

# 基于声光扫描的三维视频激光雷达技术

罗远<sup>1,2</sup> 贺岩<sup>1\*</sup> 胡善江<sup>1</sup> 臧华国<sup>1</sup> 尚建华<sup>3</sup> 万渊<sup>1</sup> 陈卫标<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全国态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup> 东华大学信息学院, 上海 200051

**摘要** 提出一种基于声光扫描技术实现三维视频激光雷达系统, 克服了基于传统扫描方式的三维成像激光雷达应用中所面临的成像速度慢、体积大、质量大等问题。采用二维声光扫描技术, 大大提高了扫描速度; 同时, 采用高精度的时间差检测芯片, 精确测量激光脉冲飞行时间, 从而获得高精度的距离值, 实现高精度的三维视频成像。详细描述了系统的原理、组成部分以及实验结果。在图像分辨率为 63 pixel×63 pixel 时, 该系统三维成像速度达到 25 frame/s, 实现视频三维成像, 能够满足对成像速度要求较高的特殊场合的需求。

**关键词** 成像系统; 声光扫描; 三维成像; 激光雷达; 非机械扫描; 高重复频率光纤激光器; 飞行时间法

**中图分类号** TN959.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0802005

## Three-Dimensional Video Imaging Lidar System based on Acousto-Optic Laser Scanning

Luo Yuan<sup>1,2</sup> He Yan<sup>1</sup> Hu Shanjiang<sup>1</sup> Zang Huaguo<sup>1</sup> Shang Jianhua<sup>3</sup>  
Wan Yuan<sup>1</sup> Chen Weibiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> School of Informatin Science and Technology, Donghua University, Shanghai 200051, China

**Abstract** A new three-dimensional video imaging lidar system based on acousto-optic laser scanning is presented, this system solves the problems of low imaging speed, large volume, and large quality which exist in the lidar system based on the traditional scanning method. Using two-dimensional acousto-optic scanning technology, the scanning speed can be improved. At the same time, high precision time detection chip is used to measure the time of laser pulse flight, in order to gain the distance of the target with high precision. So high precision and video-frequency three dimensional images is achieved. The principle of the system, system components, and the experimental results are described in detail. When the image resolution is 63 pixel×63 pixel, the imaging speed is 25 frame/s, and that can satisfy the demand of high imaging speed requirements for some special situation.

**Key words** imaging systems; acousto-optic deflection; three-dimensional imaging; laser radar; non-mechanical scanning; high-repetition rate fiber laser; time-of-flight method

**OCIS codes** 110.6880; 110.0110; 040.1345; 120.0280; 230.1040

## 1 引言

随着激光雷达技术以及光电探测技术的不断发

展, 其中, 成像激光雷达更是成为发展的主流<sup>[1]</sup>。三维成像激光雷达具有应用范围广、探测距离远、成像

收稿日期: 2014-01-24; 收到修改稿日期: 2014-03-20

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项任务(2012YQ18012202)

作者简介: 罗远(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事新型激光雷达技术方面的研究。E-mail: luoyuanhrbeu@163.com

导师简介: 陈卫标(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光器技术及先进激光雷达系统等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: heyang@siom.ac.cn

精度高、使用便捷、三维图像获取速度快等优点,在矿场检测、地形绘制、桥梁监测、公路检测、文物保护、犯罪现场复制等民用领域具有广泛应用<sup>[2]</sup>,同时在军事、航天等领域也发挥着关键的作用。目前广泛使用的三维成像激光雷达主要是采用机械扫描方式,能够实现大范围、高点密度的三维测量,但同时存在成像速度慢、体积大、质量大等缺点,通常获取一幅完整的三维图像需要数十秒,不能满足对成像速度要求高的特殊场合,如航天器着陆地点的选择、地形测绘等。为克服三维成像速度慢的缺点,国内外的科研人员尝试了很多技术途径,主要分为两类:

1) 基于面阵探测器的无扫描三维成像激光雷达,只需发射一个激光脉冲,便可获得整幅三维图像,成像速度快<sup>[3]</sup>。由于这种高灵敏度的大面阵探测器制作工艺复杂,目前国内无法获得这种探测器,制作工艺也不成熟,只有少数小面阵的探测器,因此,目前国内无法实现基于面阵探测器的无扫描三维成像激光雷达技术。

