

# 基于单点激光的三维扫描坝体监测系统开发

胡少兴<sup>1</sup> 夏俞扬<sup>1</sup> 张爱武<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191  
<sup>2</sup>首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100037)

**摘要** 基于单点激光的三维扫描坝体监测系统可直接获取空间三维信息,对坝体平移、裂缝、溃坝和塌方等灾害进行实时高效监测,自动化程度高,操作简便,可长期野外作业,具有广阔的应用前景。进行了基于单点激光的三维扫描系统开发研究,设计了系统集成方案,进行了核心传感器的选型及控制系统的开发,搭建实验样机;对系统输出参数可能值进行统计分析,分别建立数据球和长方体边界模型来探讨系统集成机理;针对因传感器原点不一致造成的数据失真问题,提出了坐标归一算法完成系统标定;通过实验验证了系统标定算法的正确性与必要性。

**关键词** 成像系统;主动视觉;三维扫描系统;单点激光;系统标定;边界模型

中图分类号 TP274.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.s100312

## Research and Development of 3D Scanning System for Dam Monitoring Based on Single-Point Laser Sensor

Hu Shaoxing<sup>1</sup> Xia Yuyang<sup>1</sup> Zhang Aiwu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Capital Normal University, Beijing 100037, China

**Abstract** 3D scanning system for dam monitoring based on single-point laser sensor can obtain the spatial 3D information directly, which can realize real-time and efficient monitoring of disasters, such as translation of the dam, crack, break, landslides, etc. So it has a broad application prospect because of high degree of automation, simple operation and field scanning without stop. Research has been focused on the development of 3D laser scanning system based on single-point laser sensor, and the approach of system integration is established. The selection of the core single-point sensor is finished and control system is developed to build the prototype. Based on the statistical analysis of possible values of output parameter, the data ball model and rectangular boundary model are established to investigate the mechanism of system integration. For data distortion resulted from the inconsistency of original points of all sensors, coordinate normalization algorithm is proposed to complete the system calibration. Besides, the correctness and necessity of the system calibration work is verified through real experiment.

**Key words** imaging systems; active vision; 3D scanning system; single-point laser; system calibration; boundary model

**OCIS codes** 100.6890; 110.3010; 280.3420; 150.6910

## 1 引言

坝体监测在防灾减灾、保护国家和人民生命财产安全方面具有重要的意义。传统的坝体监测有人

工测量、光纤监测及全站仪监测等方法。人工测量获取地形数据工作耗时、费力,且在高陡地段难以获取高精度的数据,同时还存在测量人员的人身安全

收稿日期: 2011-03-22; 收到修改稿日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(41071255, 40601081)、高等学校博士点新教师基金(20070006031)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET20820150)和国防基础预研项目(B1420080209-08)资助课题。

作者简介: 胡少兴(1972—),男,副教授,主要从事三维激光扫描和计算机视觉等方面的研究。

E-mail: husx@buaa.edu.cn

问题;运用光纤监测安装复杂,干扰施工,成本较高,不适于远距离测量,且误差较大;运用全站仪需要在多个位置进行测量,采样点稀疏且费时。随着科学技术的发展,大坝监测开始从人工巡查和仪器观测转向以自动化、网络化和信息管理智能化为手段的数字监控<sup>[1]</sup>,高精度、低成本和高效率的三维激光扫描方式应运而生。大坝平移、裂缝、溃坝和塌方等并不是突然发生的,都会有一个量变到质变的过程,通过对三维激光扫描数据的实时处理与分析,及时了解并获得大坝的结构特性,发现异常状况,立即启动相应应急预案<sup>[2]</sup>。

本文基于单点激光的三维扫描坝体监测系统,拟将机、光、电技术结合为一体,作用于远距离、大场景的坝体扫描,利用单点激光测距仪快速准确获得被测对象的空间极半径值,在角度传感器的基础上解算三维坐标,致力于探究坝体溃坝、塌方、倾倒和渗漏等各种突发灾害的监测机理,实现实时、快速和精确的突发状况报警功能,避免灾害的进一步扩大。

