

间接飞行时间相机性能参数的测量方法与验证

刘佳鑫 关新 曹中祥 华宝成 李林

Measurement method and verification of performance parameters of indirect time-of-flight depth camera

LIU Jiaxin, GUAN Xin, CAO Zhongxiang, HUA Baocheng, LI Lin

引用本文:

刘佳鑫, 关新, 曹中祥, 等. 间接飞行时间相机性能参数的测量方法与验证[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 395–403. DOI: 10.5768/JAO202546.0203005

LIU Jiaxin, GUAN Xin, CAO Zhongxiang, et al. Measurement method and verification of performance parameters of indirect time-of-flight depth camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(2): 395–403. DOI: 10.5768/JAO202546.0203005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹飞行时间测厚法在大气环境中的应用

Applications of thickness measurement method based on terahertz time-of-flight in atmospheric environment

应用光学. 2023, 44(4): 809–815 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403001>

一种基于偏振相机的应力测量方法及其误差校正

Stress measurement method and error correction based on polarization camera

应用光学. 2024, 45(6): 1212–1218 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603001>

放疗3D剂量验证系统中光场相机点扩散函数获取

Point spread function acquisition of light field camera in 3D dose verification system for radiotherapy

应用光学. 2021, 42(1): 43–48 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101007>

双线阵相机的线扫描差动共聚焦检测方法

Differential confocal measurement method of linear scanning based on dual linear array camera

应用光学. 2022, 43(2): 298–303 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203004>

高精度抗遮挡的四目相机三维重建系统

High-precision occlusion-resistant quad-vision camera 3D reconstruction system

应用光学. 2024, 45(2): 307–313 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201005>

偏振相机的透明元件应力测量

Stress measurement of transparent elements based on polarized camera

应用光学. 2022, 43(2): 284–290 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0395-09

引用格式: 刘佳鑫, 关新, 曹中祥, 等. 间接飞行时间相机性能参数的测量方法与验证 [J]. 应用光学, 2025, 46(2): 395-403.

LIU Jiaxin, GUAN Xin, CAO Zhongxiang, et al. Measurement method and verification of performance parameters of indirect time-of-flight depth camera[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 395-403.



在线阅读

间接飞行时间相机性能参数的测量方法与验证

刘佳鑫^{1,2}, 关 新^{1,2}, 曹中祥¹, 华宝成^{1,2}, 李 林^{1,2,3}

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100094; 2. 空间智能控制技术全国重点实验室, 北京 100094;
3. 空间光电测量与感知实验室, 北京 100190)

摘要: 间接飞行时间 (indirect time of flight, iTOF) 相机在三维环境感知领域有着广泛的应用前景。根据 iTOF 相机成像原理, 当曝光时间过大导致相机工作在非线性区时, 解算的深度信息也会引入额外的偏差, 从而影响测量准确度。为了进一步提高飞行时间相机的应用精度, 根据飞行时间相机的光学成像机理, 提出一种针对飞行时间相机的性能参数测量方法, 通过实验和计算间接得到飞行时间深度相机的系统增益等性能参数, 将其代入飞行时间相机的光学成像模型, 即可得到距离与相机输出灰度值的对应曲线。建模与实验结果的相对误差可以达到 20% 以内, 平均相对误差为 0.16%。这些性能参数和仿真模型用于指导 iTOF 相机在不同场景使用时的积分时间选择, 可以有效解决因使用不当引入非线性误差而降低距离测量精度的问题。

关键词: 深度相机; 相机性能参数; 四相位测距法; 飞行时间原理

中图分类号: TN215; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0203005

Measurement method and verification of performance parameters of indirect time-of-flight depth camera

LIU Jiaxin^{1,2}, GUAN Xin^{1,2}, CAO Zhongxiang¹, HUA Baocheng^{1,2}, LI Lin^{1,2,3}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China; 2. Science and Technology on Space
Intelligence Control Laboratory, Beijing 100094, China; 3. Space Optoelectronic
Measurement and Perception Laboratory, Beijing 100190, China)

Abstract: Indirect time of flight (iTOF) camera has a wide application prospect in the field of three-dimensional environmental perception. According to the imaging principle of iTOF camera, its imaging quality is closely related to the exposure time. When the exposure time is too large causing the camera to work in the nonlinear area, the depth information of the solution will also introduce additional biases and thereby affecting the accuracy of the measurement results. In order to further improve the application accuracy of time-of-flight camera, according to the optical imaging mechanism of time-of-flight camera, a method was put forward to measure the performance parameters of time-of-flight camera. Through experiments and calculations, the global system gain and other performance parameters of time-of-flight depth camera were indirectly obtained, then the corresponding curves between distance and camera output gray value could be obtained by substituting them into the optical imaging model of time-of-flight camera, and the necessity of measuring related performance parameters was verified by experimental results. The relative error between modeling and experimental results can be within 20%, and the average relative error is 0.16%. These performance parameters and simulation models are used to guide the integration time selection of iTOF cameras when used in different

收稿日期: 2024-01-29; 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 国家自然科学基金 (52275083); 北京市科技新星计划资助

作者简介: 刘佳鑫 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事视觉导航敏感器研究。E-mail: liu_jia_xin@foxmail.com

scenarios, which can effectively solve the problem of reducing distance measurement accuracy due to the introduction of non-linear errors by improper use.

