

机场泊位引导系统的发展现状及关键技术分析

韩万鹏, 蒙文, 李云霞, 李大为, 蒋馥蔚
(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:介绍了机场泊位引导系统的发展现状,对当前国外研发生产的几款设备以及科研专利中的实现方法进行了系统比较,并对其发展趋势进行了展望。概述了基于三维激光扫描技术泊位引导系统的结构组成和工作原理。在总结对比泊位系统中激光扫描单元与成品三维激光扫描仪多种差别的基础上,论述了脉冲激光测距和双振镜扫描在泊位系统应用中的设计要求,针对容易产生误差的环节,提出了相应的校正方法,同时介绍了点云数据处理流程和算法设计要点。

关键词:泊位引导系统;三维激光扫描;激光测距;双振镜;数据处理

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.002

Development status and key technical analysis of airport docking guide system

HAN Wan-peng, MENG Wen, LI Yun-xia, LI Da-wei, JIANG Fu-wei

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract:The development and status of airport docking guide system are introduced in this paper. The realization methods of several kind foreign products and patents are compared in a systematic way. Development trends are also introduced. The structure and work principle of the system which is based on three-dimensional laser scanning technology are illustrated. The design requirements of pulsed laser ranging technology and dual galvanometer scanning technology are discussed. The corresponding correction methods are put forward and the data processing flow and key points in algorithm design are also illustrated.

Key words:docking guidance system; three-dimensional laser scanning; laser ranging; dual galvanometer; data processing

1 引言

近年来,机场管理控制系统的一体化、智能化水平越来越高,而传统的人工引导泊位方式因其效率低、安全性差、功能单一等缺陷已经不能满足现代化机场运营的需求。飞机泊位引导系统(docking guidance system, DGS)是一种能自动引导滑行飞机迅速到达机坪停机位置并准确停泊的一套人机对话指挥系统,该系统通过激光或视频传感器监测接近泊位的飞机位姿与速度信息,并通过停泊位前方的显示装置显示飞机位姿与速度等信息,可有效引导不同机型的航空器到不同停止线上与登机桥准确对

接。同时,它与机场数据集成平台相连,可实时提供入坞飞机的方位角引导、机型参数、航班信息、滑行速度、机位信号等内容,大大提高了机场的装备水平、劳动效率、管理水平和服务质量。

机场泊位引导系统的发展应用先后经历了“地理线圈式”、“激光测距式”和“目视泊位引导系统”几个阶段,伴随着激光扫描测量技术的不断深入发展和广泛应用,作为能够精确、快速获取地面物体轮

作者简介:韩万鹏(1983-),男,硕士,主要从事激光测距和振镜扫描技术研究。E-mail:403113056@qq.com

收稿日期:2011-07-12

廓三维数据的有效手段已被成功的运用到国内外机场的泊位引导系统中。1992年基于激光技术的机场泊位引导系统专利由瑞典的FMT公司申请获得,后来研制的飞机位置及资讯显示(aircraft positioning and information system, APIS)等系统应用广泛;1995年瑞典 Safegate 公司推出了以激光为基础的新一代 Safedock(安全停靠)引导系统(如图1所示),今天的产品能够以精确到10 cm的停止精度安全停靠飞机,产品的市场占有率达到80%;美国 Honeywell 公司生产的目视泊位飞机引导系统(visual docking guidance system)和德国西门子公司开发的视频导引系统(video docking system, VDOCKS)作为国际领先水平的引导设备也应用在世界很多机场。国内在此领域起步较晚,大多处于实验研究阶段。