2) 基于非机械扫描的三维成像激光雷达。非机械扫描技术主要包括声光扫描技术<sup>[4]</sup>、电光扫描技术、液晶扫描技术<sup>[5]</sup>、微电子机械系统(MEMS)微镜扫描技术<sup>[6]</sup>等,在二维方向上快速扫描,同时通过激光脉冲的飞行时间,测量每点的距离,反演得到三维图像。每种扫描技术各有优缺点,并且都在发展当中。

从当前的技术水平出发,为了满足特定的快速三维成像应用需求,提出利用声光扫描的非机械扫描方式,实现快速三维成像。该扫描方式利用声光偏转效应,通过快速改变通过声光介质的声频率,实现光束的高速偏转,相比机械的扫描,具有更快速、更灵活的扫描角度控制方式,能够实时改变扫描角度范围、角度分辨率和扫描速度,非常适合高速扫描且扫描方式实时可变的应用,具有体积小、质量轻等优点。本文详细描述了该系统的组成、工作原理以及实验结果,实现了分辨率为  $220 \text{ pixel} \times 220 \text{ pixel}$ , 帧频为  $2 \text{ frame/s}$  的三维图像,以及分辨率  $63 \text{ pixel} \times 63 \text{ pixel}$ , 帧频为  $25 \text{ frame/s}$  的三维图像。

## 2 理论分析及实验装置

### 2.1 基于声光扫描的三维视频激光雷达设计原理

该系统采用二维声光扫描器件作为扫描单元,通过改变通过声光器件的声频率来改变激光的出射角度,采用高重频光纤脉冲激光器作为光源,同时,通过高精度时间差检测电路,检测激光脉冲出射和接收到激光回波的时间差,利用激光脉冲的飞行时

间、激光脉冲的出射角度,反算出每个扫描点对应的距离<sup>[7]</sup>,控制二维声光扫描器件,扫描一整幅图像,从而反算出一幅完整的三维图像。

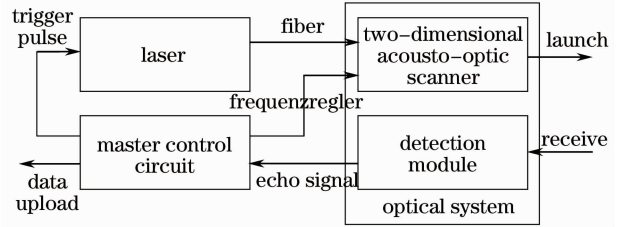


图 1 系统构成图

Fig. 1 System structure diagram

#### 2.1.1 二维声光扫描理论分析

声波通过声光介质时,引起介质的密度呈疏密相间的交替变化,当光波通过此介质时,就会产生光的衍射。衍射光的强度、频率、方向等都随着超声场的变化而变化。当入射光与声波面间夹角满足一定条件时,介质内各级衍射光会互相干涉,各高级次衍射光将互相抵消,只出现 0 级和 +1 级(或 -1 级)衍射光,即产生布拉格衍射。声光偏转器就是一种基于声光效应原理的器件。超声波频率  $\Delta f_s$  引起光束偏转角的变化可表示为

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{nv_s} \Delta f_s, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为光波波长,  $v_s$  为超声波在介质中的传播速度,  $n$  为声光介质的折射率<sup>[8]</sup>。

实验中,声光扫描器件使用的声光介质为  $\text{TeO}_2$ , 晶体在垂直于光波传播方向上的尺寸为  $6.7 \text{ mm} \times 6.7 \text{ mm}$ 。  $\text{TeO}_2$  晶体的慢轴方向的折射率为 2.411, 声波在晶体中慢轴方向的传播速度为  $617 \text{ m/s}$ , 激光的波长为  $1064 \text{ nm}$ , 超声波频率变化量  $\Delta f_s$  为  $32 \text{ MHz}$ , 由(1)式推算可得,光束的偏转角为  $22.8 \text{ mrad}$ , 相对于入射光线,光束的偏转角为  $45.6 \text{ mrad}$ 。因此二维声光扫描器件的扫描范围为  $2.6^\circ \times 2.6^\circ$ , 为满足实际应用需求,使光通过 2 倍的缩束镜,扩大光束扫描范围至  $5.2^\circ \times 5.2^\circ$ , 实际使用范围为  $5^\circ \times 5^\circ$ 。该声光扫描器件的最大扫描分辨率为  $500 \text{ pixel}$ , 因此,角度分辨率为  $0.182 \text{ mrad}$ 。