## 2 系统集成

### 2.1 集成方式选择

常见的三维激光集成方式有基于二维激光和基于单点激光的两种集成方式。

基于二维激光的集成方式是利用电机带动二维激光扫描仪旋转,实现第三维的扫描<sup>[3]</sup>。例如:基于德国 SICK L290/291 的集成,适用于 80 m 范围的场景。该种集成方式具有扫描精度较高、系统集成方便的特点。但是,由于二维激光扫描仪的限制,集成后系统的整体采集频率、采样步长及角度量程都受到约束,不适于对小范围特定区域的快速精准扫描,故不予采用。

基于单点激光的集成方式可通过光学器件或纯机械旋转实现。使用光学器件的扫描方式,对光路设计的要求较高,且反射光束的位置一般是不等间距的,使得场景扫描点分布不均匀,故也不予选用<sup>[4]</sup>。

考虑到纯机械旋转扫描具备较高的可靠性,控制方便,便于设定特定的扫描区域和扫描步长等参数,满足课题开发的需要,故本系统采用基于单点激光的纯机械旋转扫描方式,即通过电机带动单点激光实现两个维度的旋转扫描。系统外观安装如图 1 所示。首先,对周围的环境进行一次粗略扫描,然后根据系统的要求对场景中某一特定区域进行精确扫描,并对扫描初始点、扫描频率和步长等参数进行合理控制,使其在水平和垂直方向上成对称方式,保证恢复出来的数据真实地反映三维场景的原貌。

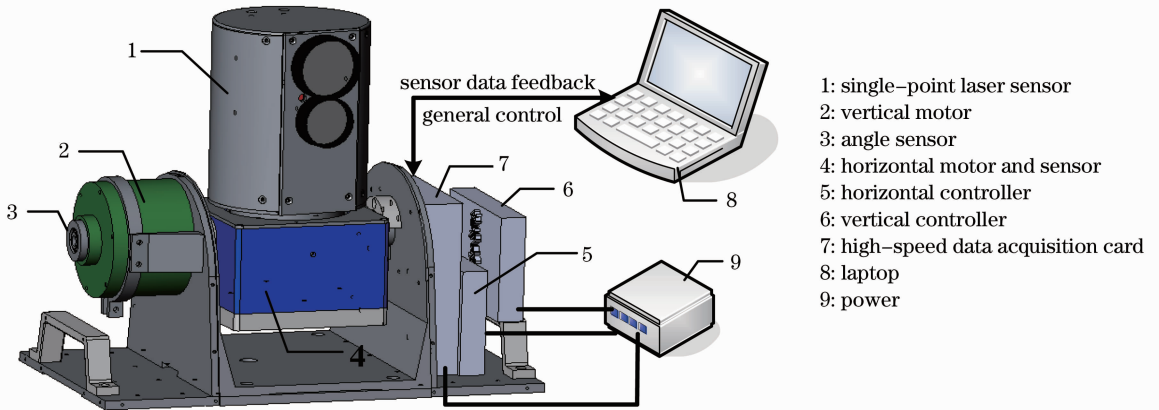


图 1 纯机械旋转扫描集成系统

Fig. 1 Integrated scanning system based on purely mechanical rotation way

### 2.2 系统集成开发

#### 2.2.1 单点激光传感器

系统选用德国 LRFS-0300 单点激光测距传感器,RS422 通信接口,该传感器光速波长为 905 nm,带有 635 nm 的红色可见瞄准激光,在自然表面下量程为 300 m,高反光面下可达 3000 m,传感器最高精度可达 2 cm<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.2 控制系统开发

控制系统开发是三维激光扫描系统开发的关键环节,系统设计方案的优劣直接关系到系统基本功能的实现与否。根据系统低转速、高转矩的应用需求,选用永磁式直流力矩电机。其特点是堵转力矩大,空载转速低,不需要任何减速装置即可直接驱动负载,过载能力强,电机稳定性高。采用 L298N 恒

压恒流桥式驱动芯片,设计基于数字信号处理器(DSP)核心运动控制器的控制驱动电路,通过改变脉宽调制(PWM)脉冲信号的占空比控制电机,实时接收角度传感器数据,利用比例积分微分(PID)技术实现电机转速的闭环控制,具有调速范围宽、稳定性高和动态响应快等特点<sup>[6]</sup>。