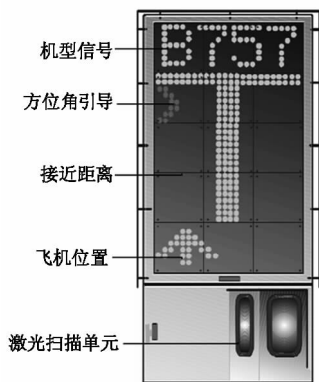


图1 Safegate公司的Safedock引导系统

Fig. 1 the Safedock guidance system of Safegate company

2 基本现状及原理

2.1 飞机泊位系统的发展现状及趋势

从近几年国内外已有的机场泊位引导设备和相关实验科研报道来看,该系统的实现方法主要有:①触发式埋地线圈感应检测方法;②视频探测图像识别方法^[1];③飞机机号检测识别方法^[2];④激光三维扫描识别方法。

以上几种方法的原理分别是:①地理感应线圈通过探测是否有金属物体(飞机前轮)经过或停留在线圈的上方来确定飞机的位置;②视频探测图像识别方法是采用视频摄像机影像跟踪技术捕捉飞机的运行轨迹,利用三维透视模型和完整的透视模型包络线进行比较计算来确定和识别飞机的机型;③机号检测识别方法是利用跑道或滑行道、机坪、廊桥等处设置的光电成像装置,扫描捕获飞机垂直尾翼上或机身上规定位置处的飞机号码,使之与计算机系统数据库中的机号数据库进行比较来确定飞机的机型和停靠指示信息;④激光三维扫描识别方法是通

扫描不同机型飞机头部建立三维的轮廓模型与飞机模型库或操作员预选的机型进行比对来确认飞机的机型。

每种方法的优缺点是:①地理感应线圈法优点是响应速度快,成本低,对天气和照度无要求,但误差较大,埋在地下的引线和电子元件容易被压坏,导致系统的可靠性不高,可调试可维修性差,现正逐步退出使用;②视频探测法成本低、误差小,但事先要预置大量的飞机图像参数数据库,响应速度较慢,调试性较差,可维修性一般,而且对天气和照度有一定要求,适应性较差;③机号检测识别法由于数据库信息只存储各种飞机的机号及对应的机型、所属的国别航空公司等数据,数据处理简单易行,但由于条件限制等因素尚没有得到推广;④激光三维扫描识别方法通过激光测距和激光扫描来确定飞机的机型、位置、速度等参数,不受天气及环境照度的影响,精度较高,可调试性、可维修性好。

从目前欧洲和亚洲大、中型机场的使用情况来看,像法兰克福机场、香港赤角机场、慕尼黑机场、新加坡章宜机场和上海浦东机场等安装是泊位引导系统的第2代产品,以激光测距为原理的泊位引导系统;像北京首都机场2号航站楼、韩国仁川机场、比利时布鲁塞尔机场安装的是泊位引导系统的第3代产品,以视频探测图像识别为原理的可视化泊位引导系统。

2008年,首都机场3号航站楼采用了基于激光3D扫描技术的泊位引导系统,可精确显示航空器入位滑行角度及距离,系统采用集成与本地两种控制方式,可提供泊位状态信息显示、航班信息编辑、滑行参数设定与提取及视频监控等多项功能,对雨、雪、雾等天气环境有较强的适应性。

2010年,虹桥机场2号航站楼共设置46套泊位引导系统,系统采用的是激光扫描和测距技术。在航空器停泊过程中,跟踪航空器的横向和纵向位置,通过显示屏为飞行员提供航空器接近停靠点的实时位置信息。

从以上各机场的运营情况来看,机场泊位引导系统提高了引导的准确度,确保了安全、高效、便捷地完成引导任务,间接地降低了人工成本。从发展趋势上看,由于激光扫描技术的独特优势:①数据获取速度快,实时性强;②扫描数据量大,精度较高;③主动式探测,对环境适应性较强,能全天候工作;④全数字特征,信息处理容易,系统逐渐向基于激光

三维扫描技术并综合视频监控等技术的精确、快速、多功能性方向发展。

2.2 系统组成及工作原理

基于激光三维扫描技术的泊位引导技术与传统的视频图像识别技术有根本的区别,如图 2 所示,系统主要包括:激光扫描单元(距离传感器、扫描振镜)、显示板装置、本地操作装置、PC 处理控制单元、供电系统以及通信网络接口等。