Key words: depth camera; camera performance parameters; four-phase ranging method; time of flight principle

引言

非接触式三维视觉成像技术在深空探测、制造业、目标检测、汽车自动驾驶、移动机器人、医学等领域都有重要的应用, 测量精度往往需要达到毫米级或厘米级^[1-4]。目前有许多不同的技术手段来实现机器三维成像, 根据不同的成像原理主要分为: 结构光、双目立体视觉和飞行时间^[5]。结构光深度相机通过计算相位编码信息的变化, 得到被测物体的深度信息^[6], 该方法在硬件方面实现难度较大, 在户外使用时相位编码光线存在被淹没的可能性, 抗干扰能力差; 双目立体视觉相机通过图像匹配算法, 对两台相机图像中的特征点进行匹配, 进而计算出两幅图像之间的视差, 再根据视差推导出被测物体的景深^[7]。因此该三维成像方法对算法依赖性较大, 需要提供较强的算力水平和充足的运算时间。

相比于以上两种深度相机, 基于间接飞行时间(indirect time of flight, iTOF)的深度相机实现难度低, 抗杂光干扰能力强, 不受自然光强限制, 在三维环境感知、三维点云相对导航等领域具有广泛的应用前景^[8], 特别是在深空探测领域, 由于飞行时间相机是主动光成像相机, 不受太阳光的限制^[9-13]。目前, 业界主要对 iTOF 相机深度值开展相关误差研究。文献 [14] 提出 iTOF 传感器最常见的噪声是系统噪声和散粒噪声, 分别呈现高斯和泊松分布^[15-16]。文献 [17] 得出深度值测量的相位噪声与信号电平成反比, 当信号减小时误差增大。通常会对相机采集到的原始深度数据进行空间滤波, 如联合双边滤波^[18]、自适应加权滤波^[19]、中值滤波^[17]、小波^[20-21]、各向异性扩散^[22] 和总变分^[23], 从而减小其深度测量误差。

飞行时间相机采集的深度数据精确性直接影响到后续的三维点云配准与位姿获取精度, 对于飞行时间相机的时间稳定性和测量精度都有着较高的要求。因此, 在工程实际应用中, 为了提高飞行时间相机的测量精度, 就需要得到相机准确的性能参数, 并根据使用距离范围选择合适的曝光时间。如果曝光时间选择不当, 会导致在测量近距离或高反射物体时, 得到像素值过饱和的灰度

图像。当飞行时间相机的灰度值过饱和时, 会影响深度测量值的准确性, 从而影响飞行时间相机的深度测量精度。

为了解决由于曝光时间不当引起的饱和问题, 本文根据飞行时间相机像素成像原理, 提出一种 iTOF 相机的用户手册性能参数测量方法。基于该性能参数的测量方法对相机进行建模仿真, 可以指导曝光时间的选择, 保证 iTOF 相机工作在灰度线性区, 提高飞行时间相机的灰度测量精度, 避免灰度过饱和问题影响深度测量的精确性, 以更低的时间成本实现更快的设计周期, 为后续基于深度数据开展相对导航工作奠定良好的数据基础。

1 iTOF 相机测量原理

iTOF 相机作为主动光相机, 具有一个 VCSEL(vertical cavity surface emitting laser) 激光器或 LED 红外发射光源, 对外发射红外光, 并通过传感器接收物体反射回来的红外光, 然后对发射和接收到的红外光进行调制解调, 得到相位差, 从而计算得到距离信息^[24]。iTOF 相机的原理图如图 1 所示。

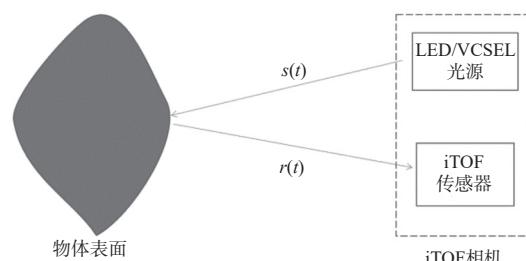


图 1 iTOF 相机的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of iTOF camera

本文主要研究对象为使用连续波调制方法的飞行时间相机, 连续波调制也被称为互相关法调制^[25]。定义 iTOF 相机的发射信号为 $s(t)$, 反射回相机的信号为 $r(t)$, 如式 (1) 和式 (2) 所示, 均用余弦函数表示, 用以后续分析互相关采样值。

$$s(t) = A \cos(2\pi f t) \quad (1)$$

$$r(t) = aA \cos(2\pi f t - \varphi) + K \quad (2)$$

式中: f 为信号频率; A 为振幅; φ 为相位差; a 为能

量损耗带来的衰减系数; K 为偏移量。

互相关函数 $c(\tau)$ 定义为

$$c(\tau) = s(t) \otimes r(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) r(t+\tau) dt \quad (3)$$