考虑到旋转变压器可适用于高温、严寒、潮湿和高振动等环境,选择其作为角度采集装置,使用模数转换器(ADC)转换芯片将旋转变压器的正余弦模拟信号转换为数字角度信号,通过串口实现信号的传输、控制与测量,为传感器数据匹配做好准备。系统集成框架如图2所示<sup>[7,8]</sup>。

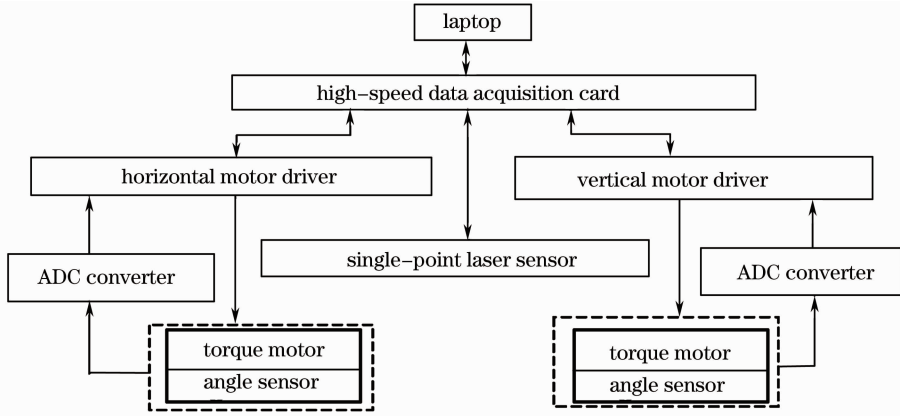


图2 基于单点激光的三维扫描坝体监测系统框图

Fig.2 System block diagram of 3D scanning system for dam monitoring based on single-point laser sensor

### 3 扫描数据边界模型

基于单点激光的三维扫描坝体监测系统是一个典型的机电光一体化集成系统,对其扫描数据边界模型的研究,有利于探索该种集成方式的机理,更好地理解系统参数意义;与此同时,建立边界模型,也有利于点云去噪等数据处理工作的开展。分别在笛卡儿坐标系和极坐标系下,对可能的扫描结果进行统计建模,建立相应的数据边界模型。

#### 3.1 笛卡儿坐标系

三维激光扫描系统按上位机指令在水平 $(-90^{\circ}, 90^{\circ})$ , 竖直 $(-90^{\circ}, 90^{\circ})$ 的范围内进行空间扫描,在笛卡儿坐标系下,对测量结果进行可能性分析。据公式:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2,$$

得到以坐标原点为圆心,以单点激光测距仪最大量程为半径的半球体,如图3所示。显然,所有解算的空间点均应落在半球体内。一般情况下,当设定扫描系统水平与竖直角度范围后,在笛卡儿坐标系的边界模型为圆锥体。

由笛卡儿坐标系下的边界模型可知,选用的单点激光量程越大,三维激光扫描系统的数据球半径越大;与此同时,基于单点激光的旋转集成方式,使系统采样呈球体放射状;在同样的采样角度步长下,场景距离系统越近,两采样点空间距离越小,即采样

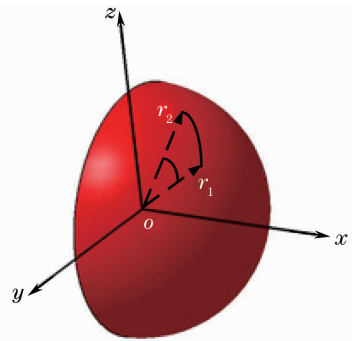


图3 笛卡儿坐标系下的数据球边界模型

Fig.3 Data ball boundary model in the Cartesian coordinate

越稠密,但同样大小的场景所需视场扩大;反之,采样越稀疏,所需视场缩小,扫描时间减少。因此,三维激光扫描系统机位固定后,应根据被测场景的远近,综合考虑采样密度与扫描时间,合理调整扫描的水平 and 竖直步长。