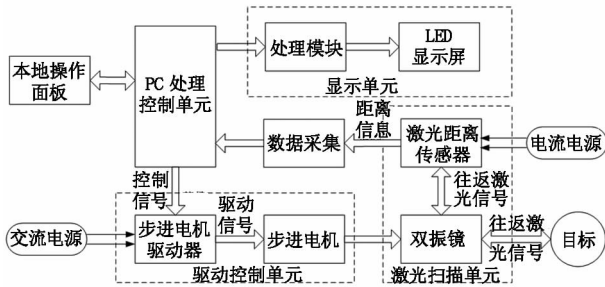


图 2 泊位引导系统结构框图

Fig. 2 block diagram of docking guidance system

飞机泊位引导系统安装在登机桥旁,其工作流程如图 3 所示,当一种飞机类型被操作员面板或登机操作系统选中后,泊位程序开始。系统自动进行校准检查,在系统切换到捕获模式之前,检查必须成功完成。如果校准控制不成功,在操作员面板的 LCD 窗口中就会显示出错误类型,随后进入停止维修状态。校准成功后,系统进入捕获模式,在这种模式下,激光对预定义的停靠区域进行扫描,检测正在接近或离开的飞机以及区域内的其他目标。当检测到一架飞机并且确定了其大概位置后,系统切换到跟踪模式。此阶段系统将检查和确认接近飞机的机型,并不断测量飞机的位置和径向速度。其机型和相对位置信息会实时显示在 LCD 显示屏上。如果

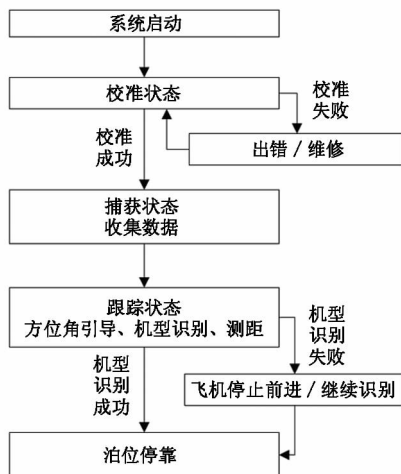


图 3 泊位系统工作流程图

Fig. 3 work flow chart of docking system

在规定位置前,系统不能鉴别出接近飞机的机型或鉴别出的机型与选定的类型不一致,系统会示意飞机停止前进,直到机型识别成功,才引导飞机在停止线停靠。

3 关键技术分析

3.1 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是近年来发展起来了一门新技术,可以高效、快捷、准确、方便的获得被测对象表面每个采样点空间立体坐标,这些采样点的集合,称之为“点云”,通过对点云的处理,可以快速生成物体真实的三维数据模型。

机场泊位引导系统的激光扫描单元采用的是基于脉冲激光测距和双振镜点扫描的三维形貌测量技术,至今尚未见到有关详细技术分析的文献报道,其结构如图 4 所示,与当前成品脉冲式激光扫描仪基本原理一致,但又有区别:①内部结构有差别,本系统扫描部分使用振镜,而成品扫描仪大多使用多面反射棱镜;②辅助设备不同,本系统无需 CCD 等成像辅助设备,而成品扫描仪一般需用 CCD 成像装置获取目标的纹理灰度等信息;③扫描范围不同,本系统扫描范围主要依据机场滑行道宽度和飞机尺寸而定(水平方向 $\pm 13^\circ$ 左右,垂直方向 $\pm 25^\circ$ 左右),而成品扫描仪大多要获得实物的全景外观信息(一般水平方向 360° ,垂直方向 270°);④数据处理有区别,本系统只对固定区域扫描,获得目标局部特征即可,数据量少,处理步骤简单,数据处理过程几乎和扫描过程同步,而成品扫描仪要得到扫描对象的整个轮廓和细节,数据量大,步骤复杂,数据处理工作主要在后期完成。

