

基于 TOF 计算成像的三维信息获取与误差分析

卢纯青, 宋玉志, 武延鹏, 杨孟飞

(中国空间技术研究院, 北京 100081)

摘要: TOF 三维成像技术具有帧内并行主动探测、获取景物信息的实时性好、环境光影响小、测量精度高、抗运动干扰性强、平均功耗低等优势, 在三维智能感知、工业检测、SLAM 等领域有着广泛的应用前景, 特别是在自主导航、驾驶控制与智能系统中作为获取实时三维成像信息的传感器得到了迅速发展。研究了两类 TOF 成像的原理及特点, 论述了其系统组成, 并将 TOF 成像原理与其他主流三维成像技术进行了对比, 对其主要误差来源和类型进行了归类和分析, 研究了测量误差模型。TOF 成像作为新一代三维成像技术仍处于发展阶段, 可以有效提升智能系统的成像感知能力和测量水平, 推动了相关领域的技术进步。

关键词: TOF; 三维场景; 幅度调制; 相位检测; 误差类型

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1041004

3D information acquisition and error analysis based on TOF computational imaging

Lu Chunqing, Song Yuzhi, Wu Yanpeng, Yang Mengfei

(China Academy of Space Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Time of flight(TOF) three-dimensional imaging technology has the advantages of active parallel detection in the frame, good real-time acquisition of scene information, small influence of ambient light, high accuracy of detection data, strong anti-sport interference and low average power consumption. In three-dimensional intelligent sensing, industrial inspection, SLAM and other fields have a wide range of applications, especially in autonomous navigation, driving control and intelligent systems as a real-time three-dimensional imaging information of the sensor has been rapidly developed. The principle and characteristics of two kinds of TOF imaging were studied. Two types of TOF imaging principle and characteristics, system composition were discussed. TOF imaging system was compared with other mainstream three-dimensional imaging technology. Its main source of error and type was classified and analyzed, its error model was studied. As a new generation of three-dimensional imaging technology, TOF is still in the development stage, which can effectively enhance the imaging perception and measurement level of the intelligent system and promote the technological progress in related fields.

Key words: time of flight; 3D scene; amplitude modulation; phase detection; error type

收稿日期: 2018-05-10; 修订日期: 2018-06-18

作者简介: 卢纯青(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要从事空间成像感知、智能导航与控制技术方面的研究。Email: cust0702@sina.com

0 引言

基于光子飞行时间 (Time-of-Flight, TOF) 测量原理的三维场景感知技术是通过测量主动/反射光程传输时间计算场景深度信息, 从而获取场景三维结构的分布数据。TOF 成像使基于 CMOS 工艺的光电探测技术从获取二维图像信息发展到同时获取二维和三维信息的并行主动式景物深度信息构建的成像技术, 实现了由实时并行二维被动式景象探测到实时并行三维主动式探测的技术跨越。TOF 成像感知技术的研究从 20 世纪 90 年代初开始, 伴随着半导体技术、基于 CMOS 工艺的光电探测技术、超大规模超高速集成信息处理电路和三维场景重建算法的不断优化而逐步发展^[1], 使该项技术成为三维智能成像感知的主流技术之一 (多目视觉、结构光、TOF), 得到了工程应用领域的青睐。TOF 成像技术以其三维信息构建的信息量丰富、并行实时性好、功耗低、系统体积小等优点, 在场景感知、实时定位与地图构建 (SLAM)、景物辨识与分类、虚拟现实、自动驾驶、工业在线检测等多个领域发挥重要的作用^[2-3]。

1 TOF 成像原理

TOF 成像原理是根据测量光在空间中传播的时间信息, 计算探测器像元到场景的深度信息。TOF 成像系统硬件主要由 LED 照明光源和基于 CMOS 工艺的 TOF 阵列探测器两个部分组成。光源为波长在 $850 \pm 30 \text{ nm}$ 的 LED, TOF 阵列探测器用于接收被摄场景的反射光的位置、强度、时间和相位信息。工作时 LED 发出的连续或脉冲光信号照射在被照射视场覆盖的景物上并反射, 接收探测器接收到反射光信息, 每个像元通过计时器计算发出的光信号与接收到的光信号之间的时间差得到像元与被测场景反射点之间的距离, TOF 阵列的输出信号为接收视场覆盖的三维深度数据, 其获得的距离信息的数量即 TOF 探测器的像元数。目前基于 TOF 成像的测量原理可分为直接测量法和间接测量法两大类^[4], 该系统示意图如图 1 所示。