#### 3.2 极坐标系

以单点激光光心为原点O,水平方向旋转角 $\theta$ 、垂直方向旋转角 $\varphi$ 以及激光测量极半径值 $r$ 分别为3条坐标轴,建立极坐标系 $O-\theta\varphi r$ ,如图4所示。按照水平方向 $(-90^{\circ}, 90^{\circ})$ , 竖直方向 $(-90^{\circ}, 90^{\circ})$ 的范围进行场景扫描测试,统计输出参数,其分布构建成一长方体。其中角度维度两条边长为 $\pi$ ,距离维度方向最长为单点激光量程 $l$ ,当 $r$ 为固定值时, $\theta$ 和 $\varphi$

取值在平面内构成一个长方形,称此边界模型为长方体模型。

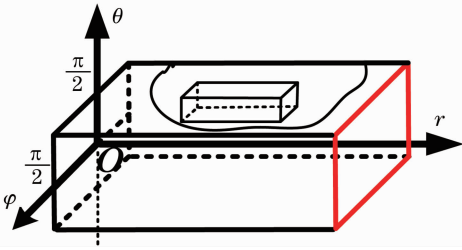


图4 极坐标系下的长方体边界模型

Fig. 4 Rectangular boundary model in the polar coordinate

长方体模型给出了系统的边界区域,有利于对“坏点”的剔除;同时,三维激光扫描系统的工作原理,也可理解为对长方体的面填充过程,而系统设定区域的快速扫描,则可理解为对长方体边界模型内小长方体的面填充过程。长方体模型提高扫描效率的实际意义在于,在面面扫描切换之间,由于运动系统本身具有惯性,起停需要一定时间,若扫描面增多,则增加了间歇次数,降低了扫描效率;不但如此,较多的往复运动,也容易影响数据采集的精度。

#### 4 系统标定

对本系统而言,原始标定十分重要。在机械结构理论设计上,应尽量保证水平方向力矩电机的旋转轴中心线与竖直方向力矩电机的旋转轴中心线垂

直交与一点,且此点与单点激光测距仪光心重合,否则角度传感器测得值与单点激光传感器激光光束的实际空间指向不一致,使最终的三维点云图像失真。且为拓展三维系统的扫描角度量程,应尽量减少机械机构对激光光束的遮挡。故机械结构整体设计如图1所示,激光传感器与两角度传感器的原点并不一致,为使场景所有激光数据回归到同一个坐标系下,当系统安装结束后,需对三维激光扫描系统进行系统标定,本文提出坐标归一算法。

如图5所示,建立激光传感器光心坐标系  $O_L - X_L Y_L Z_L$ 、系统基准坐标系  $O_B - X_B Y_B Z_B V$  以及3个过渡坐标系  $O_M - X_M Y_M Z_M$ ,  $O_H - X_H Y_H Z_H$  及  $O_V - X_V Y_V Z_V$ 。各坐标系均为笛卡儿右手坐标系,具体建立情况如表1所示。

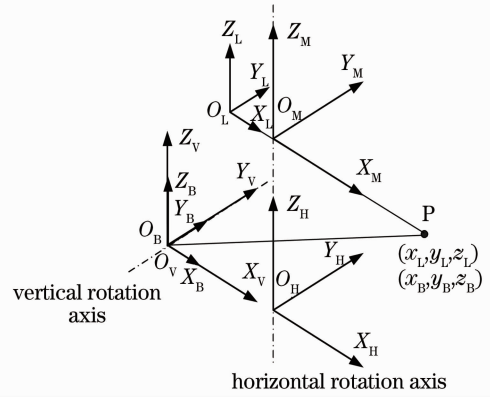


图5 系统标定算法中的坐标系

Fig. 5 Coordinates built in system calibration work

表1 标定算法中各坐标系建立情况

Table 1 Introductions of each coordinate for the calibration algorithm

Number	Coordinate names	Position of origin point	Instructions
1	$O_L - X_L Y_L Z_L$	Optical center of single-point laser sensor	$X_L$ built along the emission of laser beam, $Z_L$ pointed vertical direction
2	$O_M - X_M Y_M Z_M$	Intersection of horizontal rotation axis and the lever surface which covers $O_L$	Every coordinate axes have the same direction with $O_L - X_L Y_L Z_L$
3	$O_H - X_H Y_H Z_H$	Intersection of $Z_M$ and the lever surface which covers vertical rotation axis	$Y_H$ and vertical rotation axis are parallel along the right direction, $Z_H$ pointed vertical direction, coordinate will rotate with the vertical rotation axis
4	$O_V - X_V Y_V Z_V$	Intersection of vertical rotation axis and the $X_H O_H Z_H$ plane	Every coordinate axes have the same direction with $O_H - X_H Y_H Z_H$
5	$O_B - X_B Y_B Z_B$	The same to $O_V - X_V Y_V Z_V$	$Y_B$ coincided with vertical rotation axis along the right direction, $Z_H$ pointed vertical direction, $X_H$ pointed to front direction on the lever surface