将式(1)和式(2)定义的发射信号 $s(t)$ 、反射回波信号 $r(t)$ 使用式(3)进行调制, 化简得到互相关函数 $c(\tau)$ 为

$$c(\tau) = s(t) \otimes r(t) = \frac{aA}{2} \cos(2\pi ft - \varphi) + K \quad (4)$$

在一个周期内以相等的步长对互相关函数进行 4 次采样计算, 得到互相关值, 即 90° 步长改变函数相位, 则互相关函数相位将有 4 个项:

$$2\pi f t_0 = 0^\circ \quad (5)$$

$$2\pi f t_{90} = 90^\circ \quad (6)$$

$$2\pi f t_{180} = 180^\circ \quad (7)$$

$$2\pi f t_{270} = 270^\circ \quad (8)$$

将此 4 项代入到互相关函数 $c(\tau)$ 中, 可以简化得到 4 个互相关值:

$$c(\tau_0) = \frac{aA}{2} \cos(\varphi) + K \quad (9)$$

$$c(\tau_{90}) = \frac{aA}{2} \sin(\varphi) + K \quad (10)$$

$$c(\tau_{180}) = -\frac{aA}{2} \cos(\varphi) + K \quad (11)$$

$$c(\tau_{270}) = -\frac{aA}{2} \sin(\varphi) + K \quad (12)$$

这 4 个互相关值分别表示发射信号在相位 0°、90°、180°、270° 积分半个周期的电荷量, 也是 iTOF 相机每一帧输出的 4 个原始数据。根据这 4 个值, 可以得到相位差 φ , 偏移量 K 和经过衰减后的振幅 aA , 如式(13)~式(15) 所示:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{c(\tau_{270}) - c(\tau_{90})}{c(\tau_0) - c(\tau_{180})} \right) \quad (13)$$

$$K = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_{180}) + c(\tau_{270}) + c(\tau_{90})}{4} \quad (14)$$

$$aA = \sqrt{[c(\tau_0) - c(\tau_{180})]^2 + [c(\tau_{270}) - c(\tau_{90})]^2} \quad (15)$$

根据反射回波信号振幅 aA , 可以得到像素中光生电荷量的平均值, 进而生成一个常规的二维光强灰度图。不同距离会导致发出和接收的信号相位差产生变化, 从而影响 iTOF 相机输出的 4 个互相关值, 进而影响 iTOF 相机每帧生成的灰度图。

根据相位差 φ , 可以求得距离信息 D :

$$D = \frac{ct}{2} = \frac{c\varphi}{4\pi f} \quad (16)$$

因此, iTOF 相机在光线入射及光电转换模型方面与普通光学相机相似。而与普通光学相机有所不同的是, iTOF 相机在一个积分周期时间内, 会分别输出 4 个相位的 4 张灰度信息, 即为式(9)~式(12)中的 4 个互相关值, 后续需要根据 4 张相位图解算出该周期对应的一帧灰度图与一帧深度图^[26]。

2 iTOF 相机像素的性能评估

2.1 iTOF 相机用户手册性能参数测量的必要性

iTOF 相机的深度信息需要根据 4 个相位的灰度值解算得到。在实际工程应用中, 当曝光时间过大时, iTOF 相机得到的四相位灰度值会进入非线性的过饱和区, 从而导致深度图的空间误差较大。

本文使用随机噪声加固定偏移的方法仿真过饱和的深度图像, 效果如图 2 所示。

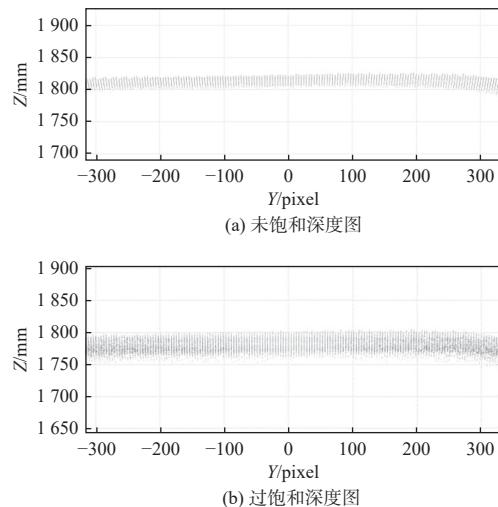


图 2 灰度值未饱和与过饱和时的深度数据对比

Fig. 2 Comparison of depth data between unsaturated and oversaturated gray values