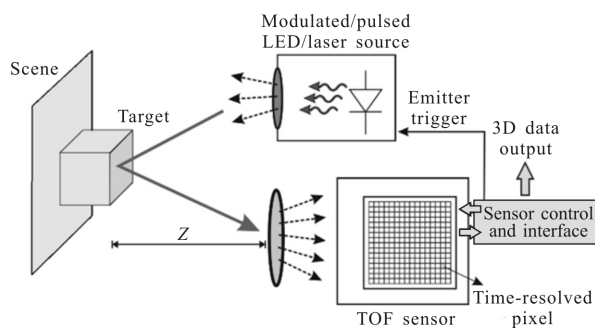


图 1 TOF 成像系统原理示意图

Fig.1 TOF imaging system diagram

1.1 直接测量法

直接测量法又称为光脉冲法飞行时间成像 (Impulse Time-of-Flight Imaging), 测量原理为根据光脉冲在空间中的传播时间计算探测器像元到被照射场景之间的距离, 由于其直接测量光脉冲的飞行时间, 故称为直接测量法。工作时 LED 发射等周期的光脉冲, 经过场景反射后探测器接收到光脉冲, 则场景距离 Z 可表达为:

$$Z = c \cdot \frac{t_{\text{TOF}}}{2} \quad (1)$$

式中: c 为光在大气中的平均传播速度; t_{TOF} 为光脉冲在探测器与被照射场景之间的传播时间即飞行时间。由于该方法使用 LED 脉冲光源照射, 测量精度主要有计时器精度和探测器的灵敏度, 瞬时光电子接收响应时间可忽略。

直接测量法的实现流程为: 探测器收到触发信号后, 可覆盖探测视场的 850 nm 波长 LED 同步发射脉冲, 设 LED 发光的持续时间为 t_p 。

探测器像元配置两个快门 Q_0 和 Q_1 , 快门的开启时间也为 t_p 。当 LED 开始发射光脉冲时, 快门 Q_0 开启; 当 LED 光脉冲结束时, 快门 Q_1 开启。光脉冲与快门的时序控制如图 2 所示。当 LED 开始发射照射光脉冲时, 快门 Q_0 同步开启, 但由于光飞行时间的存在, 出射光脉冲与反射光脉冲具有一定的相位差, 当快门 Q_0 关闭时, 同一个反射光脉冲只有部分能量被探测器像元接收, 以光生电荷的形式存储在势阱中。此时快门 Q_1 同步开启, 由于像元间微米级的间距, 与被测距离相比可以忽略不计, 故该反射光脉冲其余的能量被相邻像元接收, 光生电荷被存储在邻近像元的势阱中。则入射光脉冲与出射光脉冲的时

间差 t_d 为:

$$t_d = t_p \cdot \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (2)$$

式中: Q_1 和 Q_2 分别为快门 C_1 和快门 C_2 对应的像元势阱中的累积光子数。则每个探测单元测得的景物点的距离 Z 等于:

$$Z = \frac{c}{2} \cdot t_d \quad (3)$$

由此, TOF 探测器的焦平面上可并行获得场景相对探测器的实时深度信息。

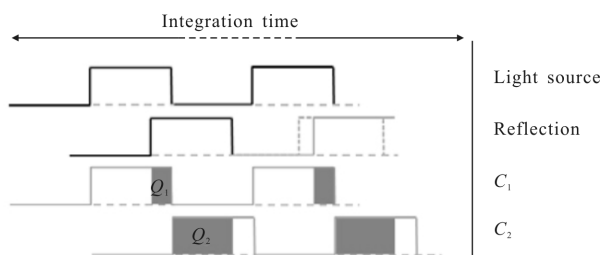


图 2 直接测量法光源脉冲时序

Fig.2 Direct measurement light pulse timing

1.2 间接测量法

间接测量法又称为相关法飞行时间成像 (Correlation-Based Time-of-Flight Imaging), 测量原理是根据调制光信号在空间中传播的相位差测量探测器像元到被摄场景的距离。由于其通过调制光信号的相位差间接计算光信号的飞行时间, 故称之为间接测量法。其原理是由调制激光光源发射调制光信号到场景上, 探测器收到反射的光信号, 通过该信号与基准参考光信号(驱动脉冲)的卷积、采样得到反射光信号的相位, 计算出测量信号的飞行时间, 根据该相位差计算出被测景物到探测器焦平面之间的距离。通过相参计算得到的出射光与反射光之间的相位差为 φ_{TOF} , 则距离 Z 等于:

$$Z = \frac{c \cdot \varphi_{\text{TOF}}}{4\pi\omega} \quad (4)$$

式中: c 为光在大气中的平均传播速度; ω 为调制光的频率。与直接测量法类似, 间接测量法的测量结果也是根据光学系统形式和探测器类型配置串行或并行输出。

间接测量法的特点是通过对象元的曝光的控制, 对反射光信号进行多次采样, 然后解调获得反射光信号在特定相位的光信号强度, 计算反射光信号与出射光信号的相位差 φ_{TOF} 。出射光信号和反射光

信号均可以描述为正弦函数或余弦函数。不妨设发射光信号频率为 ω , 则有:

$$s(t) = A \cdot \cos(\omega t) \quad (5)$$

经过空间传播, 反射光信号为:

$$r(t) = B + kA \cdot \cos(\omega t + \varphi_{\text{TOF}}) \quad (6)$$

式中: A 为发射光信号的幅值; φ_{TOF} 为光信号传播产生的延迟; k 为衰减系数, 产生衰减的主要原因为光传播和反射过程中的衰减、光学系统和滤光片的衰减; B 为背景光的幅值, 即环境光入射到探测焦平面导致的信号偏置; ω 为出射光信号的调制频率。由此可见, 在一个调制周期内, 传播时间可以用两个信号间的相位差表征。出射信号与反射信号之间的相位关系通过这两个信号间的互相关函数计算获得, 其数学表达式为:

$$c(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t)r(t+\tau)dt \quad (7)$$

由于光信号在传播过程中的调制周期不变, 即 $s(t)$ 和 $r(t)$ 为同周期信号, 则上式可简化为:

$$c(\tau) = \frac{kA}{2} \cos(\omega\tau + \varphi_{\text{TOF}}) + B \quad (8)$$

由上述公式, 反射光信号相位差计算的关键在于恢复两个信号间互相关函数的参量, 四相位测量方法可以获得计算互相关函数的参量。对于反射光信号, 选定 4 个等间隔相位 $\tau_i = \omega t$ ($\tau_0 = 0^\circ$ 、 $\tau_1 = 90^\circ$ 、 $\tau_2 = 180^\circ$ 、 $\tau_3 = 270^\circ$) 作为采样点, 4 个采样点相位正交, 覆盖一个调制周期。设 $C(\tau_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 为每个采样点测得的光生电子数, 该测量结果用于计算互相关参数, 则每个相位采集的光信号值为:

$$C(\tau_0) = c(\tau_0) + B = \frac{kA}{2} \cos(\varphi_{\text{TOF}}) + B \quad (9)$$

$$C(\tau_1) = c(\tau_1) + B = \frac{kA}{2} \sin(\varphi_{\text{TOF}}) + B \quad (10)$$

$$C(\tau_2) = c(\tau_2) + B = -\frac{kA}{2} \cos(\varphi_{\text{TOF}}) + B \quad (11)$$

$$C(\tau_3) = c(\tau_3) + B = -\frac{kA}{2} \sin(\varphi_{\text{TOF}}) + B \quad (12)$$