设  $\mathbf{P}_B = (x_B, y_B, z_B, 1)^T$  为空间点  $P$  在坐标系  $O_B - X_B Y_B Z_B$  中的三维齐次坐标,  $\mathbf{P}_L = (x_L, y_L, z_L, 1)^T$  为  $P$  点在坐标系  $O_L - X_L Y_L Z_L$  下的三维齐次坐标,  ${}^L_B \mathbf{T}$  为坐标系  $O_L - X_L Y_L Z_L$  相对于坐标系  $O_B - X_B Y_B Z_B$  的变换矩阵, 则有公式

$$\mathbf{P}_B = {}^L_B \mathbf{T} \mathbf{P}_L, \quad (1)$$

根据坐标系的相关转换关系有

$${}^L_B \mathbf{T} = {}^V_B \mathbf{T} {}^H_V \mathbf{T} {}^M_H \mathbf{T} {}^L_M \mathbf{T}, \quad (2)$$

结合图 5, 可推导出

$${}^L_B \mathbf{T} = \mathbf{R}_{\text{rot}}(Y, \alpha) \mathbf{T}_{\text{trans}}(X, \Delta x) \mathbf{T}_{\text{trans}}(Z, \Delta z) \mathbf{R}_{\text{rot}}(Z, \beta) \mathbf{T}_{\text{trans}}(X, \Delta x') = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \Delta x' \cos \alpha \cos \beta + \Delta z \sin \alpha + \Delta x \cos \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & \sin \beta \Delta x' \\ -\sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & \Delta x' (-\sin \alpha \cos \beta) + \Delta z \cos \alpha - \Delta x \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中当系统整体装配完成后,  $\Delta x, \Delta z$  为固定值, 可通过机械设计尺寸推算得出,  $\Delta x'$  为单点激光传感器光心与水平旋转轴之间的偏移值, 可通过设计单点激光标定实验进行光心位置标定,  $\alpha, \beta$  在系统运行过程中实时获取。

考虑到坐标系  $O_L - X_L Y_L Z_L$  中  $X_L$  指向激光发射筒出射方向, 假定当前空间点  $P$  的极半径值为  $r$ , 则  $\mathbf{P}_L = (x_L, y_L, z_L, 1)^T = (r, 0, 0, 1)^T$ , 结合(1), (7)式, 可解算出场景空间点在三维激光扫描系统基准坐标系  $O_B - X_B Y_B Z_B$  下的三维坐标通式:

$$\begin{cases} x_B = (r + \Delta x') \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \Delta z + \cos \alpha \Delta x \\ y_B = (r + \Delta x') \sin \beta \\ z_B = -(r + \Delta x') \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \Delta z - \sin \alpha \Delta x \end{cases}. \quad (8)$$

由于核心激光传感器在采样频率为 2 kHz 时的误差为  $\pm 0.02$  m, 角度传感器的误差为  $\pm 0.16^\circ$ , 则系统误差至少为  $\pm 0.02$  m。

## 5 实验结果分析

为测试系统标定算法的正确性, 选择一段尾矿坝体作为实验场景进行扫描。并利用坐标归一算法将扫描结果进行坐标转化, 最终形成基准坐标系下的场景三维点云模型, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 左上方为目标地物坝体, 三维激光扫描系统位于距被测地物目标 300 m 处。根据扫描场景的特点, 采用先水平后竖直的扫描方式, 激光传感器采样频率为 2 kHz, 水平方向电机以 0.698 rad/s、竖直方

$${}^V_B \mathbf{T} = \mathbf{R}_{\text{rot}}(Y, \alpha), \quad (3)$$

$${}^H_V \mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{trans}}(X, \Delta x), \quad (4)$$

$${}^M_H \mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{trans}}(Z, \Delta z) \mathbf{R}_{\text{rot}}(Z, \beta), \quad (5)$$

$${}^L_M \mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{trans}}(X, \Delta x'), \quad (6)$$