当深度真值为 1 810 mm 时, 未饱和深度图在 $1 810 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ 误差范围内; 而过饱和深度图不仅空间噪声波动大, 且整体深度远小于真值, 平均深度值约为 1 710 mm, 不利于后续的数据处理。因此需要得到 iTOF 相机准确的性能参数, 根据性能参数建立相机仿真模型。首先根据工况要求, 利用仿真模型计算出某一距离范围内某一个 iTOF 相机的仿真输出灰度值。当仿真灰度值小于 2 600 DN 时, 可以判定相机工作在线性区, 选择在线性区工作范围内的曝光时间, 从而减小 iTOF

相机深度图的空间噪声,以提高测量精度。

2.2 iTOF 相机的性能参数测量方法

对于普通可见光相机,目前业界已有比较成熟性能参数标准^[27],将整个相机成像过程视为线性模型,使用光子转移法计算传感器增益^[28-29]。其增益计算曲线如图 3 所示,其中方点表示灰度值饱和点,两个圆点表示 0~70% 饱和点的数据范围,在该数据范围内计算最小二乘法回归曲线,其斜率即为相机的系统增益。

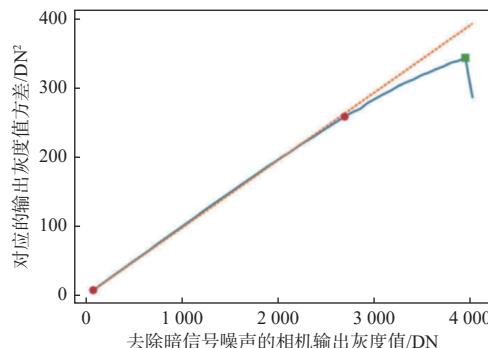


图 3 普通可见光相机的增益计算曲线^[27]

Fig. 3 Gain calculation curves of ordinary visible light camera^[27]

其线性响应度计算曲线如图 4 所示,其中两个圆点表示 0~70% 饱和点的数据范围,与计算系统增益类似,在该数据范围内计算最小二乘法回归曲线,其斜率即为相机的线性响应度。

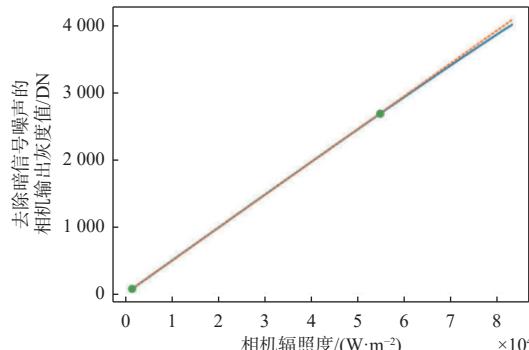


图 4 普通可见光相机的线性响应度计算曲线^[27]

Fig. 4 Linear responsivity curves of ordinary visible light camera^[27]

由于 iTOF 相机像素的成像原理与可见光相机类似,本质上都是小孔成像原理,因此 iTOF 相机 4 个相位的成像过程也可视为线性模型,每个相位输出灰度值的线性响应度计算曲线都与图 3 类似,在达到饱和前,其输出信号的灰度值与辐照度成正比。对于一般的可见光相机来说,不能保证其

光源的辐照度不变,因此在计算线性响应度时需要计算平均光子数与灰度值的线性关系,如图 4 所示。但 iTOF 相机作为一个主动光相机,可以保证其辐照度不随环境而变化,因此其平均光子数与曝光时间成线性关系,则一个积分时间内进入相机靶面内的单像元光子数 μ_p 与曝光时间 T_{int} 关系如式(17)所示:

$$\mu_p = M T_{int} \quad (17)$$

因此在计算 iTOF 相机的线性响应度曲线时,横坐标可以使用曝光时间表征相机输入的光子数目。

根据光电转换效率,可以得到一个积分时间内,进入相机靶面内单像元的能量经过光电转换后的电子数 μ_e :

$$\mu_e = \eta_{QE} \times \eta_{AC} \times \mu_p \quad (18)$$

式中: η_{QE} 为量子效率; η_{AC} 为 iTOF 相机调制效率。

设相机转换增益为 G ,普通光学相机输出的数字信号灰度值为 μ_y ,则有:

$$\mu_y = \mu_{y,d} + G \mu_e \quad (19)$$

式中 $\mu_{y,d}$ 为零辐照条件下的平均暗信号。

将式(18)代入式(19),化简得到:

$$\mu_y - \mu_{y,d} = G \times \eta_{QE} \times \eta_{AC} \times \mu_p \quad (20)$$

