控制场全局坐标系

以在旋转平台附近架设的全站仪为坐标原点 G,对中调平后竖直向上为 Z 轴,选定某个水平起始方向作为 X 轴,根据右手系规则 Y 轴垂直于 XGZ 平面。

#### (2) 转台坐标系

转台坐标系原点 S 位于转台中心, X 轴垂直于转台平面竖直向上, Z 轴在转台平面内指向控制场方向, Y 轴方向符合右手坐标系。转台坐标系统的状态分为初始静止时刻和任意时间 t 时刻,二者之间的姿态转换信息由转台实时输出。

#### (3) 激光空间坐标系

以发射端激光器中心为原点 L,以激光束阵列中间光束的反向为 Z 轴, X 轴垂直于激光束阵列所在的平面竖直向上,以右手定则来确定 Y 轴方向。

### 3 检校模型

#### 3.1 基本原理

解算线阵激光雷达的外参数,关键是要从空间数学几何模型的角度分析激光测距值与物方控制点之间的转换关系。主要分为以下几个步骤:

(1)将激光测距值由极坐标系分解到激光空间坐标系,得到三维坐标矢量;

(2)经过激光空间坐标系与转台坐标系之间的角度旋转和坐标平移,转换至转台  $t$  时刻所在的坐标系;

(3)根据转台的姿态信息,转换至转台初始时刻所在的坐标系;

(4)经过转台初始坐标系与全局坐标系之间的角元素和线元素的转化,最终归算到控制场全局坐标系。

结合激光测距点对应的物方控制点三维坐标建立误差方程,根据最小二乘间接平差原理迭代求解未知参数。从上述转换关系可以看出,模型中不仅引入了激光空间坐标系与转台坐标系之间的外参数,还引入了转台坐标系与全局坐标系之间的外参数,同时本文还将影响激光测距的加常数和乘常数考虑在内一并平差解算。

#### 3.2 检校模型

如图 3 所示,设激光雷达测得的 P 点的极坐标真值为  $(D', \theta)$ , 将其在激光空间坐标系中分解有:  $(0, D' \sin\theta, -D' \cos\theta)$ 。

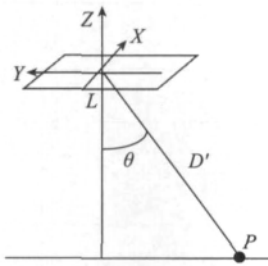


图 3 激光空间坐标系

由 3.1 节所述可得线阵激光雷达检校模型:

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = R_S^G R_{S_t}^S R_{L_t}^{S_t} \begin{bmatrix} 0 \\ D' \sin\theta \\ -D' \cos\theta \end{bmatrix} + R_Z^G R_{Z_t}^Z \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} \quad (1)$$

引入激光测距的加/乘常数模型:

$$D' = d_i + k_i D \quad (2)$$

其中:  $[X_G \ Y_G \ Z_G]^T$  是控制点物方三维坐标,  $[X_S \ Y_S \ Z_S]^T$  是转台坐标系初始时刻相对于全局坐标系的平移量,  $[X_L \ Y_L \ Z_L]^T$  是激光空间坐标系相对于转台坐标系的平移量,  $R_S^G(\omega_S^G, \varphi_S^G, \kappa_S^G)$  是转台坐标系初始时刻到全局坐标系的旋转矩阵,  $R_{L_t}^{S_t}(\omega_{L_t}^S, \varphi_{L_t}^S, \kappa_{L_t}^S)$  是激光空间坐标系到转台坐标系的旋转矩阵,  $R_{S_t}^S(\omega_{S_t}^S, \varphi_{S_t}^S, \kappa_{S_t}^S)$  是转台坐标系  $t$  时刻到转台坐标系初始时刻的旋转矩阵,  $(D, \theta)$  是控制点的激光量测值与分束角,  $(d_i, k_i, i=1, 2)$  分别是两束指示激光对应测距激光的加常数和乘常数。

将距离  $D$  视作观测值得:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \bar{X} = F_X \\ D &= -\frac{d_i}{k_i} + \frac{\bar{Y}}{k_i \sin\theta} = F_Y \\ D &= -\frac{d_i}{k_i} - \frac{\bar{Z}}{k_i \cos\theta} = F_Z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = (R_{L_t}^{S_t})^{-1} \left[ (R_{S_t}^S)^{-1} (R_S^G)^{-1} \begin{bmatrix} X_G - X_S \\ Y_G - Y_S \\ Z_G - Z_S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} \right] \quad (4)$$

共引入 16 个未知数:

$X_S, Y_S, Z_S, \omega_S^G, \varphi_S^G, \kappa_S^G, X_L, Y_L, Z_L, \omega_{L_t}^S, \varphi_{L_t}^S, \kappa_{L_t}^S, d_i, k_i (i=1, 2)$