在电路实现中, 由于探测器采集的光信号以电子的形式存储在势阱中, 通过模数转换器 ADC 转换为数字量, 故通过一个信号周期内 4 个正交相位采集的信号值 $C(\tau_i)$ 能够表征互相关系数。反射光信号采集原理示意图如图 3 所示, P_{opt} 为每个时刻对应的光信号强度, kA 为光信号幅值, B 为环境光造成的信号偏置, 在每个调制周期内, 控制像元快门开始曝光,

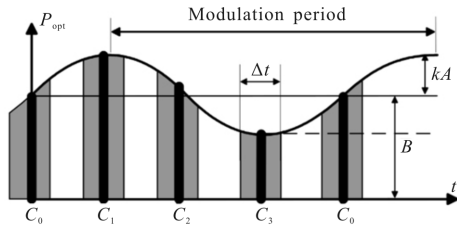


图 3 间接测量法原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of indirect measurement method

时间为 Δt ，在此期间像元按时序收集光生电荷，以电压信号的形式输出，电压值的大小为该调制相位的瞬时光强。根据四次采样计算光信号幅值 kA 、信号偏置 B 和相位差 φ_{TOF} 为：

$$kA = \frac{\sqrt{(C_3 - C_1)^2 - (C_2 - C_0)^2}}{2} \quad (13)$$

$$B = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 C_i \quad (14)$$

$$\varphi_{\text{TOF}} = \arctan \frac{C_3 - C_1}{C_2 - C_0} \quad (15)$$

2 TOF 成像的主要特点

根据 TOF 测量原理，无扫描的全固态 SAPD 焦平面成像器件可实现并发实时景物三维深度信息的获取，其特点可归纳为以下 3 个方面。

2.1 景物深度与分辨率

目前两种 TOF 测量方法均存在量程和精度的限制，这是由测量原理决定的。直接测量法的量程取决于发射光脉冲的周期，由距离测量计算公式可知：

$$Z = c \cdot \frac{t_{\text{TOF}}}{2} \quad (16)$$

相应的距离测量误差为：

$$\Delta Z = \frac{t_{\text{TOF}}}{2} \cdot \frac{c}{2} \Delta t_{\text{TOF}} \quad (17)$$

式中： Δc 为光速的误差； Δt_{TOF} 为测量反射光脉冲延迟时间的误差。直接测量法的测距误差即由这两部分组成。对于有大气环境的应用场景，由于介质密度、适度、温度等参数的随机变化，其导磁系数和介电常数也发生相应的改变，因而导致光速变化。对于空间环境应用，由于不存在传播介质，光速 c 为真空中的速度。时间测量误差 Δt_{TOF} 主要取决于快门控制电路的速度、时序精度以及光电荷输出的信号噪声。使用间接测量法的 TOF 相机测量量程 Z 由出射光信号的调制频率 ω_m 决定，测量分辨率由相位差测量

分辨率决定。间接测量法的距离公式如下：

$$Z = \frac{c \cdot \varphi_{\text{TOF}}}{4\pi\omega_m} \quad (18)$$

对上式两边做微分，相应的距离测量精度与相位差测量精度间的关系为：

$$\Delta Z = \frac{c}{4\pi\omega_m} \Delta\varphi_{\text{TOF}} + \frac{\varphi_{\text{TOF}}}{4\pi\omega_m} \Delta c \quad (19)$$

式中： c 为光速； ω_m 为光源的调制频率。与直接测量法相同，光速 c 由光路传播的介质决定； $\Delta\varphi_{\text{TOF}}$ 为相位差的测量精度。