根据章节 1 中 iTOF 相机的深度测量原理,在一个积分时间内 iTOF 相机可以分别输出 P0、P90、P180、P270 这 4 个相位的灰度值 μ_{y_0} 、 $\mu_{y_{90}}$ 、 $\mu_{y_{180}}$ 、 $\mu_{y_{270}}$,则有:

$$\mu_{y_0} - \mu_{y_{0,d}} = M \times G_0 \times \eta_{QE} \times \eta_{AC} \times T_{int0} \quad (21)$$

$$\mu_{y_{90}} - \mu_{y_{90,d}} = M \times G_{90} \times \eta_{QE} \times \eta_{AC} \times T_{int90} \quad (22)$$

$$\mu_{y_{180}} - \mu_{y_{180,d}} = M \times G_{180} \times \eta_{QE} \times \eta_{AC} \times T_{int180} \quad (23)$$

$$\mu_{y_{270}} - \mu_{y_{270,d}} = M \times G_{270} \times \eta_{QE} \times \eta_{AC} \times T_{int270} \quad (24)$$

其中 iTOF 相机四相位的线性响应度 L 为

$$L = M \times G \times \eta_{QE} \times \eta_{AC} \quad (25)$$

可以通过实验得到四相位的灰度值等信息,从而根据公式计算得到线性响应度 L 、系统增益 G 等 iTOF 相机性能参数。通过该方法测量计算得到的系统增益,将作为仿真模型的输入参数参与后续计算仿真成像。系统增益与光源无关,所有成像模型可以视为线性系统的光学相机都可以使用该性能参数测量方法进行测量。

将实验得到的暗背景 $\mu_{y,d}$ 、系统增益 G 等性能参数输入 iTOF 相机仿真模型中,即可输出式(9)~式(12)中的 4 个互相关仿真值。根据 iTOF 相机的

测量原理,通过这4个互相关值解算得到深度仿真值和灰度仿真值。若仿真灰度值在 iTOF 相机工作的线性范围内,那么在实际使用中,可以选取该仿真灰度值对应的曝光时间进行实验。

3 实验装置与结果

3.1 参数采集实验装置

根据 iTOF 成像原理,对 iTOF 相机的两个基本探测单元 Tap A 及 Tap B 进行性能参数测试。Tap A 和 Tap B 是 iTOF 相机一个像素中两个反相(具有 180° 相位差)的单元,大部分 iTOF 相机支持组合两个单元数据的输出模式,使用该组合模式可以有效降低 iTOF 相机微处理器的计算时间。实验采用迈来芯公司生产的汽车级传感器,型号为 MLX75027, 视场角 $30^\circ \times 40^\circ$ 。使用 CCD/CMOS 成像性能综合评测系统产生参数测试实验所需光源,该系统辐照度面均匀性优于 95%,光谱范围为 $380\text{ nm} \sim 2400\text{ nm}$ 。不使用 iTOF 相机自身的光源系统,设定调制频率为 20 MHz。实验系统装置设置及实验现场如图 5 所示。

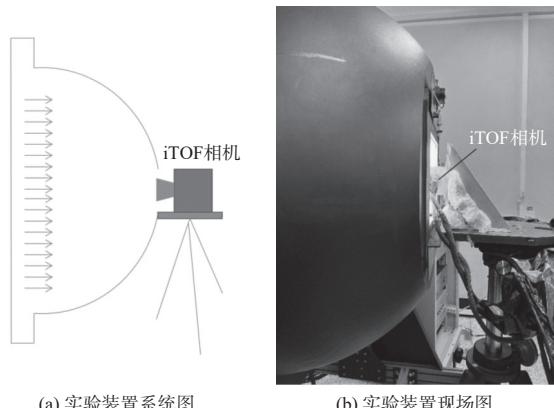


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test device

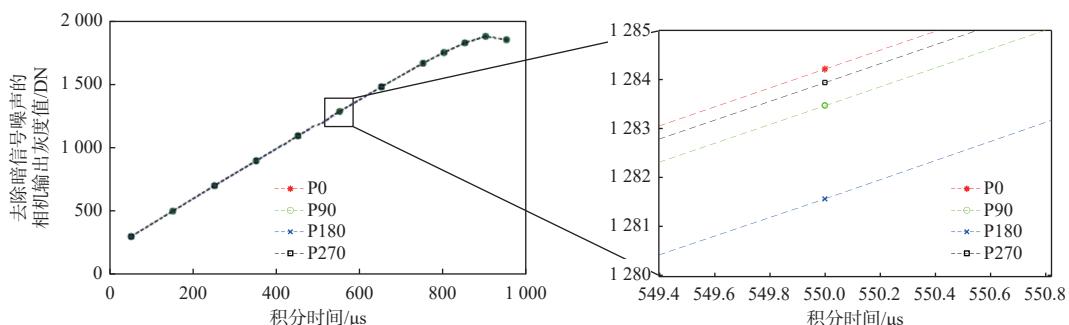


图 6 四相位的线性响应度曲线

Fig. 6 Four-phase linear responsivity curves

3.2 性能参数采集结果分析

3.2.1 暗背景

暗背景指的是在没有光源照射的情况下,相机自身的噪声等因素影响产生的电信号,即相机输出的平均灰度值 $\mu_{y,d}$ 。iTOF 相机与普通光学相机类似,其暗背景包括偏置和暗电流两部分,都受温度影响^[30]。在常温条件下,由于积分时间很短,相机暗电流不大,可以忽略,而偏置表现为常数,表 1 的实验结果可以验证,不同曝光时间、不同相位测量得到的暗电流都无明显变化。因此在后续应用时,可将实验结果作为恒定常值参与建模计算。