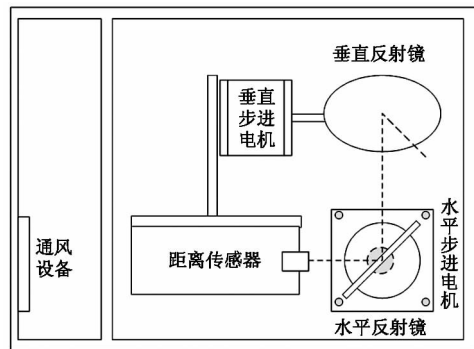


图 4 激光扫描单元结构图

Fig. 4 structure of laser scanning unit

其基本工作原理是通过脉冲激光测距得到扫描点到仪器的距离值 S ;再由内置伺服驱动马达系统精密控制双振镜转动获取发射光束的水平方向角度 α 和垂直方向角度 θ ;从而得到任一扫描目标点 P

的坐标 (x, y, z) , 如图 5 所示。

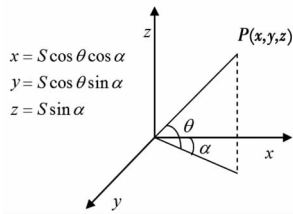


图 5 扫描点空间坐标获取原理图

Fig. 5 schematic diagram of space coordinates from scanning points

3.2 脉冲激光测距技术

脉冲激光测距传感器是泊位系统的核心部件之一。如图 6 所示, 系统主要包括激光脉冲发射模块及发射光学器件; 接收模块及接收光学器件; 时刻鉴别单元; 信号处理控制模块等。

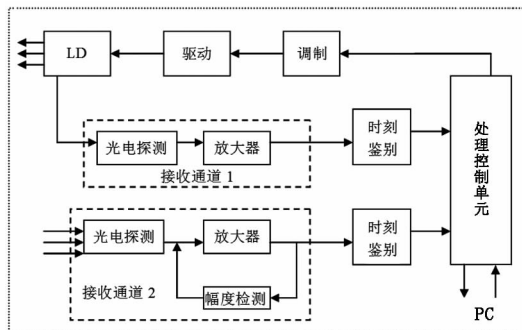


图 6 脉冲激光测距原理图

Fig. 6 schematic of pulsed laser ranging

针对泊位系统的实际需要, 测距传感器的主要性能指标要考虑到以下几个方面:

(1) 测距范围: 1 ~ 100 m (不高于 20% 反射率的自然表面), 系统引导的距离一般在 100 m 左右, 而各种飞机目标表面的反射率是不同的, 这与表面材料、使用状态、涂覆情况等有关。目标反射特性和背景光噪声等会直接影响测距系统的探测能力, 根据近程非合作目标测距原理, 接收光功率表达式为:

$$p_r = \frac{T_r I_r A_r \eta_r}{R^2} = \frac{p_i T_i T_r A_r \eta_r \rho \cos \theta}{\pi R^2} \quad (1)$$

其中, p_r 为接收到的光功率; I_r 为接收的光强; T_r 为接收系统光学透过率; T_i 为发射系统光学透过率; A_r 为有效接收面积; η_r 为接收系统滤波片光学通过率; p_i 为激光发射功率; ρ 为被测表面反射率; θ 为测量方向与被测点法线夹角; R 为目标距离。若取飞机表面反射率为 0.4, T_r 和 T_i 取 0.9, η_r 取 0.8, A_r 取半径为 5 mm 的圆的面积, θ 取 0° , R 取 100 m, 经计算可得:

$$p_r = 6.48 \times 10^{-10} p_i \quad (2)$$

因此, 系统设计时要充分考虑脉冲激光功率和

探测器的接收灵敏度等指标。

(2) 测量速率: 泊位引导过程中, 在水平方向 $\pm 13^\circ$ 范围内以 0.1° 步进扫描一次有 260 个点, 以 1000 点/s 的速率测量, 测量 260 个点需要 0.26 s, 如果测量速率较低, 系统就很难在短时间内获得足够的点云数据来识别飞机机型。因此, 可采用超高频脉冲激光测距或连续波激光测距的方法等^[3], 使测量速率达到 1000 点/s 以上。