2.2 景物视场与分辨率

由于 TOF 测量原理和半导体工艺的约束，TOF 成像器件的像元数与 CCD 成像探测器件的像元数相比有较大差距。目前，基于直接测量法原理研制的 TOF 探测器像元数最高为 1024×1024 ；而基于间接测量法原理的 TOF 探测器像元数最高为 480×360 ^[5-6]。而目前二维成像器件的像元数普遍高于 2048×2048 。对 TOF 成像而言，更多的像元数意味着在相同距离和相同视场上获取景物深度信息空间频率更高，即采集的三维点云的空间分辨率更高。场景距离与点云间距之间的关系由下式表达：

$$D = \frac{L}{f} d \quad (20)$$

式中： f 为光学系统焦距； L 为物距； d 为探测器像元间距离。设探测光学系统半视场为 ω ，物方测量范围为 S ，则最大探测范围 S 可通过下式计算：

$$S = \left(\tan\omega + \frac{d}{f} \right) L \quad (21)$$

以基于间接测量的相位法 TOF 计算成像为例，探测器像元数为 320×240 ，像元间距 $15 \mu\text{m}$ ，光学系统焦距为 6 mm ，视场为 $70^\circ \times 60^\circ$ 时，则点云间距与物距呈现较好的线性关系，如图 4 所示。

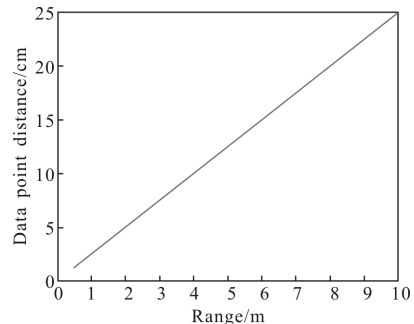


图 4 TOF 相机点云间距与测量距离关系曲线

Fig.4 Curve of TOF camera point cloud distance and measurement distance

从图中可以看到：当场景与探测器距离较远或光学视场较大时，深度信息的空间频率可能不足以满足场景恢复的精度需求。通常 $70^\circ \times 60^\circ$ 探测视场与场景距离在 10 m 时，空间截止线分辨率为 25 cm，所以提高 TOF 探测器的像元规模是提升 TOF 探测能力的主要工作之一。

2.3 三类成像测量的比较

目前，基于焦平面成像的三维景物深度成像信息获取方式有 3 种原理：多目视觉、结构光和 TOF 测量^[1,7]。多目视觉方式与结构光方式的测量原理如图 5 和图 6 所示。

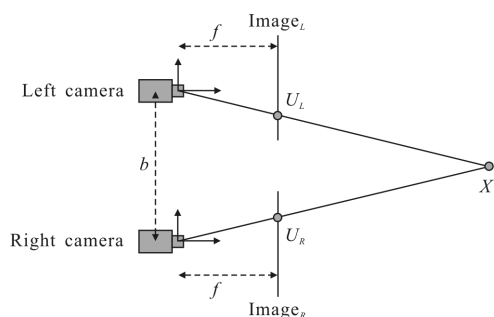


图 5 双目视觉系统测量原理图

Fig.5 Stereo vision measurement schematic

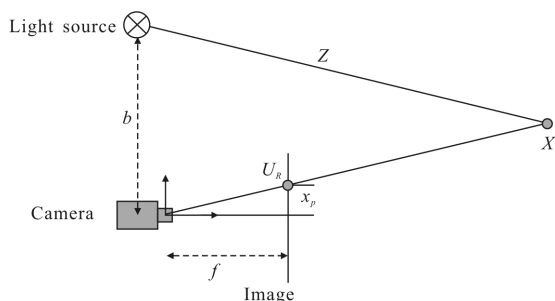


图 6 结构光测量原理图

Fig.6 Structured light measurement schematic

多目视觉一般由两个或以上的成像探测器以一定基线长度从不同角度同时获取同一场景的数字图像，理论上基于基线视差原理即可恢复出物体三维几何信息，重建场景的三维形状与位置。对于多目视觉感知而言，其性能特点可归纳为两个方面：

(1) 距离精度受到测量基线即两台相机的安装距离限制，其测量精度与距离呈正比，使得多目视觉测量在空间尺寸约束较为严苛的运动载体(如星载、机载、舰载和车载)上应用受到一定限制。