将(4)式线性化成间接平差误差方程<sup>[4]</sup>即可求解上述未知数。

### 4 实验及结果分析

#### 4.1 实验方法

将线阵激光雷达安置于转台上并布设物方检校控制场。架设全站仪作为控制场全局坐标系,全站仪位置的选取以能很好地通视转台系统和检校控制场为宜。整个实验的过程可分为以下两个部分:

##### (1)初值预估

使用最小二乘迭代求解未知数时,好的初值是非常必要的。对于坐标系之间的平移参数,可以由皮尺或全站仪直接量测其初值;对于坐标轴间的夹角,可在各坐标系的轴向上布设若干控制点,再用全站仪测其三维坐标,从而大致确定其坐标系并估算出坐标轴间的夹角初值。

##### (2)数据获取

将转台状态置零,上下转动转台至一定角度,使线阵激光雷达能同时扫描控制场内的两块控制板,并让两个指示激光控制点分别落在具有一定纵深的

两块板子上,因为对于同一线阵上的控制点,必须具有一定的纵深才能使检校模型准确收敛<sup>[3]</sup>,同时记录转台的姿态信息,并在物方指示激光光斑处布设

激光控制点靶标,使用全站仪测其三维坐标(如图4(a));然后左右转动转台,重复上述操作可得到另一个竖直条带的激光点(如图4(b))。

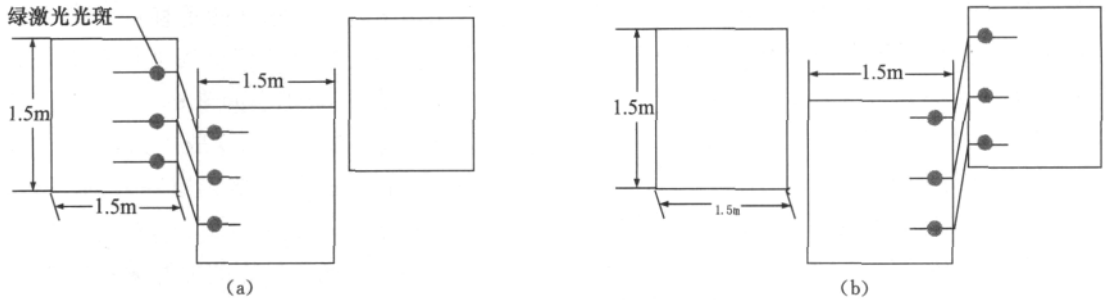


图4 线阵激光雷达扫描方式示意图

最后得到激光测距数据,转台姿态数据以及物方控制点数据,如表1所示。表中距离单位为m,角

度单位为°,下同。

表1 实验获取的原始数据

NO.	Dis	$\omega_t$	$\varphi_t$	$\kappa_t$	X	Y	Z
1	201.7562	3.5000	-5.6737	0	2.6594	14.5453	-14.8133
2	206.8169	3.5000	-5.6737	0	2.1552	16.7388	-20.1131
3	201.1300	3.5000	-5.7445	0	2.4821	14.3287	-14.2234
4	208.4567	3.5000	-5.7445	0	1.7291	17.3409	-21.5736
5	200.2836	3.5000	-5.8793	0	2.1167	13.9683	-13.3951
6	207.6456	3.5000	-5.8793	0	1.3419	17.0117	-20.7834
7	205.0780	2.9960	-5.5487	0	2.8333	14.1746	-18.5225
...	...	...	...	...	...	...	...

表2 线阵激光雷达地面检校解算结果

$X_s$	$Y_s$	$Z_s$	$\omega_s^G$	$\varphi_s^G$	$\kappa_s^G$
20.6588	-60.7105	169.2732	-160.2694	1.1344	-0.8713
$X_L$	$Y_L$	$Z_L$	$\omega_L^S$	$\varphi_L^S$	$\kappa_L^S$
0.5763	0.1994	-0.1131	179.1736	0.7521	-0.9335
$d_1$	$d_2$	$k_1$	$k_2$		
0.1245895	0.149832	0.989693	0.9931522		

4.2 参数求解

将实验获取的数据以及对未知参数的估值带入检校模型中,即可解算出所有线阵激光雷达外参数,如表2所示。

4.3 精度分析

实验中除了测得控制点的三维坐标值来解算未知参数,还在控制场的四角布设了4个点作为检查点来评定检校的精度。用解算出来的外参数结合检

查点的激光测距值可以计算得到检查点物方三维坐标的修正值。理论上修正值应该与全站仪测得的真值相等,但由于测量过程中受到各种随机误差因素影响或者人为因素影响,会使得修正值与真实值之间存在一定的残差。表3给出了检查点的修正值和真实值之间的残差,经过检校参数修正后的点位精度在厘米量级。