(3) 对人眼安全: 考虑到系统扫描过程中不伤害飞行员的眼睛, 采用的激光源安全等级要高, 同时为了不分散飞行员的注意力, 又不能采用可见光, 因此光源波长一般选择在 (900 ± 10) nm 范围内, 安全等级为一级。

(4) 测距精度: 测量精度是衡量测距系统性能的一个关键指标, 关系到泊位引导系统对飞机的定位精确和正确识别率, 下面对其测量误差分析如下:

根据激光在空间以光速传播特性, 容易得出距离测量公式为:

$$S = ct/2 = cnf/2 \quad (3)$$

式中, S 为目标距离; t 为光脉冲往返时间; c 为光在空气中传播速度; n 为计数器计数结果; f 为计数时钟频率。对式(1)两端取微分得:

$$dS = S(dc/c) + S(df/f) + S(dn/n) \quad (4)$$

可见, 决定脉冲法测距精度的因素主要有大气折射率变化等原因引起的光速变化误差、频率摆动误差、脉冲计数误差等, 此外还要考虑回波上升前沿变化、阈值电平漂移、放大器及探测器噪声引起的时间测量误差、目标反射面倾斜度及粗糙程度的影响等。

结合上面理论分析和实际情况来看, 机场滑行道测量距离较短(100 m 以内), 大气折射等环境引起的光速变化误差可忽略不计; 第二项误差可通过提高时钟频率和选用高稳定度的时钟发生电路来降低; 计数精度可采用高速阈值鉴别芯片技术^[4]、自动增益控制技术^[5]、脉冲并行计数法^[6]等来改善。

3.3 双振镜激光扫描技术

二维振镜激光扫描技术因其速度快、精度高、易于控制等特点得到了越来越广泛的应用。如图 7 所示, 振镜扫描系统由扫描反射镜、位置传感器、扫描电机及伺服电路几部分组成。其整体性能指标^[7]包括转角范围、小信号响应时间、重复性、线性度和温漂等, 实际应用中振镜的性能要求就是精度高、速度快、偏角大、体积小、可靠性好。

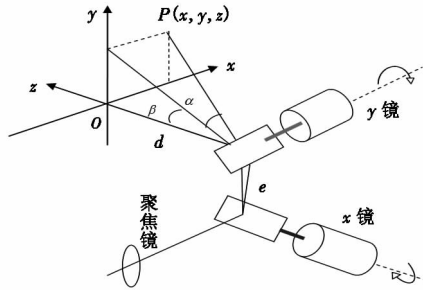


图7 双振镜扫描系统

Fig.7 dual galvanometer scanning system

泊位系统应用中,若每次以 0.1° 的步进进行扫描,每接收到一次数据变换一次角度,则当测距速率为1000点/s时,角度变换间隔约为1ms,因此系统对扫描单元的精度、稳定性和响应时间等都有较高的要求。现对扫描单元的设计要点和误差校正方法分析如下:

(1)扫描反射镜的选材依赖于激光的波长和功率,镜片上的激光反射膜要具备吸收小、反射率大和耐激光破坏阈值高的特点,其尺寸取决于扫描光束的有效直径,形状的设计要从动力学的稳定性出发,在保证转动惯量减小的同时,又要避免共振效应的发生。