(2) 多台成像探测器输出的图像匹配算法较为

复杂，即如何在多幅图像中匹配场景中的相同位置。匹配精度直接影响测量结果。此外，被测场景的需要具有较为显著与视角相关的特征变化，即图像需要有丰富的空间频率以获得显著的视差信息，以满足模板匹配的需求。如果图像的空间频率不够丰富，则会降低匹配概率和适配度，使测量信息产生较大偏差。

结构光是通过把具有已知图案的光即结构光投射到被测场景上，并通过计算图案形变量获得场景的距离信息。对于结构光而言，其性能瓶颈也可归纳为两个方面：

(1) 结构光光源一般为编码或相移模式的连续光源，由相机拍摄包含有结构光条纹的场景图像。被测场景必须在投影序列期间保持相对静止，以避免图像信噪比下降，因此导致获取图像的帧速率较低，实时性较差；

(2) 由于其拍摄的条纹图像为场景的反射光，因此环境光照可能导致条纹图像的信噪比下降，进而导致计算条纹形变的精度下降。因此，结构光更适用于室内应用场景。

3 种主流三维成像技术性能对比如表 1 所示。

表 1 3 种主流三维成像技术性能对比

Tab.1 Comparison of three mainstream 3D imaging techniques

Characters	Passive stereoscopic approaches	Structured light	Time of flight
Algorithm complexity	Complex	Complex	Simple
Hardware cost	Low	Middle	Middle
Size	Middle	Middle	Small
Measurement rate	Middle	Low	Fast
Precision	Depend on baseline	High	High
Adaptability in low light	Bad	Good	Good
Adaptability in bright light	Good(No shadow)	Middle	Middle
Power consumption	Low	Middle	Low

3 TOF 成像测量误差源分析

TOF 三维成测量的误差来源有成像系统引起的

误差和场景引起的误差两大类, 成像系统引起的误差主要包括内参标定误差和光源误差。环境引起的误差包括反射率误差、多路径误差和背景光误差。

3.1 成像系统误差

光源误差是 TOF 相机的主要误差源之一, 主要体现在两个方面: 一是红外 LED 光源波形误差。基于相位相关法的 TOF 相机光源假定参考光信号和接收光信号都是标准的调制波形, 如标准正弦波形。但由于电路设计的原因, 实际的光信号除基频外, 还存在直流分量、高次谐波以及非周期信号, 对距离测量引入系统误差。二是多个红外 LED 光源间的时序误差^[8]。根据上述 TOF 相机成像原理, 飞行时间是根据光信号在空间的传播时间计算的。实际上由于信噪比的需求, 一般设计多个红外 LED 阵列作为照明光源, 因此 LED 间发光时序的时间差会造成距离测量误差。

对 TOF 成像系统的测量误差通过如下公式进行定量描述:

$$\sigma \cong \frac{c}{4\sqrt{2}\pi f} \cdot \frac{A+B}{C_d A} \quad (22)$$

式中: c 为光速; f 为调制频率; C_d 为光源的调制对比度; A 为反射光强度; B 为照明光源偏置。调制对比度 C_d 定义为:

$$C_d = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (23)$$

其中, 调制频率和照明可以动态控制。最大调制频率受所用光源类型的限制, 最大照度受系统设计和功耗的限制。反射光强度 A 受到积分时间、芯片的量子效率和光学系统透过率的约束, 光源偏置 B 由系统功耗和调制对比度决定。综上, TOF 相机的测量精度与上述各设计参数存在耦合关系。

3.2 场景误差

TOF 相机的测量误差除了与成像系统的设计参数有关, 还与被测场景有关, 体现在场景表面反射率和场景结构两个方面。场景反射率误差是 TOF 相机的一类场景误差, 该误差与场景结构以及场景表面的反射率有关^[9]。调制信号的幅度 A 与测量距离 d 的关系为:

$$A \propto \frac{1}{d^2} \quad (24)$$

场景与相机距离越远, 光信号的幅度就越低, 则距离测量的精度也随之降低。另一方面, 具有较强漫反射性质的物体可以使更多的光信号进入 TOF 相

机。若场景表面性质为全反射, 则当 TOF 相机光轴与反射光方向夹角过大时, 因反射光调制幅度过低而无法完成信号的相关计算。

多路径误差是 TOF 相机的另一类场景误差, 该误差与场景结构有关^[10]。在 TOF 成像系统模型中, 假定 TOF 成像芯片的像元只接收从场景一次反射的照明光。然而, 由于光源照明照亮整个场景, 即全局光照, 因此传感器实际接收到的是照明光经过场景的多次反射或散射之后进入到相机的光, 即相机接收到的是照明光经过多个路径传播后的反射光, 由此造成的误差称为 TOF 相机多路径误差。试验场景如图 7 所示, 飞行时间相机对两个漫反射平板组成的夹角进行成像, 测量结果如图 8 和图 9 所示。图 8

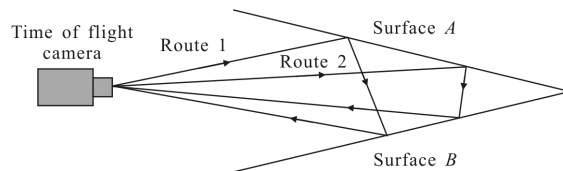


图 7 多路径误差实验示意图

Fig.7 Schematic of multipath error experiment

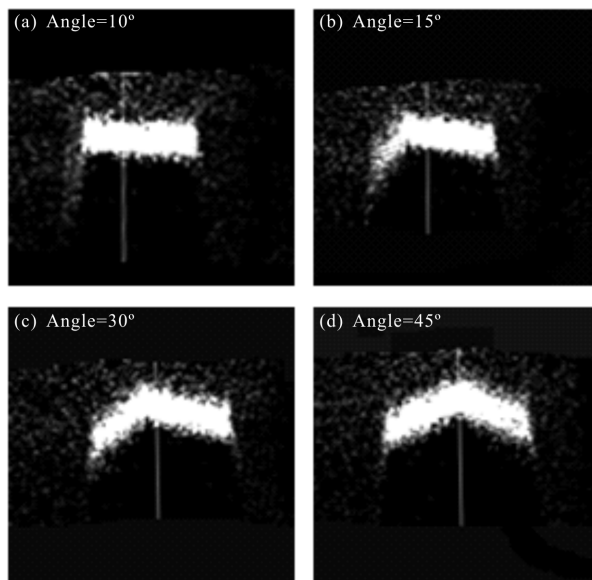


图 8 与光轴不同夹角的直角面成像结果

Fig.8 Imaging results on a right angle with different angles

为相机光轴与一个直角面夹角分别为 10° 、 15° 、 30° 和 45° 时相机的测量结果, 图 9 为相机分别对夹角为 15° 、 30° 、 45° 和 90° 的两个平面的测量结果。从中可以看到: 由于多路径效应的存在, 出射光在两个平面

间多次反射后进入相机, 由于实际光程比表面一次反射进入相机的光程更长, 因此实际测量结果比理论值偏大。对于此类场景的多路径误差校正, 国际上的主流研究方法有根据相量成像理论分离一次反射的测量信息和多次反射的测量信息、将场景分段平面化并将每个平面视为朗伯体、将三维点云视为时域稀疏信号进行处理。但 these 方法只能根据某个特定场景的特点进行校正, 无法推广到更为一般化的情形。此外, 上述方法需要采集多帧场景图像, 处理算法的运算量较大。综上所述, TOF 相机场景误差校正仍是国际上相关领域的研究重点之一。

