文章编号:1001-5078(2015)09-1023-05

· 激光应用技术 ·

微镜阵列激光成像技术及其性能分析

邓正芳1,苏金善1,2,杨兴雨1,张冬冬3

- (1. 伊犁师范学院电子与信息工程学院,新疆 伊宁 835000;
 - 2. 南京大学电子科学与工程学院,江苏 南京 210046;
- 3. 江苏省邮电规划设计院有限责任公司,江苏 南京 210000)

摘 要:提出了一种激光三维成像技术,该方法以推扫方式工作,采用数字微镜器件(Digital Mirror Device,DMD)来进行激光回波脉冲飞行时间(Time of Flight,TOF)的空间转换。由于目标上不同距离点回波脉冲的飞行时间不同,当脉冲到达时微透镜阵列将从一个状态转换到另一个状态,在接收端传感器焦平面上显示不同相对位置的条纹,利用条纹相对距离可以重建目标的剖面轮廓距离像。相比于其他三维成像技术,该技术具有成像速率高、探测视场角大、结构简单、体积小易于集成化等优点。

关键词:激光三维成像技术;微镜阵列器件;飞行时间;回波脉冲

中图分类号: TN249 文献标识码: A DOI: 10.3969/j. issn. 1001-5078. 2015. 09.003

Laser imaging based on digital micromirror device and its performance analysis

DENG Zheng-fang¹, SU Jin-shan^{1,2}, YANG Xing-yu¹, ZHANG Dong-dong³

(1. College of Electronic and Information, Yili Normal University, Yining, 835000, China;

- 2. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China;
 - 3. JiangSu Post and Telecom Planning and Designing Institute, Nanjing 210046, China)

Abstract: A novel 3D laser imaging technique which works at push broom mode is proposed. The digital micromirror device(DMD) is used to complete the spatial transformation of laser echo's time of flight(TOF). Because the flight time of echo pulse changes with the distance of the targets, the micro mirrors transform from a status to another when pulses arrive at the DMD, and the focal plane array(FPA) of the receiver sensors shows the different relative position streaks. The section range profile of the target was rebuilt by the relative distances of streaks. Comparing with the other 3D imaging technologies, this technology has the advantages of high imaging rate, large field of view, simple structure and small volume etc.

Key words: 3D laser imaging technique; digital mirror device; time of flight; echo pulse

1 引 言

随着激光技术与电子通信技术的逐渐成熟,激光

三维成像技术已经取得了长足的发展,并逐步成为测量与遥感的主流技术之一。激光三维成像技术采用

基金项目:新疆高校科研计划科学研究重点项目(No. XJEDU2011I49);伊犁师范学院重点项目(No. 2011YNZD011)资助。作者简介:邓正芳(1987 –),男,硕士研究生,主要研究方向为激光雷达三维成像及其控制电路设计研究。E-mail: moke8 @ 163. com

通讯作者:苏金善(1968 -),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理,信号增强,三维视频处理。E-mail: sqsjs1968@ aliyun. com

主动发射激光照射目标的方式,利用光电探测器接收目标反射的回波信号,提取包括高程信息在内的目标三维信息,并对目标进行三维图像的重建^[1]。是目前唯一能够同时直接获取目标四维图像(三维几何像加一维强度像)的技术^[2],具有很高的军事和民用应用价值。但是,传统的激光成像技术采用扫描体制,通过二维扫描(行扫+帧扫)获取图像,致使其成像帧频较低,目前所报道的最高指标为20 Hz,成像视场角一般小于1°;另外,由于扫描器的应用,不仅增大了系统的体积,还降低了系统的可靠性和工作稳定性^[3]。这些缺点限制了扫描体制激光成像技术的应用,近年来国际上一直在探索实现非扫描闪烁式激光成像技术,即发射一个激光脉冲覆盖整个目标视场,一次获取整幅图像,它具有成像帧频高,探测视场角大等优点,是一种非常高效的成像手段。

本文提出了一种新颖的激光三维成像技术,该 方法以推扫方式工作,采用微镜阵列器件(Digital Mirror Device, DMD)进行激光回波脉冲飞行时间 (Time of Flight, TOF)的空间转换,在传感器焦平面 上会形成对应于目标相对位置的条纹。利用条纹相 对距离重建目标的剖面轮廓距离像。本文将重点阐 述微镜阵列器件激光三维成像技术的工作原理,分 析核心器件的技术指标,计算激光三维成像技术的 探测距离,从理论上论证该技术的可行性。