表 1 不同积分时间和不同相位的暗场平均灰度值

Table 1 Average gray values of dark field with different integration time and different phases

| 单元 | 不同相位的暗背景 | 积分时间/μs | | |
|-------|---------------------------------------|---------|--------|--------|
| | | 50 | 250 | 950 |
| Tap A | $\mu_{y_0,\text{dark}}/\text{DN}$ | 186.85 | 186.77 | 186.84 |
| | $\mu_{y_{90},\text{dark}}/\text{DN}$ | 186.76 | 186.72 | 186.77 |
| | $\mu_{y_{180},\text{dark}}/\text{DN}$ | 186.76 | 186.83 | 186.76 |
| | $\mu_{y_{270},\text{dark}}/\text{DN}$ | 186.73 | 186.78 | 186.82 |
| Tap B | $\mu_{y_0,\text{dark}}/\text{DN}$ | 186.54 | 186.49 | 186.57 |
| | $\mu_{y_{90},\text{dark}}/\text{DN}$ | 186.57 | 186.56 | 186.53 |
| | $\mu_{y_{180},\text{dark}}/\text{DN}$ | 186.58 | 186.61 | 186.64 |
| | $\mu_{y_{270},\text{dark}}/\text{DN}$ | 186.62 | 186.55 | 186.56 |

3.2.2 线性响应度

将相机从光子入射到数字信号输出的过程视为一个线性模型,那么输出的数字信号 μ_y 与入射光子数 μ_p 之间存在线性关系,如图 6 所示^[31]。iTOF 相机作为主动光相机,在光源辐照度稳定不变时,经过物体反射回相机传感器的光子数与曝光时间也具有线性关系。利用章节 3.2.1 实验得到的暗背景信号平均灰度值,可以拟合得到 iTOF 相机的四相位输出信号与曝光时间也分别具有各自的线性关系。

从图 6 可以得知, 在灰度值未达到饱和时, iTOF 相机的四相位灰度值分别与积分时间成线性关系。图 7 以 P0 相位为例, 展示了线性拟合的结果, 其中 L 为拟合直线的斜率, 即线性响应度。根据图 7 的拟合过程, 计算得到 iTOF 相机四相位的线性响应度如表 2 所示。

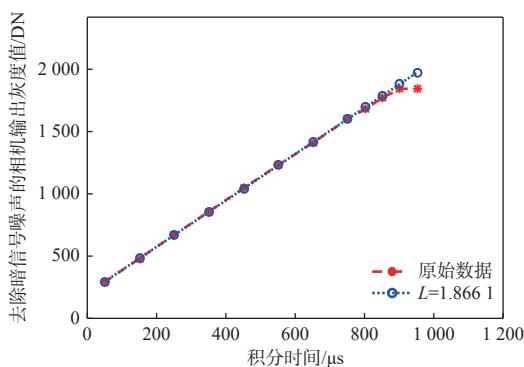


图 7 P0 相位的线性响应度拟合计算曲线

Fig. 7 Fitting calculation curves of linear responsivity of P0 phase

表 2 四相位线性响应度对比

Table 2 Comparison of four-phase linear responsivity

| 单元 | 相位 | 响应度/(DN·μs ⁻¹) |
|-------|------|----------------------------|
| Tap A | P0 | 1.866 |
| | P180 | 1.997 |
| | P90 | 1.995 |
| | P270 | 2.000 |
| Tap B | P0 | 1.910 |
| | P180 | 1.907 |
| | P90 | 1.912 |
| | P270 | 1.906 |

3.2.3 系统增益

由上一节可得, 相机输出灰度值的均值与方差的曲线斜率为相机线性模型的系统增益, 图 8 分别

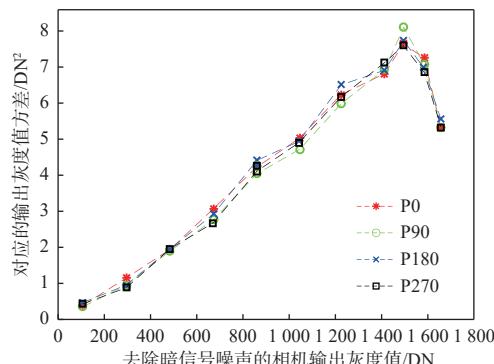


图 8 四相位的系统增益曲线

Fig. 8 System gain curves for four phases

为四相位的系统增益拟合曲线。图 9 以 P0 相位为例展示了系统增益的拟合结果, 其中 G 为拟合直线的斜率, 即系统增益。根据图 9 的曲线, 得到 A、B 两个模块不同相位的系统增益如表 3 所示。