通过使用两个偏转方向相互垂直的声光偏转器组成二维声光偏转器件,可实现激光束的二维偏转,如图 2 所示。

图 3 为二维声光器件的驱动原理图,采用直接数字频率合成技术(DDS)改变通过声光介质的声频率<sup>[9]</sup>。频率控制模块在激光器打开时,将频率控制字并行写入数字频率合成器 DDS-X 和数字频率合

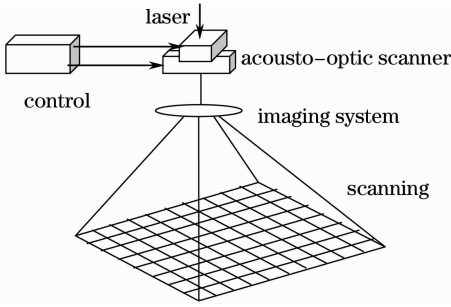


图 2 二维声光扫描系统原理图

Fig. 2 Two-dimensional scanning system schematic diagram

成器 DDS-Y, DDS 按照频率控制字产生特定频率的正弦信号, 正弦信号分别经信号放大模块放大后, 传送到二维声光扫描器件的两个不同方向, 利用声光偏转效应实现激光偏转角度的控制。现场可编程门阵列 (FPGA) 主控芯片通过频率控制模块改变频率控制字, 频率控制字在一定范围内, 可任意改变, 因此, 二维声光扫描器件能够方便、灵活、快速地改变激光扫描角度范围、角度分辨率和扫描速度。

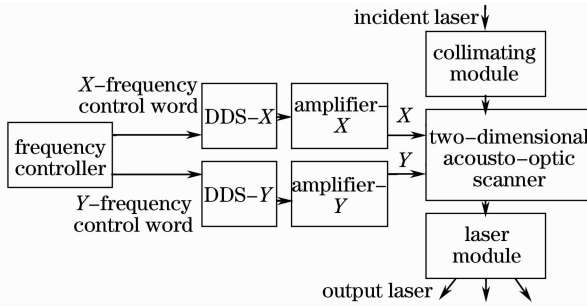


图 3 二维声光扫描系统驱动原理

Fig. 3 Drive principle of two-dimensional scanning system

二维声光器件的扫描速度主要受限于声波在声光晶体中的渡越时间, 根据声光晶体的尺寸和声波在晶体中的传播速度, 可以计算出声波在声光晶体中的渡越时间为  $10 \mu\text{s}$ , 因此, 二维声光扫描器件最快的扫描速度为每隔  $10 \mu\text{s}$  改变一次扫描状态。

利用二维声光扫描器件的系统的图像帧频主要取决于两点: 激光器的重频  $F$  和图像的像素数 ( $N \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ )。由于光源采用高重频、窄脉宽的脉冲光纤激光器, 激光波长为  $1064 \text{ nm}$ , 脉冲宽度为  $3 \text{ ns}$ , 激光脉冲重复频率为  $100 \text{ kHz}$ , 脉冲间隔为  $10 \mu\text{s}$ , 因此, 每秒可获得  $100000$  个扫描点的数据。帧频为  $F/(N \times N)$ 。在像素为  $220 \text{ pixel} \times 220 \text{ pixel}$  时, 帧频为  $2 \text{ frame/s}$ ; 在像素为  $63 \text{ pixel} \times 63 \text{ pixel}$  时, 帧频为  $25 \text{ frame/s}$ 。另外, 提高激光器的脉冲重复频率, 减小声光晶体的尺寸, 可实现更高的点扫描

速度, 从而能够提高获取图像的帧频。

该系统的图像分辨率主要取决于二维声光器件的扫描角度范围和角度分辨率, 所使用的二维声光器件的角度分辨率为  $0.182 \text{ mrad}$ , 扫描角度范围为  $5^\circ \times 5^\circ$ , 因此, 能够满足实际应用需求。

### 2.1.2 系统测距能力分析

该系统的最远测量距离可通过激光雷达方程计算得到, 由于二维声光器件的扫描范围为  $5^\circ \times 5^\circ$ , 扫描分辨率为  $63 \text{ pixel} \times 63 \text{ pixel}$  或  $220 \text{ pixel} \times 220 \text{ pixel}$ , 在远距离成像时, 目标的面积大于激光光斑的面积, 因此, 激光回波能量的计算参考大目标激光雷达方程<sup>[1]</sup>, 目标为标准漫反射体, 激光雷达探测距离  $R$  处的目标反射信号, 其所满足的激光雷达方程是

$$P_r(R) = P_L \frac{A_r}{R^2} \eta(\lambda_L) \frac{\rho}{2\pi} \exp\left[-2 \int_0^R k(\lambda_L, R) dr\right], \quad (2)$$