(2)扫描电机的设计^[8]要满足低惯量、大转矩、宽频率特性的要求。

振镜的转动转矩计算公式为:

$$\begin{aligned} T &= BLNID - 2\pi 10^{-7} CLN^2 I^2 \frac{D}{g} \\ &\approx BLNID \\ &= K_T I \end{aligned} \quad (5)$$

式中, T 是转矩; B 是磁感应强度; L 是转子的长度; D 是转子的直径; g 是空气隙的间距; N 是线圈的匝数; I 是线圈的电流; C 是转子最大转角与 α 角的比; $K_T = BLND$,称为电机转矩系数,由于非线性项要远小于线性项,故可以省略。从式(5)可以看出电机转动转矩与流经电机线圈的电流成正比,设计过程中应尽量减少非线性因素的影响,以便提高系统的稳定性和速度。

扫描电机的数学模型为:

$$\begin{aligned} G &= \frac{\theta(S)}{E_i(S)} = \frac{K_T/R}{(LS+R)(JS^2+fS+g)+K_TK_iS} \\ &= K \frac{\omega_n^2}{S^2+2\varepsilon\omega_n S+\omega_n^2} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, θ 是电机转子偏转角度; E_i 表示振镜线圈的输入电压; L 为线圈的电感; R 为线圈的电阻; f 为阻尼常数; J 是转子和镜片相对转动惯量之和; g 是扭力

棒弹性常数; K_b 为反电势常数; K 为振镜线圈力矩与线圈中电流的比值; ε 为系统阻尼比; ω_n 为系统自然频率。系统响应时间可通过改变 ε 和 ω_n 缩短。

(3)振镜伺服控制系统的设计要以稳态和动态性能、可靠性、使用寿命、工作环境、体积结构等出发点,选择合理有效的控制方式。

(4)双振镜扫描的误差分析如下,由图7可知 x, y 镜分别转动 α, β 角后,扫描光束在 xOy 平面内的扫描线端点坐标为:

$$\begin{cases} y = d \tan 2\beta \\ x = (e + d \sec 2\beta) \tan 2\alpha \end{cases} \quad (7)$$

当摆角 α 不变时,坐标 x, y 的值会随着摆角 β 作相应的变化,令 $\tan 2\alpha = c, c$ 为常数,对式(7)变形整理后得:

$$\frac{(x-ce)^2}{(cd)^2} - \frac{y^2}{d^2} = 1 \quad (8)$$

显然,扫描轨迹为双曲线,即所谓的枕形畸变^[9],这是光学元件无法消除的非线性几何畸变。针对以上双振镜扫描的误差,最直接简单的校正方法是通过增量补偿法^[10]对畸变值进行补偿。此外,飞机以 $2 \sim 4$ m/s的速度向停止线滑行,式(7)中 d 为变量,也会带来扫描误差,从而影响点云坐标的精度。另外还要考虑到聚焦误差、系统误差、环境误差等,这些因素影响较小,可通过自适应聚焦或系统校准来减弱。

3.4 数据处理技术

当前,有关三维激光扫描点云数据处理的算法研究比较热门,国外三维激光扫描仪也有相应的处理软件。通常情况下,点云数据的处理过程^[11-12]主要有杂点的剔除、光顺去噪、多视点云的拼接、点云数据的压缩、边缘检测、轮廓提取、形状匹配等等,在处理过程中根据实际的需要对点云数据进行预处理。

基于激光三维扫描技术的泊位系统数据处理方法至今尚未见到相关文献报道,但由第3.1节可知,它与成品激光扫描仪相比在数据处理上有明显的特点:①数据量少。与常规的逆向工程三维建模不同,系统不需要目标表面轮廓的纹理色彩和扫描死角等细节,只要“点云”数据能够大致描绘飞机头部轮廓即可;②处理环节少。针对固定区域的扫描,不需要数据的拼接、重叠区域处理,也不需要目标的着色、阴影检测等环节;③实时性高。需要数据处理过程与扫描过程基本同步,才能实现对飞机的实时引导。