2 基于 DMD 的三维成像理论

DMD 是一种 微机 电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 器件, 它的微机械结构是可扭动的轴式微型反射镜阵列。该阵列由数十万个方形 (13 μm×13 μm) 可翻转的反射镜所组成^[4]。每个微反射镜对应一个像素, 每个镜面就相当于一个数字式光开关。镜面悬挂于镜面对角线顶点处的细扭转轴上并固定在两个支柱上, 用微电容极板的静电力进行驱动, 其稳定位置为 +12°和 -12°。

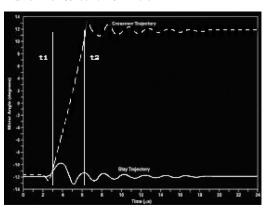


图 1 微镜的两状态间转换时的轨迹

图 1 给出了微镜在 + 12°和 - 12°两个状态间转换时的轨迹,实线代表了微镜切换到同一状态时的轨迹,而虚线则代表了微镜切换到另外一个状态的轨迹,而虚线则代表了微镜切换到另外一个状态的轨迹^[5]。从图中红色曲线可以发现微镜在状态转换的过程中会有约 3 μs 的过渡时间,这个过渡时间可以看作微镜偏转的角度随时间线性变化的过程。利用这段曲线可将光束的偏转角度和时间线性的映射起来。

图 2 给出了利用 DMD 进行飞行时间的空间转换方法。图中以一维空间上三个具有不同时间延迟的激光窄脉冲为例来说明,并假设这三个脉冲在图 1 中的 $t_1 \sim t_2$ ($t_2 - t_1 < 3$ μ s)时间范围内到达 DMD。通过控制电路驱动 DMD 使得微镜在 t_1 时刻到来前开始偏转,并在 t_2 时刻到达后停止偏转,由于三个脉冲达到 DMD 的时刻不同,则反射光线分别以不同的反射角照射到屏幕上,在屏幕上时间轴的不同位置留下三个光斑。因此,可以通过计算屏幕上光斑的空间距离来得到脉冲到达 DMD 的时间差。这个时间差在激光三维成像应用中则代表了目标的高程差。

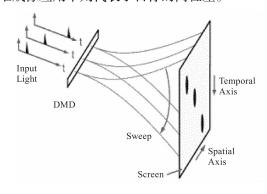


图 2 飞行时间的空间转换

图 3 为微镜阵列激光三维成像系统的光学结构图,其工作过程包括,激光器发射 532 nm 的窄脉冲经扩束准直装置提高光束质量,再经过柱透镜将光束展开成扇形光束照射目标。

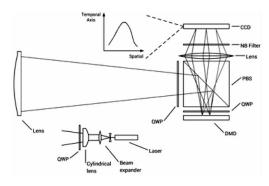


图 3 微镜阵列激光三维成像系统光学结构

本系统采用的是镀膜滤光片,其峰值插入损耗 要求 T < 0.3 dB,对应的滤光片的中心波长的透射 比为93%。经目标反射的激光回波脉冲被成像物 镜接收,通过 DMD 反射最终聚焦在 CCD 的表面。 由于采用的激光是偏振光,而Nd:YAG 晶体在氚灯 的光泵下发射自然光,通过偏振棱镜后,变成沿X方向的线偏振光,因此可以通过调节四分之一波片 使之与激光偏振方向成 45°角,以确保照射目标的 光束准变为圆偏振光。在接收端,调节四分之一波 片使圆偏振光重新转变为线偏振光,且偏振方向与 偏振分光棱镜(PBS)的 S 偏光偏振方向相同。被 DMD 反射的光束两次经过四分之一波片后,S 偏光 转变成 P 偏光直接透射通过 PBS 并聚焦在 CCD 感 光面。回波脉冲被 DMD 偏转后在 CCD 上所成的每 一帧图像都是目标的剖面轮廓距离像,多幅距离像 便组成了目标的三维像,其效果如图 4 所示。

