

文章编号:1001-5078(2007)01-0022-04

主动式光学三维成像技术概述

蔡喜平¹, 李惠民², 刘剑波¹, 高劭宏¹

(1. 黑龙江大学物理科学与技术学院; 2. 黑龙江大学图书馆, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 简要介绍了三维成像的基本概念, 综述了常用的主动式光学三维成像技术的基本原理, 包括基于几何法的三维几何法成像及基于时间测量的三维成像激光雷达: 连续波法(位相法和 FMCW 法)及脉冲法。简单讨论了各种成像方法的优缺点及应用范围, 并简要介绍了各种技术的应用。

关键词: 三维成像; 激光测距; 激光雷达

中图分类号: TN958.98; P225.2 **文献标识码:** A

Overview of Active Optical Three-dimensional Imaging Technology

CAI Xi-ping¹, LI Hui-min², LIU Jian-bo¹, GAO Shao-hong¹

(1. School of Physical Science and Technology; 2. Library of Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Basic concept of three-dimensional imaging is introduced briefly. The basic principles of usual active optical three dimensional imaging techniques including geometrical based geometrical three dimensional imaging and time of flight based three dimensional imaging laser radar (phase-shift, frequency modulated continuous wave and pulsed) are overviewed. Basic limitations, advantages and adequate application fields for each technique are discussed in brief. Selected examples of applications are also briefly presented.

Key words: three dimensional imaging; laser ranging; laser radar

1 引言

三维成像是利用距离传感器获取目标表面的距离图像, 实现对目标表面几何形状的测量, 距离图像的每个像素对应的是目标表面的三维坐标。三维图像是根据目标表面所反射回的光辐射强度的大小来确定目标表面相对于成像系统的空间位置, 能够反映目标的层次信息。传统的二维图像通常被称为强度图像。它所获取的目标特征信息在很多领域发挥着重要作用, 如在机器人视觉、计算机视觉、自动导航等。由于缺少精确的距离及其他一些主要信息, 基于强度图像的成像方法所作出的决策是不准确的^[1]。和强度图像相比, 三维图像可以直接提供更丰富的信息如距离、方位、大小和姿态等, 大大改进了对目标识别和分类的性能, 因而应用会更加广泛。

根据工作波长, 可分为超声波、微波、毫米波和光波等三维成像。三维成像的核心问题是如何获取

距离信息。在距离信息的基础上形成角度-角度-距离图像, 即获取目标表面上各点的 (x, y, z) 坐标。

主动式光学三维成像技术一般包括: 基于几何法测距的成像技术; 基于干涉法测距的成像技术, 包括相移法和调频连续波法(FMCW); 基于脉冲测距的成像技术。本文将主要介绍这三种成像技术的基本原理, 并探讨各种方法的优缺点及其合适的应用领域。

2 三维几何法成像

几何法测距是利用发射光线、反射光线分别与光源及探测器连线所形成的三角几何关系测量目标的三维坐标, 因此几何法通常又称为三角法。为了

作者简介: 蔡喜平(1967-), 男, 教授, 博士, 1991年毕业于哈尔滨工业大学物理系(本科), 1996年于哈尔滨工业大学获理学博士学位, 1998年在韩国水原大学物理系, 博士后, 2003—2004年在德国慕尼黑工业大学物理系, 博士后, 主要研究方向为光电技术。E-mail: xpcai@hit.edu.cn.

收稿日期: 2006-05-24

有效提高图像的空间分辨率,应该采用激光光源,实现衍射限探测,使投射至目标表面的光斑尽可能小。由高斯光波传播规律:

$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

可知,从图像的空间分辨率考虑,这种方法更适合于在近距离和短波长应用。

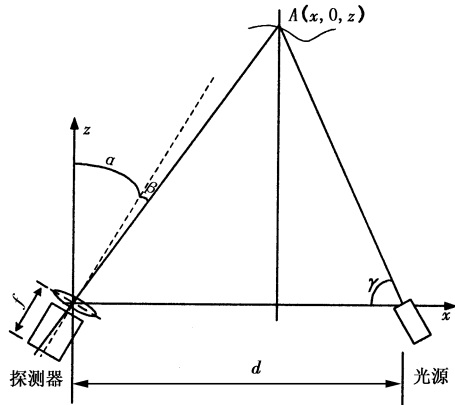


图1 几何法测距原理图

从图1中光源与探测器、测量点之间的三角几何关系可以确定点A的坐标^[2]:

$$x = \frac{d \tan(\alpha + \beta)}{\cot \gamma + \tan(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

$$z = \frac{d}{\cot \gamma + \tan(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