在算法设计上,要充分考虑运算的速率和效果,注重简单流畅、精确稳定。主要设计流程可分为:数据的简化去噪、特征点的快速提取、模型的快速匹配等。

4 结 论

当前,国内在大型机场的兴建或扩建中都引进了机场泊位引导系统,这是机场信息化建设发展的必然趋势。然而,泊位系统的核心技术在我国还不是很成熟,从事此方面研究的单位和人员也比较少。本文立足于机场建设的现实需求,详细介绍了国内外泊位引导系统的使用现状和发展趋势,通过系统之间的对比,总结了各类产品和专利的优劣,并对当前刚刚兴起的基于激光三维扫描技术的泊位系统进行了关键技术分析,但这还远远不够,相信随着更多研究力量的不断介入,在降低本土对国外技术产品的依赖性 & 提高该技术向其他领域拓展应用方面会有很大改观。

参考文献:

- [1] 丁彤,姚立平. 可视化泊位引导系统比较分析[J]. 中国民航学院学报,2003,21(3):37-39.
- [2] Zhang Ji hong. Automatic aircraft type identification and guiding system at the aircraft parking lot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35(7):196-197. (in Chinese)
张积洪. 飞机泊位机型自动识别与指示系统[J]. 机床与液压,2007,35(7):196-197.
- [3] Chen Qiansong, Zhao Dalong, Yang Chengwei, et al. Study on self-triggering pulsed time of flight laser range finding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(6):745-748. (in Chinese)
陈千颂,赵大龙,杨成伟,等. 自触发脉冲飞行时间激光测距技术研究[J]. 中国激光,2004,31(6):745-748.
- [4] Yu Jing, Jiang Hong, Tang Dan. A method for increasing the time measurement precision in pulse laser ranging [J]. Journal of Henan University: Natural Science, 2010, 40(1):18-22. (in Chinese)
虞静,江虹,唐丹. 一种提高脉冲激光测距中时间测量精度的方法[J]. 河南大学学报:自然科学版,2010,40(1):18-22.
- [5] Guo Ying, Chen Yi, Huang Genghua, et al. Method of automatic gain control used in high precision pulse laser range finder [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4):345-348. (in Chinese)
郭颖,陈弈,黄庚华,等. 一种应用于高精度脉冲激光测距的自动增益控制方法[J]. 激光与红外,2010,40(4):345-348.
- [6] Huang Zhen, Liu Bin. Research on parallel counting pulsed laser ranging[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(6):431-432. (in Chinese)
黄震,刘彬. 并行计数法脉冲激光测距的研究[J]. 激光与红外,2006,36(6):431-432.
- [7] Ye Q. A study of high speed galvanometer and practise [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004. (in Chinese)
叶乔. 高速振镜理论研究及实践[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- [8] Li Peng, Fan Lulu. Miniature design of galvanometer scanner circuit [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(11):1193-1197. (in Chinese)
李鹏,范璐璐. 小型化振镜扫描器电路设计[J]. 激光与红外,2009,39(11):1193-1197.
- [9] Zhao Yi, Lu Bingheng. Pillow shaped distortion correction algorithm of galvanometric scanning system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(3):216-218. (in Chinese)
赵毅,卢秉恒. 振镜扫描系统的枕形畸变校正算法[J]. 中国激光,2003,30(3):216-218.
- [10] Yu X Sh. Distortion correction for dual galvanometer scanning [J]. Laser & Infrared, 1998, 28(1):45-47. (in Chinese)
虞孝舜. 双振镜扫描几何畸变的校正[J]. 激光与红外,1998,28(1):45-47.
- [11] Meng Na. Research on processing teehnology based on laser seanning point cloud [D]. Ji'nan: Shandong University, 2009. (in Chinese)
孟娜. 基于激光扫描点云的数据处理技术研究[D]. 济南:山东大学,2009.