表3 检查点残差

真实值			修正值			残差		
X	Y	Z	X'	Y'	Z'	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
2.6954	15.2282	-13.6934	2.7735	15.2724	-13.6402	0.0781	0.0443	0.0532
1.8654	15.5322	-14.4588	1.7728	15.4643	-14.4844	-0.0926	-0.0678	-0.0256
3.3565	11.1881	-14.7292	3.4006	11.2776	-14.6930	0.0441	0.0895	0.0362
2.6439	11.4540	-15.4384	2.7201	11.3687	-15.3949	0.0762	-0.0853	0.0435

## 5 结束语

本文提出了一种基于转台的线阵激光雷达外参数检校方法,在难于找到激光雷达像方坐标和控制点物方坐标对应关系的情况下,本文使用指示激光建立二者之间的联系,将影响激光测距的加常数和乘常数考虑在内,一并求解。实验验证了本文方法的可行性,但对于结果的精度还可以进一步提高,比

如考虑未知参数之间的相关性,将它们分组来迭代求解,或直接通过物理量测方法直接测得外参数中的线元素等;测距激光与指示激光标校配准的精度、指示激光器的个数以及旋转平台测姿精度也会影响最终结果。提高检校精度将是以后研究工作的重点。

致谢:感谢苏国中老师、李国元师兄的指导和中国科学院上海技术物理研究所的硬件支持。

## 参考文献

- [1] 蔡银桥,舒嵘,董小华.线阵扫描性地面激光雷达成像特性研究[C]//第一届全国激光雷达对地观测高级学术研讨会论文集.2010:10-14.
- [2] 康永伟,钟若飞,吴侯.车载激光扫描仪外参数标定方法研究[J].红与激光工程,2008(37):249-253.
- [3] 王之卓.摄影测量原理[M].武汉:武汉大学出版社,2007.
- [4] 武汉大学测绘学院测量平差组.误差理论与测量平差基础[M].武汉:武汉大学出版社,2004.

## 天宝公司(Trimble)宣布中国研发中心正式开业

### 天宝公司将致力于为中国和亚太地区推出本地化的商用定位解决方案及服务组合

2011年11月8日——天宝公司(Trimble)日前宣布其位于西安的中国研发中心正式开业。新成立的研发中心将致力于把天宝现有的商用产品和技术进行本地化,同时还负责开发创新的解决方案,以满足中国本地客户和亚太地区新兴市场的需求。

目前,该研发中心计划开展一系列项目,致力于开发本地化的测绘与建筑工程机械控制解决方案。今后,该中心计划进一步扩展其核心业务,将涵盖地理信息系统(GIS)、建筑施工以及农业相关的应用领域。研发中心还将致力于开发与中国和亚太地区经济发展及基础设施现代化建设密切相关的商用解决方案,尤其是交通、电信、水利资源保护以及能源开发与环境保护等领域。

天宝公司副总裁方博岩先生表示:“西安研发中心的正式开业是天宝公司在中国和亚太地区进行业务拓展的一个重要举措。我们充分认识到,开发本地化的商用解决方案的重要性。我们希望借助这一平台,为客户提供更优质的服务,同时协助推动亚太地区的现代化进程。在研发中心正式启动后,我们将进一步扩大我们的业务,提高我们的品牌形象,并与伙伴和客户开展更紧密的合作,以满足该地区的未来发展需求。”

天宝公司的定位解决方案在中国市场中广泛应用于测绘、无线通讯基础设施、公路、铁路、水利资源保护、公用事业、水运、采矿、农业、石油、工程建设以及移动资产管理等领域。为了支持中国地区的业务发展,天宝公司于2005年在上海设立了亚太区培训、支持与服务中心,并于2007年在中国创办了首座制造工厂。此次中国研发中心在西安的正式开业,彰显了天宝公司致力于长期服务中国市场、合作伙伴、经销商以及客户的决心与承诺。

### 关于天宝公司(Trimble)

天宝公司致力于应用先进技术,提升企业与政府部门的外业和移动工作人员的工作效率。所开发的解决方案,主要集中在满足定位或位置的各种应用需求,其中包括测绘、施工、农业、车辆调度及资产管理、公共安全和制图。除了充分利用诸如GPS、激光和光学等定位技术之外,天宝解决方案还可以融合用户特殊的软件需求。同时广泛采用各种无线技术,将解决方案提交给客户,确保外业和内业操作的紧密结合。天宝公司创立于1978年,总部位于加利福尼亚州的桑尼维尔市。

欲了解更多的信息,请访问:[www.trimble.com](http://www.trimble.com)