图1中 d, α, γ, f 都是已知量, β 可以通过测量像点的坐标计算得到。实际测量时要选择适当的 α, γ 的值,否则测量结果误差非常大。

要获取目标表面的三维图像,可逐点扫描获取目标表面的空间坐标,还可采用结构光获取目标表面的空间坐标^[3]。图2表示了一种采用结构光的三维成像技术^[4]。结构光法可以大大提高成像速率。

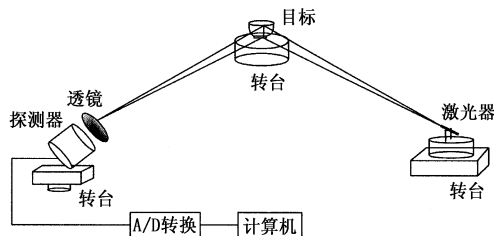


图2 采用结构光的几何法三维成像

几何法测距可选用 CCD 或 PSD(位置敏感探测器)作为探测器。利用 CCD 作为探测器,需要将所获得的从目标表面反射回的光斑进行图像处理,以确定光斑的中心位置,并给出该中心位置在探测器光敏面上的坐标。PSD 是一种更为新型的探测器,专门用于高精度测量光斑在探测器光敏面的位置,它

所响应的是光斑的“质心”,与光斑大小、光斑形状没有关系,无须进行针对于光斑的图像分析和处理,可直接获得光斑在探测器光敏面的坐标。日本滨松公司已经研制了 128 元的一维 PSD 列阵,特别适合于三维形状的测量,即近距离的三维成像^[5]。

几何法成像技术适用于近距离(一般为 0.2 ~ 2m)应用,如机器视觉、反求工程等,距离分辨率很高。几何法是三维成像中较常用的一种方法,成本低,对光源要求也不高,缺点是作用距离太近,景深不够大等。

3 三维成像激光雷达

激光雷达是指载波为激光的雷达,英文通常缩写为 LADAR(Laser Radar)及 LIDAR(Light Radar),成像激光雷达一般是指 LADAR,而非 LIDAR。激光雷达根据载波形式可分为连续波激光雷达和脉冲激光雷达。

3.1 连续波三维成像激光雷达

这种方法可分为两种:相移法和 FMCW(调频连续波)法。相移法是通过测量发射光波与回波之间的位相移动(位相差)来确定对应的距离信息;而 FMCW 也是通过测量发射光波和回波间的位相差确定距离信息,所不同的是,这种方法的光源是经过线性调频的连续波。

3.1.1 相移法

相移法测距的光源是强度调制的激光,通过测量发射光波与散射回波之间的位相差来确定距离。测距原理如图3所示。

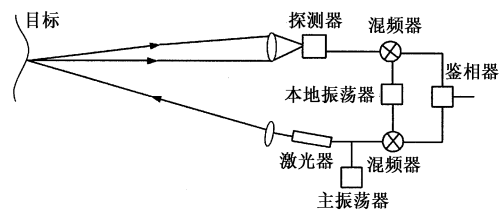


图3 位相法测距原理图

激光光源发射调制频率为 f_T 的正弦波,通过大气中的传播和目标的反射后,信号波相对于发射波产生了一个 $\Delta\varphi$ 的延迟:

$$\Delta\varphi = 2\pi f_T \Delta t = \frac{4\pi f_T R}{c} \quad (4)$$

通过测量 $\Delta\varphi$ 即可获得距离 R :

$$R = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi f_T} \quad (5)$$

为了便于信号处理、提高信噪比,一般采用外差探测技术,即利用一个固定频率 f_{L0} 的本地振荡波与信号波混频,处理窄带宽的中频信号。对应的中频

频率为:

$$f_{IF} = |f_{LO} - f_T| \quad (6)$$

相移法一般用于中、短距离成像,光源一般采用半导体激光器,由于半导体激光器的调制频率可以达到 GHz,因而这种方法有很高的距离分辨率,在 1~30m 的范围内,对非合作目标,距离分辨率可达毫米量级;对合作目标(如角立方反射器),高频调制时,分辨率优于 $50\mu\text{m}$ ^[1,6]。