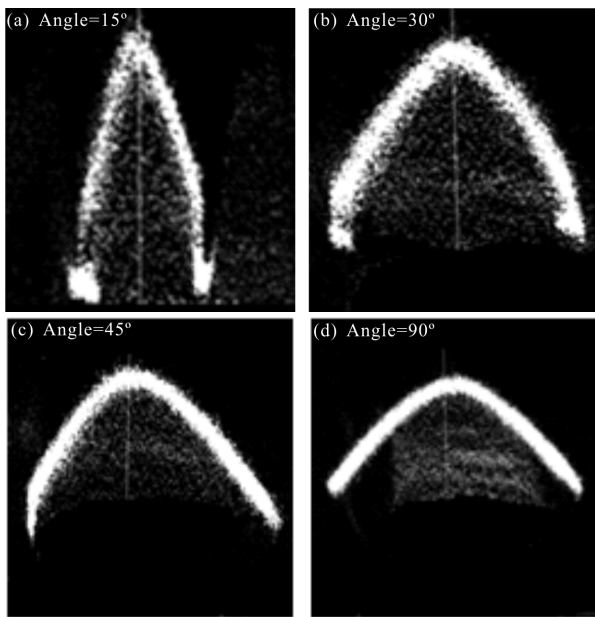


图 9 两平面形成的不同夹角成像结果

Fig.9 Angle formed by the two planes imaging results

4 结论与展望

自然景物的三维立体信息获取是光学非接触测量、自主导航和自动驾驶领域的核心关键技术, 传统非接触景物空间信息的获取方式离不开高速光学扫描、多台成像设备的并行工作和单台设备的多视角成像, 涉及较为复杂的光机结构和算法, 影响获取信息数据精度的因素也是多方面的, 设备内参和外参的合理配置难度较大, 通常需要复杂的定标技术和定标设备保障, 后续的数据处理和校准技术难度较大, 数据的并发性和实时性水平较低, 限制了高机动载体光学载荷的应用, 而基于 TOF 技术成像原理的三维景物信息获取技术较好地解决了上述诸多不足, 文中研究的基于飞行时间原理的三维成像系统,

从工作原理、成像性能特点和误差源 3 个方面进行了研究, 并将 TOF 成像与多目视觉和结构光的三维成像测量系统进行了对比。基于并行光子飞行时间测量原理的三维成像系统在测量精度、系统复杂度、内参外参定标和成本等诸多方面展现出了较为明显的综合优势, 有着广阔的技术进步和发展、应用前景。特别是作为高集成、小型化、低功耗的光电有效载荷应用于空间着陆探测, 具有更好的适应性。

参考文献:

- [1] Zanuttigh P, Marin G, Dal Mutto C, et al. Time-of-flight and Structured Light Depth Cameras[M]. Heidelberg: Springer, 2016.
- [2] Wasenmüller O, Ansari M D, Stricker D. DNA-SLAM: dense noise aware SLAM for TOF RGB-D cameras [C]// Asian Conference on Computer Vision, 2016: 613-629.
- [3] Hewitt R A, Marshall J A. Towards intensity-augmented SLAM with LiDAR and TOF sensors [C]//International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015: 1956-1961.
- [4] Gupta M, Agrawal A, Veeraraghavan A, et al. A practical approach to 3D scanning in the presence of interreflections, subsurface scattering and defocus [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2013, 102(1-3): 33-55.
- [5] Kim W, Yibing W, Ovsianikov I, et al. A 1.5 Mpixel RGBZ CMOS image sensor for simultaneous color and range image capture [C]//Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2012 IEEE International, 2012: 392-394.
- [6] Payne A, Daniel A, Mehta A, et al. 7.6 a 512×424 CMOS 3D time-of-flight image sensor with multi-frequency photo-demodulation up to 130 MHz and 2GS/s ADC [C]//Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2014 IEEE International, 2014: 134-135.
- [7] TI ToF sensor. Time-of-flight (TOF) sensors [EB/OL]. [2016-04-15]. <https://www.ti.com/sensing-products/optical-sensors/3d-time-of-flight/overview.html>.
- [8] Payne A D, Dorrington A A, Cree M J. Illumination waveform optimization for time-of-flight range imaging cameras [C]//Videometrics, Range Imaging, and Applications XI. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8085: 80850D.
- [9] Stephan M, Rahul N, Daniel K. Simulation of time-of-flight sensors using global illumination [C]//Vision, Modeling & Visualization, 2013: 33-40.
- [10] Mutny M, Nair R, Gottfried J M. Learning the correction for multi-path deviations in time-of-flight cameras[J]. *Computer Science*, 2015, 1512: 04077.