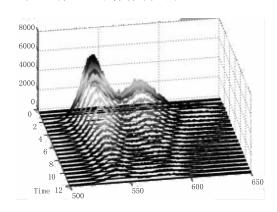


图 4 激光推扫三维成像距离像

3 系统性能分析

本文提出的微镜阵列激光三维成像技术相比于 其他三维成像技术具有成像速率高、探测视场角大、 结构简单、体积小易于集成化等优点。鉴于此,系统 对各单元器件有其特殊的要求,本节将介绍关键器 件的要求并对重要性能指标进行分析。

3.1 激光器的要求

采用Nd:YAG 二倍频 532 nm 激光器作为光源,其主要基于如下几点考虑:

- (1)提供足够高的脉冲峰值功率。激光脉冲的 峰值功率是决定系统探测距离的主要因素, Nd:YAG激光器能够实现高功率输出。
- (2)保证系统的工作稳定性和可靠性。相对于 气体激光器,固体激光器在工作稳定性方面具有优势,且能够长时间高重频可靠工作,有利于提高成像

系统的帧频。

(3)对应传感器高量子效率波段。激光器波长的选择直接关系到传感器量子效率的高低,选择传感器量子效率高的激光波长对于提高探测距离和信噪比有重要意义。图 5 给出了典型的 CCD 量子效率曲线(Quantum Efficiency Curve),从图中可以发现 532 nm 处在曲线的峰值附近,因此 CCD 工作在 这个波长具有较高的量子效率。

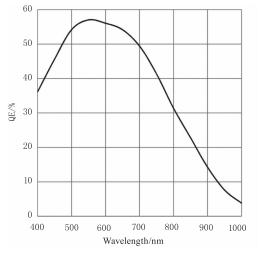


图 5 典型 CCD 量子效率曲线

3.2 DMD 模块的要求

DMD 是整个系统的核心部件,用在激光三维成像中的 DMD 也有其特殊的技术要求。其单屏物理分辨率为 1024×768 ,器件的机械翻转时间小于 $15 \mu s$,在 $3 \sim 5 \mu s$ 光切换瞬间, DMD 从 -10° 偏转到 $+10^\circ$,视场角可达到 $-20^\circ \sim +20^\circ$ 。

通常,DMD 用在 DLP(Digital Light Processing) 技术中进行数字光处理,即先把影像信号进行数字处理,然后再把光投影出来。为了能够显示灰度图像,DLP采用脉冲宽度调制方式来控制 DMD 微镜的状态^[6]。然而,这种工作方式并不适合激光三维成像应用,因为在本系统中 DMD 被用作反射式光扫描器,即在外部触发信号的触发下,DMD 中的所有微镜同步地从一个状态偏转到另外一个状态。所以用于控制 DMD 的图像为全"1"和全"0"的二值图像。在激光雷达应用中有个重要的技术参数——距离门宽度,图 2 中,微镜轨迹线性区域的起始时刻 t₁ 要与距离门打开时刻精确对应,因此,对 DMD 的状态控制要求具有很高的时间精确度。根据以上考虑,选用带有高速外触发二进制全屏调制的 DMD 驱动电路较为合适。

另外,DMD 器件是一个真空密封器件,所以所选的 DMD 窗口材料对应着不同的传输波段。DMD 器件提供了两种类型的传输窗口,紫外波段(320~400 nm)和可见光波段(400~700 nm),其透射率曲线如图 6 所示。由于我们选用的激光波长为 532 nm,所以较为合适的选择是可见光波段的窗口。

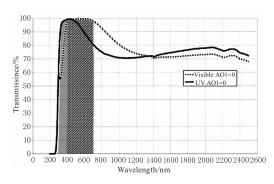


图 6 DMD 传输窗口曲线

3.3 探测距离计算与分析

激光成像雷达理论分析的核心是激光雷达方程,经典的激光雷达方程如下:

$$P_R = \frac{P_T \rho A_T A_C T_A^2}{P^2 Q_T R^2 \Omega_R}$$

式中, P_R 为接收功率; P_T 为发射功率;R 为目标与发射机的距离; Q_T 为发射波束的立体角; ρ 为目标反射率; A_T 为目标面积; A_C 为接收有效孔径面积; Ω_R 为目标散射波束立体角; T_A 为单向传播大气透射率。

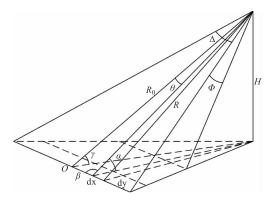


图 7 激光雷达大视场模型

经典的激光雷达方程只适用于一次成像目标很小,目标后向散射相等的情况,即假定回波信号是在2π立体角内均匀分布,这一假设只适用于成像视场角较小时以及单探测器扫描体制的激光雷达^[7]。非扫描体制激光成像雷达工作在大视场条件,目标