式中  $\alpha, \beta$  分别为竖直和水平旋转维度上角度传感器获取值,  $\Delta x, \Delta z, \Delta x'$  分别为坐标系间沿相关坐标轴的偏移值,  $\mathbf{R}_{\text{rot}}$  为坐标系的旋转矩阵,  $\mathbf{T}_{\text{trans}}$  为坐标系的平移矩阵。

综合(2)~(6)式, 有

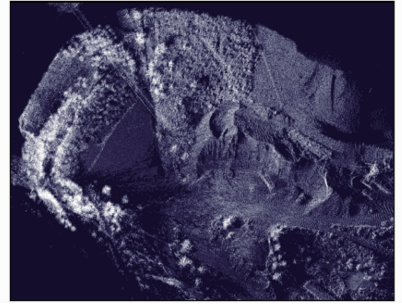


图 6 坝体三维扫描点云图

Fig. 6 Points cloud map of the dam from 3D scanning

向以每次旋转  $0.02^\circ$  的方式带动激光传感器扫描, 扫描间隔在 100 m 时为 3.49 cm、在 300 m 时为 10.46 cm。从实验结果可知, 利用系统标定算法, 可较为真实地获得三维空间信息, 达到了预期的效果。三维空间信息存在的误差, 将在后期的数据处理中进行解决, 最终得到高质量的三维空间信息。

## 6 结 论

进行了基于单点激光的三维扫描坝体监测系统开发, 通过讨论现有的集成方式, 选定了系统所用的基于单点激光的纯机械旋转扫描模式, 进行了系统核心传感器的选型及控制系统的开发, 搭建了实验样机, 建立了数据边界模型探讨系统集成机理, 提出了坐标归一算法完成系统标定, 并通过实际点云图像验证了系统标定算法的正确性, 系统开发取得了较好的效果。下一步的主要工作是: 建立坝体在完好状态下的点云模板, 基于三维点云图像, 研究相关智能监测算法, 通过计算数据云的倾角、体积等参

数,实现坝体的实时快速监测与灾害报警;并考虑将三维激光扫描系统与视频监控系统进行联动,激光扫描系统报警后,后台操作人员可通过视频系统进一步确认,避免误报情形的出现。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu Bofang. Several new ideas about concert dam [J]. *J. Hydraulic Engineering*, 2008, **39**(10): 27~32  
朱伯芳. 关于混凝土坝的几个新理念[J]. 水利学报, 2008, **39**(10): 27~32
- 2 Li Fuqiang, Qian Jinglin. Application of characteristic polynomial roots of autoregression time-series model in analysis of dam observation data [J]. *J. Zhejiang University*, 2009, **43**(1): 193~196  
李富强, 钱镜林. 大坝监测数据自回归模型特征根的应用研究 [J]. 浙江大学学报, 2009, **43**(1): 193~196
- 3 Paulo Dias, Migvel Matos, Vitor Santos. 3D reconstruction of real world scenes using a low-cost 3D range scanner [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2006, **21**(7): 486~497
- 4 Lai Xudong. The Principle and Application of the Airborne Laser Radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 62~63  
赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2010: 62~63
- 5 ACETECH Engineering In Germany, Manual Laser Distance Meter LRFC-0300[Z] May 2008
- 6 Han Antai, Liu Zhifei, Huang Hai. DSP Controller Principle and Application in Motion Control System[M]. Beijing: Tsinghua University, 2003. 1~38  
韩太安, 刘峙飞, 黄海. DSP 控制器原理及其在运动控制系统中的应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. 1~38
- 7 Zhiyu Xiang, Eryong Wu. Design and calibration of a fast 3D scanning ladar [C]. Luoyang: International Conference on Mechatronics and Automation, 2006: 211~215
- 8 Shi Guigang. Research of Data Processing Technology and Operation Method on 3D Scanning Based on Laser Sensor[D]. Shanghai: Tongji University, 2009  
施贵刚. 地面三维激光扫描数据处理技术及作业方法的研究 [D]. 上海:同济大学, 2009