式中  $A_r$  为望远镜面积,  $\eta(\lambda_L)$  为光学接收系统的通光效率  $0.12$ ,  $P_L$  为脉冲激光峰值功率为  $1 \text{ kW}$ ,  $\rho$  为目标反射率  $0.2$ ,  $k$  为大气衰减系数。

该系统的噪声主要分为两部分, 背景噪声和探测器本身的噪声, 探测器的噪声主要与暗电流, 信号散粒噪声, 热噪声, 前置放大器噪声以及电子学带宽有关, 下面分别估算各部分噪声。该系统采用高灵敏度的雪崩光电二极管作为探测器件, 对硅基雪崩光电二极管 (APD) 探测器来说, 信噪比 (SNR) 表示为<sup>[10]</sup>

$$\text{SNR} = \frac{P_r^2}{2B(P_r + P_{br} + N_{EP} \sqrt{B}) h\nu / \eta_D}, \quad (3)$$

式中  $\eta_D$  为探测器量子效率,  $\nu$  为激光频率,  $h$  为普朗克常数,  $P_r$  为探测信号光功率,  $P_{br}$  为背景光功率,  $N_{EP}$  为探测器等效噪声功率, 其大小为  $90 \text{ fW}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,  $B$  为探测器带宽, 其大小为  $50 \text{ MHz}$ 。  $\eta_D$  表达式为

$$\eta_D = R_s \frac{h\nu}{e}, \quad (4)$$

式中  $R_s$  为探测器响应率,  $e$  为电子电荷, 使用的探测器是高灵敏度的 APD, 在  $1064 \text{ nm}$  波段的响应度为  $0.4 \text{ A/W}$ 。

激光雷达系统接收背景光功率  $P_{br}$ , 其所满足的激光雷达方程是<sup>[10]</sup>

$$P_{br} = P_b A_r \gamma_{sa} \eta(\lambda) \Delta\lambda, \quad (5)$$

式中  $A_r$  为望远镜面积,  $\eta(\lambda)$  为光学接收系统的通光效率  $0.4$ ,  $P_b$  为背景光辐照度 [ $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{nm} \cdot \text{m}^2)$ ],

$\gamma_{sa}$  为望远镜接收立体角 (0.006 sr),  $\Delta\lambda$  为光学带 (3 nm):

$$\gamma_{sa} = 4\pi (\theta/4)^2, \quad (6)$$

式中  $\theta$  为望远镜接收视场角 (0.087 rad)。

在 1064 nm 波长下, 太阳到达地球的背景辐照度是  $P_d$ , 将地面看作朗伯体, 根据地面反射率  $\rho$ , 计算向上的背景辐亮度<sup>[11]</sup>

$$P_b = P_d \cdot \rho \cdot \cos \theta / (2\pi), \quad (7)$$

式中  $P_d$  为太阳照射到物体上的辐照度,  $P_d$  的大小与太阳入射角有关, 考虑半球入射方向, 在 1064 nm 处  $P_d$  为  $0.062 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{\AA})$ ,  $\text{\AA}=0.1 \text{ nm}$ ; 地面反射率  $\rho$  为 0.1;  $\theta$  为反射面法线与激光雷达的接受光轴的夹角为  $45^\circ$ ; 考虑能见度为 20 km 时<sup>[11]</sup>, 在最远作用距离处, 大气双程透射率为 0.9。信噪比随距离变化曲线如图 4 所示。

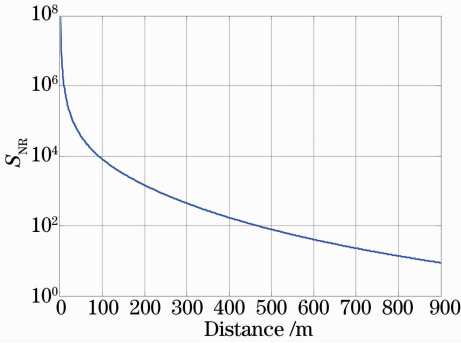


图 4 信噪比随距离变化的曲线

Fig. 4 SNR changing with distance

理论推算得, 在 800 m 处, 信噪比仍然大于 10。为提高最远测量距离, 可增加接收孔径和激光器的峰值功率, 若峰值功率提高 4 倍、光学接收口径增加到 50 mm, 最远测量距离可达 1.5 km。