基于相移法的三维成像技术可采用扫描成像的方法,也可采用非扫描成像方法^[7-8]。相移法三维成像在制造业、机器人视觉和材料处理领域有广泛的应用。

3.1.2 FMCW 法

FMCW 法是一种光外差探测技术,发射光波为线性调频连续波,调制频率范围为 Δf ,调制周期为 T , τ 为回波与发射光波之间的时间延迟, $\tau = \frac{2R}{c}$ 。图 4 中的 f_{IF} 是回波信号与本地振荡混频后的中频信号频率。根据图中的几何关系,可以得到:

$$f_{IF} = \frac{\Delta f}{T} \tau = \frac{2R\Delta f}{cT} \quad (7)$$

即

$$R = \frac{cTf_{IF}}{2\Delta f} \quad (8)$$

因此通过测量中频信号频率 f_{IF} 即可以获得距离信息。

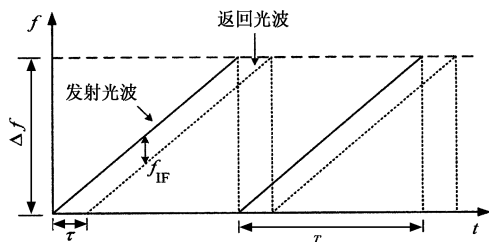


图 4 FMCW 测距原理图

光外差探测技术是一种高灵敏度的探测技术,是实现远距离、微弱信号探测的最佳方法,因此在早期的激光雷达方案中,基本都是采用该技术。光外差探测对空间准直要求十分苛刻,因而短波长实现起来难度较大。另外,光外差探测对光波空间模式、单色性、频率稳定性都有十分严格的要求,因而对光源性能要求非常高。

一般情况下,可以采用图 5 所示的收发合置的零差探测方法,以降低对光源频率稳定性等的要求^[9]。

采用相干探测技术的 FMCW - CO₂ 激光雷达成像系统在 20 世纪七八十年代得到了飞速发展及广

泛应用,所研究的 CO₂ 成像激光雷达主要用于飞航导弹的末制导、地形和障碍物回避、前视成像等军事及航天应用,这种成像方法基本上都是基于扫描成像体制。

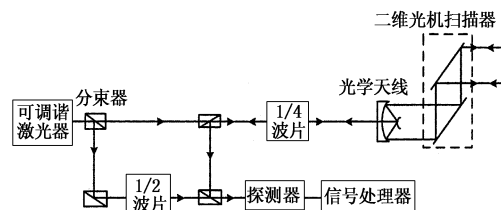


图 5 零差探测的线性调频成像系统

随着半导体激光器技术的发展,也可采用半导体激光器实现 FMCW 探测。半导体激光器具有非常大的调制带宽,调制方法也比较容易,使得半导体 FMCW 成像系统在民事方面更具有应用前景。但是由于半导体激光器频率调制响应的非均匀性,使得在外加线性驱动电流时,却很难得到线性调频信号,需要采用更为复杂的方法来消除这种频率响应非线性的影响^[7]。这些成像可采用扫描体制,也可采用非扫描的方法^[10]。

采用外差或自差探测的成像技术测距精度非常高,可达到几个微米。缺点是成像速率慢,结构比较复杂,实现起来难度较大,对光源的性能、系统的抗震性能等要求都很高。

这种方法除了在军事领域有广泛应用外,在汽车的障碍物回避、机器人视觉、制造业等民用领域也有广泛应用。

3.2 脉冲三维成像激光雷达

采用脉冲法测距原理非常简单,即测量发射脉冲和返回脉冲的时间间隔 τ ,然后可得距离 $R = \frac{c\tau}{2}$ 。

距离分辨率的大小取决于发射脉冲的宽度,对 3ns 的激光脉冲宽度,理想的距离分辨率为 0.45m。从距离分辨率来看,这种方法比较适用于远距离应用,如数千千米至数万千米。

脉冲激光雷达采用直接探测方式,与外差探测方法相比,实现起来相对容易些。但是直接探测技术并不是一种高灵敏度的探测技术,需要非常大功率的激光器,在价格、体积等方面并不占有优势。另外,直接探测方法需要高速信号处理电路,实现对微弱的窄脉冲回波信号的处理。

传统的直接探测式三维成像激光雷达都是采用扫描成像方式,探测器选择高灵敏度的 APD,需要实现二维扫描的光机扫描系统,要求高重复频率的激光器(多采用二极管泵浦固体激光器)^[11]。但是

这种激光器的功率随着重复频率的增加会大幅度降低,脉冲宽度也会显著增加,因而会大大影响作用距离及距离分辨率,如以相干公司的 Prisma DPSSL-1064-16-V 二极管泵浦 Nd:YVO₄ 固体激光器,重复频率为 30kHz 时,峰值功率为 30kW,脉冲宽度为 14ns,而当脉冲重复频率为 80kHz 时,峰值功率降到了约 15kW,脉冲宽度增加到了约 20ns,使得理想距离分辨率从 2.1m 降至 3m。如果获取像素数为 32×32,成像速率为 30 帧/s,则要求脉冲重复频率为 30.72kHz,要获取更多的图像像素数,只能降低成像速率。此方法的缺点是体积大,结构复杂,成像速率慢,不适合于在高成像速率需求的领域应用,信噪比较低。