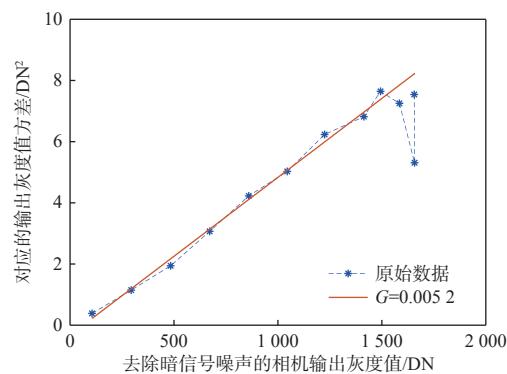


图 9 P0 相位的增益拟合曲线

Fig. 9 Gain fitting curves of P0 phase

表 3 四相位系统增益对比

Table 3 Comparison of four-phase system gain

| 单元 | 相位 | 系统增益/(DN·e ⁻¹) |
|-------|------|----------------------------|
| Tap A | P0 | 0.003 414 |
| | P180 | 0.003 410 |
| | P90 | 0.003 336 |
| | P270 | 0.003 267 |
| Tap B | P0 | 0.005 159 |
| | P180 | 0.005 319 |
| | P90 | 0.005 166 |
| | P270 | 0.005 335 |

4 仿真结果与实验验证

4.1 仿真结果

根据章节 1 的 iTOF 相机成像原理以及章节 3 计算得到的实测性能参数, 建立 iTOF 相机的深度成像模型, 仿真得出距离与输出四相位信号灰度值关系的曲线, 以曝光时间 950 μs, 距离 2 m~7 m 为例, 4 个相位的平均灰度值与距离的模型仿真结果如图 10 所示。与普通的可见光相机不同的是, 四相位的灰度值并不是随距离增大而单调减小的关系。随着距离增大, 相位差 φ 也会增大, 每个相位积累的电荷量可能增大, 也可能在到达饱和后逐渐减小, 四相位的灰度值变化与积累电荷量息息相关, 因此需要分别测量得到四相位的性能参数, 才能建立 iTOF 相机的深度灰度仿真模型。根据四相位灰度值解算得到的深度仿真值如

图 11 所示, 和真值相比, 深度值具有规律的摆动误差, 这是方波调制信号引起的谐波误差。

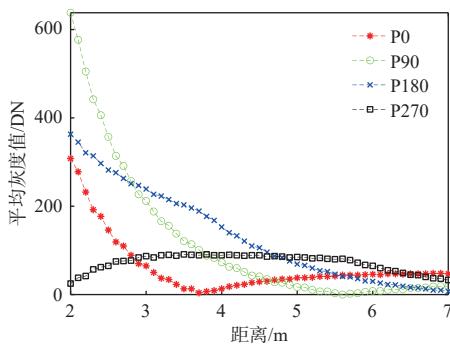


图 10 四相位的距离与平均灰度值仿真曲线

Fig. 10 Simulation curves of distances and average gray values of four phases

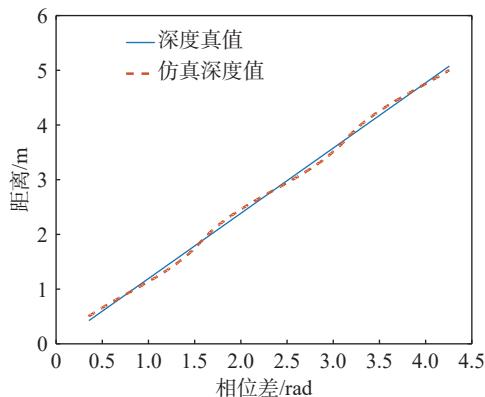


图 11 仿真深度值与深度真值的对比

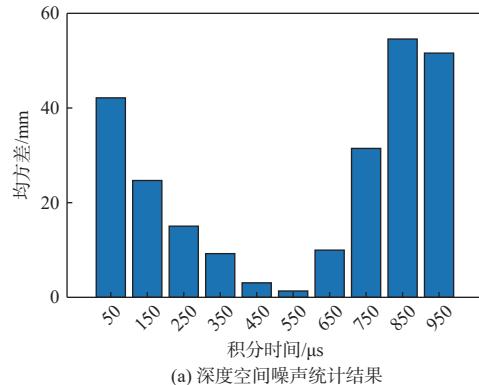
Fig. 11 Comparison of simulation depth values with depth true values