影响激光雷达测距的误差因素包括系统静态误差和随机误差两种。系统静态误差通常是由于系统加工和安装中产生的与真值之间的固定偏差, 可以通过后期的标校消除, 因此, 在对影响测距精度的误差分析中只考虑随机误差; 随机误差是在系统运行中随机出现, 通常服从正态分布的误差, 对脉冲激光测距系统来说, 影响测距精度原因主要包括探测器带宽、噪声、时间间隔测量的分辨率等影响。

影响测距精度的总误差可以表示为

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_s^2 + \Delta R_c^2}, \quad (8)$$

式中  $\Delta R_c$  为测时电路中的时间测量电路变化引起的测距误差。激光雷达系统采用飞行时间测量方法测量目标的距离, 采用高精度时间测量芯片 (TDC) 测量激光脉冲的飞行时间, 测试精度可达 27 ps, 对

应的测距精度为 4.1 mm。 $\Delta R_s$  为探测器输出脉冲整形时甄别电平变化引起的测距误差。在跟踪过程中, 探测器的输出脉冲幅度会产生随机变化, 如果采用固定检测电平, 将会产生较大的测时误差。 $\Delta R_s$  可根据如下公式求得<sup>[12]</sup>:

$$\Delta R_s = \frac{c \cdot \Delta T}{2 \sqrt{S_{NR}}}, \quad (9)$$

式中  $\Delta T$  为探测器接收到激光脉冲的回波信号时输出电脉冲信号的脉宽为 7 ns。

综合以上的测距误差, 系统的总测距精度: 在作用距离为 10 m 时,  $\Delta R$  为 4.2 mm; 在作用距离为 100 m 时,  $\Delta R$  为 12.4 mm; 在作用距离为 500 m 时,  $\Delta R$  为 118.3 mm; 在作用距离为 800 m 时,  $\Delta R$  为 282.3 mm。

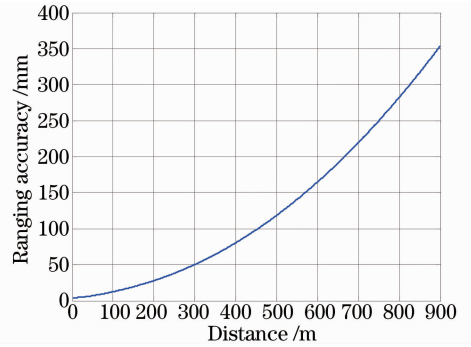


图 5 测距精度随距离变化曲线

Fig. 5 Ranging accuracy changing with distance

## 2.2 激光雷达系统介绍

该激光雷达系统由激光器、激光发射模块、激光接收模块、信号处理模块、主控电路模块和上位机程序处理模块组成, 如图 6 所示。其中, 光源采用高重频、窄脉宽的脉冲光纤激光器, 激光脉宽为 3 ns, 激光波长为 1064 nm, 激光脉冲重复频率为 100 kHz, 脉冲间隔为  $10 \mu\text{s}$ ; 探测器采用高灵敏度的 APD; 时间差检测模块采用高精度的 TDC, 时间测量分辨率达到 27 ps。

主控电路模块的 FPGA 主控芯片控制激光器控制模块向激光器周期性地输出触发脉冲, 激光器收到触发脉冲后, 输出激光脉冲分为两路, 一路激光脉冲经过激光准直透镜至二维声光扫描模块, 另一路激光脉冲输出至起始信号检测电路; FPGA 主控芯片在控制输出激光器触发脉冲的同时, 控制频率控制模块并行输出频率控制字信号至二维声光扫描模块, 二维声光扫描模块通过频率控制字调整出射激光的方向, FPGA 主控芯片在每次控制输出激光器触发脉冲的同时, 改变频率控制字, 实现激光出射