采用非扫描方法的三维成像激光雷达是新型的成像激光雷达技术。探测器可采用阵列 APD、ICCD 或 PIN 阵列等^[12-14]。阵列 APD 可达到 32×32 元,ICCD 可以达到 752×582 元,PIN 阵列因为没有倍增效应,所以灵敏度不如 APD 和 ICCD。非扫描成像对激光器的重复频率要求不高,如果要达到 30 帧/s 的成像速率,只需要激光器的重复频率为 30Hz,此时采用半导体泵浦固体激光器可实现脉冲积累探测,如果设定激光器重复频率为 30kHz 时,每帧图像可有 1000 次脉冲积累,按照简单的运算,此时信噪比大约可提高 $\sqrt{1000} \approx 32$ 倍。

脉冲激光成像雷达在军事领域有非常广泛的应用,非常适合于远距离应用。在近距离应用就要求激光脉冲宽度非常窄,对信号处理电路速度要求更高,实现起来难度非常大。先进技术如林肯实验室最新研究的高分辨率脉冲激光成像雷达,将脉冲测距成像技术应用到了近距离范围,获得了很高的距离分辨率:采用倍频被动 Q 开关 Nd:YAG 激光器(200ps 脉冲宽度)和 ICCD 探测器,实现了 1mm(作用距离 10m)和 1cm(作用距离 100m)的测距精度^[13]。毫无疑问,这种技术会有非常广阔的应用前景,但由于成本太高,不太适合在民事领域应用。

4 结束语

光学三维成像有很多种,本文只是介绍了几种常用主动式光学三维成像技术,还有一些技术如莫尔条纹法,实际使用时受限制因素太多,文献[3]中作了比较详细的介绍。在本文所介绍的技术中,很难说哪种技术是最优的,应用时要根据具体需求来选择成像技术。如近距离一般选择三角法,距离分辨率很高,成本很低;稍远距离,采用三角法就不合适,此时距离分辨率非常差,应该选取干涉方法;而

在更远距离,通常选取脉冲测距方法。脉冲测距的成像方法中,也要根据作用距离、成像速率、距离分辨率、像素数、成像视场及成本等的具体要求来考虑是采用扫描还是非扫描方法。可以肯定地说,三维成像技术会逐渐在国民经济中发挥越来越大的作用。

参考文献:

- [1] G J Dixon. Laser Radar Produce three dimensional pictures[J]. Laser Focus World, 1998, 34(8): 137-146.
- [2] Guy Godin, J Angelo Beraldin, John Taylor, et al. Active Optical 3D Imaging for Heritage Applications[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 9: 24-36.
- [3] 周海波,任秋实,李万荣. 主动式光学三维成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(10): 2-4.
- [4] Kozo Ohtani, Mitsuru Baba, A Rangefinding Approach by Detecting the Position and the Incident Angle of a Light-stripe[A]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Anchorage, AK, USA 2002, 21-23, 1577-1582.
- [5] http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/s5681_kpsd1012e02.pdf
- [6] Markus-Christian Amann, Thierry Bosch, Risto Myllylae, et al. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement[J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 10-19.
- [7] Ernesto Garcia, Horacia Lamela. Lost-cost three-dimensional vision system based on a low-power semiconductor laser rangefinder and a single scanning mirror[J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 61-66.
- [8] Phil Garcia, John Anthes. Characterization of a Scannerless LADAR System[A]. Proceedings of SPIE, 1993, 1936: 23-30.
- [9] 蔡喜平. 多光电传感器测距、测角、测速系统的研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 1996.
- [10] Brain F Aull, Richard M Marino. Three-dimensional imaging with arrays of Geiger-mode avalanche photodiodes[A]. Proceedings of SPIE, 2005, 6014: 98-109.
- [11] 张远志, 胡广洋, 刘玉彤, 等. 基于工程应用的三维激光扫描系统[J]. 测绘通报, 2002, (1): 34-36.
- [12] Barry L Stann, Keith Aliberti, Dan Carothers, et al. A 32×32 pixel focal plane array lidar system using chirped amplitude modulation[A]. Proceedings of SPIE, 2004, 5412: 264-272.
- [13] Jens Busck, Henning Heiselberg. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar[J]. Applied Optics, 2004, 43(24): 4705-4710.
- [14] Roger Stettner, Howard Bailey, Richard Richmond. Eye-safe laser radar 3-D imaging[A]. Proceedings of SPIE, 2004, 5412: 111-116.