视场的回波信号不是均匀分布的,而是遵循朗伯余弦定律。因此,需要对激光雷达方程进行修正,建立非扫描激光成像雷达方程的数学模型。如图 7 所示,扇面激光光束的横向发散角为 Δ ,切向发散角为 ϕ ,扇面与地面的夹角为 γ ,目标的距离为 R_0 ,采用微积分的方法可建立大视场情况下的激光雷达方程,修正结果如下^[8]:

$$P_{R} = \frac{2P_{T}R_{0}^{3}\rho A_{c}T_{S}^{2}\sin^{2}\gamma}{\Delta \emptyset} \times \int_{0}^{R_{0}\emptyset} \int_{0}^{R_{0}tan\frac{\Delta}{2}} \frac{\exp(-2CR)}{R^{3}R_{xy}^{4}} dxdy$$

在该方程的数值求解中,大气传输衰减系数的计算较为复杂,利用 LIDARPC 程序对不同波长在不同能见度天气条件下进行计算,然后以脉冲能量50 mJ、脉冲宽度10 ns的激光参数计算探测距离,图 8 为结果曲线。由计算结果可以看出,在532 nm波段,能见度为4 km的天气状况条件下,系统的探测距离可达1500 m以上。

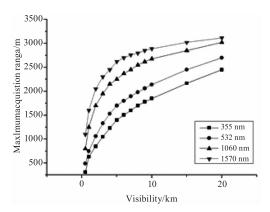


图 8 不同天气条件下各激光器的最大探测距离

4 结 论

本文提出了一种新颖的基于数字微镜器件的非扫描激光三维成像技术,该技术具有成像速率高,探测视场角大,结构简单,体积小易于集成化等优点。通过理论分析,微镜阵列三维成像技术在正常能见度状况下能够实现1500 m以上的探测距离,因此可以满足大部分的激光三维成像应用。

参考文献:

[1] WANG Haopeng, LIU Zeqian. 3 – D laser imaging technology and applications [J]. Electronic Design Engineering, 2012, 12(20):160 – 163. (in Chinese)

王昊鹏,刘泽乾. 激光三维成像技术及其主要应用

- [J]. 电子设计工程,2012,12(20):160-163.
- [2] GONG Junbin, SU Jianzhong, XU Hongbo. Hardware design of new type image matching machine for imaging laser radar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005. 5 (34):612-616. (in Chinese) 龚俊斌,苏建忠,徐洪波. 新型激光成像雷达土相匹配处理机的设计与实现[J]. 红外与激光工程. 2005. 5 (34):612-616.
- [3] ZHAO Hongli, FAN Youcheng. Review about 3D laser radar system based on Geiger mode APD array[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10):1083 1088. (in Chinese) 赵洪利, 范有臣. 基于盖革模式 APD 阵列的非扫描激光三维成像雷达研究综述[J]. 激光与红外, 2013, 43(10):1083 1088.
- [4] DA Geng, HE Yongqiang, TANG Deshuai. Experiment analysis on infrared scene simulator system based on DMD[J].
 Laser & Infrared, 2014, 44(10):1105-1109. (in Chinese)

- 耿达,何永强,唐德帅. 基于 DMD 的红外场景仿真系统实验分析 [J]. 激光与红外,2014,44(10):1105-1109.
- [5] G Chen, J Jia. Study on the mechano-optical properties of digital micromirror device [J]. Journal of Applied Optics, 2001,22(2):14-19.
- [6] D Dudley, W Duncan, J Slaughter. Emerging Digital Micromirror Device (DMD) applications [C]. Proc. SPIE 4985,2003,1:25.
- [7] LI Sining, LIU Jinbo. Investigation of ultraviolet laser imaging using streak tube [J]. Infrared and Laser Engineering. 2007. 6(36):827-829. (in Chinese) 李思宁,刘金波. 条纹管紫外激光成像技术方案及性能分析[J]. 红外与激光工程,2007,6(36):827-829.
- [8] LIU Jinbo, LI Sining. Lidar equation modification for large field of view scannerless lidar [J]. Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, 2006, 6(29):73-75.