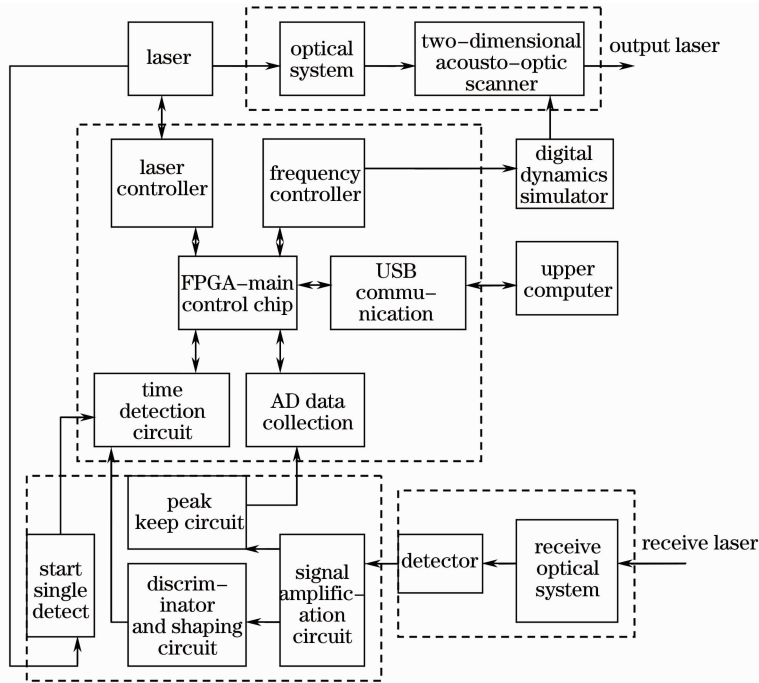


图 6 三维成像激光雷达系统结构图

Fig. 6 Three-dimensional imaging laser radar system structure

方向的调整,从而实现激光二维扫描;出射激光脉冲在接触到物体表面后,产生激光回波,激光回波被激光接收模块接收,产生回波电信号,回波电信号传送到信号处理模块,回波电信号经过信号放大电路放大后分为两路,一路经过峰值保持电路传送到模数(AD)数据采集模块,另一路经过阈值甄别整形电路传送到时间差检测模块;该时间差检测模块接收到起始信号检测电路的起始信号后开始计数,在接收到阈值甄别整形电路的回波信号后终止计数,得到激光脉冲的飞行时间,上传至 FPGA 主控芯片;在 FPGA 主控芯片下次控制输出激光器触发脉冲前,AD 数据采集模块采集峰值保持电路输出的回波信号的幅值,上传至 FPGA 主控芯片;在 AD 数据采集模块采集完成后,USB 数据通信模块将频率控制字、激光脉冲飞行时间数据和回波信号幅值数据打包,上

传至上位机程序处理模块;上位机程序处理模块根据频率控制字计算激光的出射角,利用激光脉冲飞行时间计算每个像点的距离,从而反演出物体三维图像,同时对获取的三维信息进行距离映射伪彩色处理<sup>[13]</sup>,另外,根据回波信号的幅值,得到物体的灰度值。图 7 为三维成像激光雷达系统的实物图。

### 3 实验结果及讨论

为验证系统达到的性能,进行了一系列实验,主要包括室内实验和室外实验。目前实验达到的指标可综合如下:实现了分辨率为 220 pixel×220 pixel,帧频为 2 frame/s 的三维图像,以及分辨率 63 pixel×63 pixel,帧频为 25 frame/s 的三维图像。实验中最大探测距离为 500 m,最大成像范围为 5°×5°。并且根据实际应用需求,可快速改变系统的成像范围和成像分辨率。最大角度分辨率为 0.175 mrad,最大图像分辨率为 500 pixel×500 pixel,能够很好地满足实际应用需求。

#### 3.1 室内实验

实验场景:在室内 8 m 的距离处,放置小坦克模型,坦克模型如图 8 所示,坦克尺寸为 40 cm×30 cm,对小坦克进行三维测量,同时通过 AD 数据采集模块得到图像的灰度值信息。

图 8 为实验用坦克模型;图 9 为通过 AD 数据采集模块采集的灰度值显示的灰度图像,可见很难

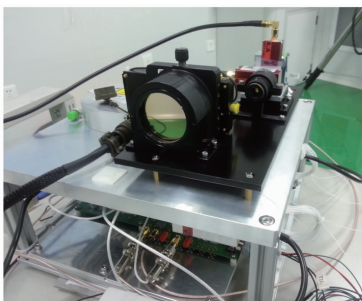


图 7 三维成像激光雷达系统实物图

Fig. 7 Three-dimensional imaging lidar system

区分坦克的轮廓,如果背景和坦克的颜色相同,仅利用灰度图像很难发现坦克目标;图 10 和图 11 分别为利用三维信息加上伪彩色处理的坦克模型的正视图和侧视图,图中,蓝色的点为距离较近的点,红色的点为距离较远的点,这样就更容易区分目标和背景。从侧视图可以看出,能够识别坦克的轮廓,这样可以利用轮廓信息,识别目标。



图 8 实验用坦克模型  
Fig. 8 Tank model

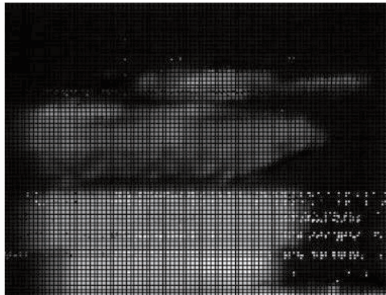


图 9 坦克模型灰度图  
Fig. 9 Tank model's grayscale

实验中,像素的分辨率为  $220 \text{ pixel} \times 220 \text{ pixel}$ ,测量的最大范围为  $5^\circ \times 5^\circ$ ,帧频为  $2 \text{ frame/s}$ ,分辨率为  $63 \text{ pixel} \times 63 \text{ pixel}$  时,帧频为  $25 \text{ frame/s}$ 。

### 3.2 室外实验

实验场景:在距离激光雷达为  $90 \text{ m}$  的位置停

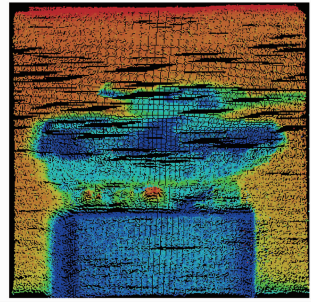


图 10 坦克三维图像正视图  
Fig. 10 Tank's three-dimensional image (front view)

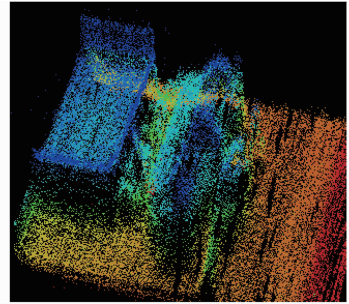


图 11 坦克三维图像侧视图  
Fig. 11 Tank's three-dimensional image (side view)

放一辆车辆,车辆的背景为一栋楼房,楼房距离雷达的距离为  $150 \text{ m}$ ,测量不同分辨率的三维图像。实验结果如下:

图 12 和图 13 为室外实验结果,从图中可以看出,能够清晰分辨汽车的轮廓,以及背景楼房的窗户轮廓,并且能够轻易得区分车辆和楼房背景。外场实验还测试了不同分辨率对实验成像结果的影响,如图 13 所示,为分辨率为  $220 \text{ pixel} \times 220 \text{ pixel}$ ,如图 14 所示,为分辨率为  $63 \text{ pixel} \times 63 \text{ pixel}$ 。可见,在较低分辨率下也能识别出车辆的轮廓和区分目标与背景。



图 12 室外实验三维图像  $30^\circ$ 角侧视图  
Fig. 12 Three-dimensional image acquired at outdoor experiment with  $30^\circ$  (side view)

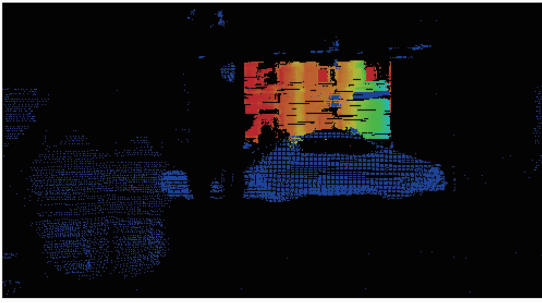


图 13 室外实验三维图像正视图  
(分辨率为 220 pixel×220 pixel)

Fig. 13 Three-dimensional image acquired at outdoor experiment (220 pixel×220 pixel)

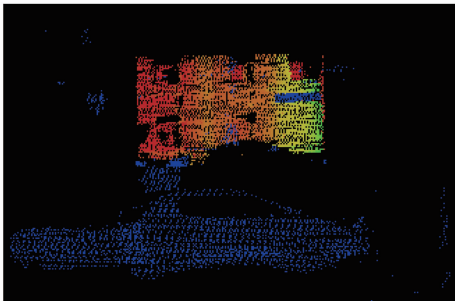


图 14 室外实验三维图像正视图  
(分辨率为 63 pixel×63 pixel)

Fig. 14 Three-dimensional image acquired at outdoor experiment (63 pixel×63 pixel)

图 15 为实验过程中最远作用距离 500 m 处测得的实验结果,图中右边蓝色物体为门形雕塑,左边为树木,从图片可以分辨出物体的轮廓。

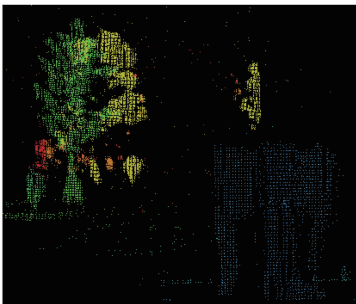


图 15 500 m 距离三维成像结果

Fig. 15 Three-dimensional image acquired at 500 m

## 4 结 论

该视频三维成像激光雷达技术,以声光二维扫描的方式代替传统的机械扫描方式,提高激光扫描的速度,减轻了系统的重量和体积,同时,声光扫描能够动态改变激光出射的角度分辨率和扫描范围。另外,采用高精度的时间差检测芯片,获得每个像点对应的距离值,形成高速高精度的三维图像。该系

统实现了分辨率为 220 pixel×220 pixel,帧频为 2 frame/s 的三维图像,以及分辨率 63 pixel×63 pixel,帧频为 25 frame/s 的三维图像,实验中的最大作用距离为 500 m,理论推算得,在 800 m 处,信噪比仍然大于 10,因此理论上,最远测量距离可达 800 m,另外可通过提高激光能量和扩大接收口径的方法,增大最大作用距离。适用于对成像速度要求高、成像范围实时可变的特殊场合。

## 参 考 文 献

- 1 Dai Yongjiang. Laser Rader Technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010. 179-652.  
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 179-652.
- 2 Li Lei, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, *et al.*. Application of three-dimensional laser imaging technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 66-70.  
李 磊, 胡以华, 赵楠翔, 等. 激光三维成像技术应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 66-70.
- 3 Roger Stettner. Compact 3D flash LIDAR video cameras and applications[C]. SPIE, 2010, 7684: 768405.
- 4 George K Knopf, Dennis Nancoo. Optical control using an acousto-optic scanner[C]. SPIE, 2003, 5264: 170-178.
- 5 Sajjad A Khan, Nabeel A Riza. Demonstration of 3-dimensional wide angle laser beam scanner using liquid crystals[J]. Opt Express, 2004, 12(5): 868-882.
- 6 Thilo Sandner, Michael Wildenhain, Christian Gerwig, *et al.*. Large aperture MEMS scanner module for 3D distance measurement[C]. SPIE, 2010, 7594: 75940D.
- 7 Zhang Yong, Cao Xibin, Wu Long, *et al.*. Experimental research on small scale risley prism scanning [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0814001.  
张 勇, 曹喜滨, 吴 龙, 等. 小面块扫描激光成像系统实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0814001.
- 8 Liu Changwen, Wang Shikang, Liu Jie, *et al.*. Investigation of acousto-optic scanning laser anemometry[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(11): 1003-1007.  
刘昌文, 王仕康, 刘 杰, 等. 声光扫描激光测速研究[J]. 中国激光, 1997, 24(11): 1003-1007.
- 9 Jierney J, Radar C M, Gold B. A digital frequency synthesizer [J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1971, 19(1): 48-57.
- 10 Wang Haixian, Ye Ai. The influence of the coefficient of atmospheric attenuation to the capability of laser ranging [J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(6): 116-119.  
王海先, 叶 艾. 大气衰减系数对激光测距能力影响的研究[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(6): 116-119.
- 11 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi, *et al.*. Study on airborne scanning lidar [J]. Chinese J Lasers, 2009, 29(9): 2584-2589.  
王建宇, 洪光烈, 卜弘毅, 等. 记载扫描激光雷达的研制[J]. 中国激光, 2009, 29(9): 2584-2589.
- 12 Ishizu Mitsuo. Airborne/spaceborne laser altimeter[J]. Journal of the Communications Research Laboratory, 2002, 49(2): 89-107.
- 13 Liu Chanlao, Tan Lixun, Li Chunyan, *et al.*. Pseudo-color coding and processing for infrared images[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 419-422.  
刘缠牢, 谭立勋, 李春燕, 等. 红外图像伪彩色编码和处理[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 419-422.

栏目编辑:何卓铭