可以根据不同的距离测量范围等工况要求设定仿真模型, 选择合适的曝光时间, 避免出现灰度值过饱和的情况, 从而提高 iTOF 相机的深度测量精度。

4.2 实验验证

不同曝光时间下, 深度空间噪声统计结果和灰度值实测结果如图 12 所示。针对反照率为 0.75 左右的白色墙面, 选定距离为 0.95 m, 选择曝光时间间隔 100 μ s, 从 50 μ s~950 μ s 分别计算 iTOF 相机深度图中间 6 pixels×6 pixels 范围内的空间噪声, 如图 12(a) 所示。当曝光时间在 250 μ s~650 μ s 之间时, 深度图的均方误差小于 20 mm。对于有深度测量需求的 iTOF 相机, 曝光时间不是越大越好, 曝光时间过大, 其深度图的空间噪声也会随之增大。分析不同曝光时间 iTOF 相机的灰度值变化, 可以发现随着曝光时间的增大, 灰度值呈现先

增大到一定值后有所减小的趋势, 如图 12(b) 所示。这是由于曝光时间过大, 导致灰度值达到饱和状态, 相机工作在非线性区, 灰度值不再增大, 在灰度值到达极值后, 深度值对应的空间噪声也随着积分时间的增大而增大。当实测灰度值小于 2 600 DN 时, 灰度值未达到饱和状态, 深度值的空间噪声也在 ± 20 mm 之内。



(a) 深度空间噪声统计结果

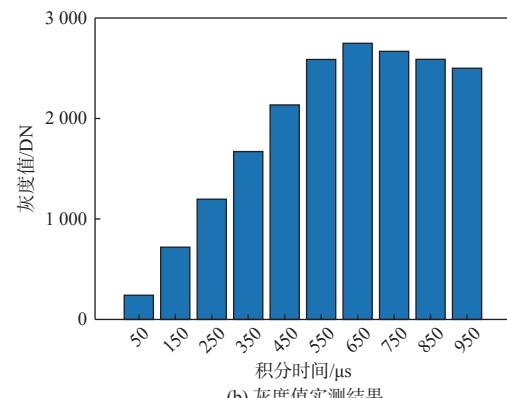


图 12 不同曝光时间的测量结果

Fig. 12 Measurement results at different exposure times

在 iTOF 相机的测量量程范围内, 根据不同距离选择合适曝光时间和反照率的靶板进行垂直成像, 保证相机工作在线性区。将实验和仿真模型的结果进行纵向对比, 如图 13 所示, 其中实线代表实际测试结果, 虚线代表模型仿真结果。相对误差如图 14 所示, 相对误差在 20% 以内, 平均相对误差为 0.16%。

通过实验结果可以证明, 基于本文提出的性能参数测量方法的灰度值建模结果与 iTOF 相机实测结果相比, 相对误差较小, 可以使用建模仿真结果指导实验中曝光时间的选择, 具有一定的普适性。根据性能参数建立仿真曲线, 依据仿真结果选择在线性区内的曝光时间, 可以有效避免使用过大的曝光时间造成的灰度过曝、深度测量空间

噪声较大的问题,可以有效提高 iTOF 相机的使用测量精度,证明本文提出的 iTOF 相机性能参数测量方法具有工程需求和应用价值。

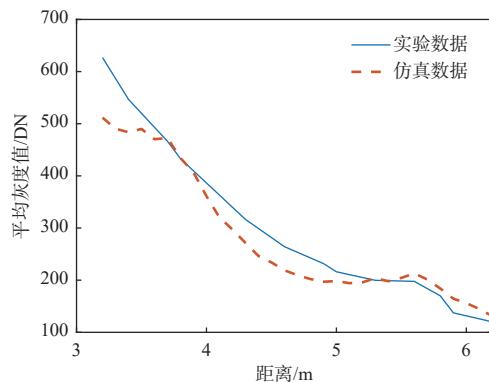


图 13 实验与模拟灰度值曲线的比较

Fig. 13 Comparison of gray value curves between experiment and simulation

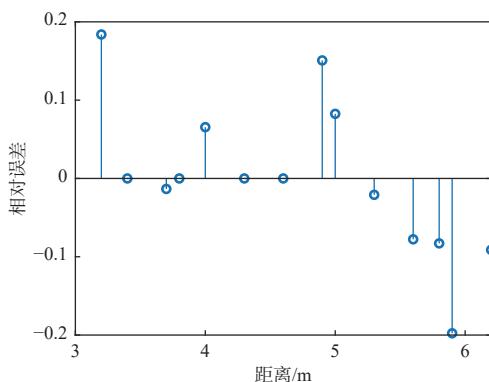


图 14 实验与模拟的相对误差

Fig. 14 Relative errors between experiment and simulation

5 结论

本文提出了一种 iTOF 相机的性能参数测量方法,通过实验得到 iTOF 相机 4 个相位灰度值均值与方差的线性关系,进而得到了 iTOF 相机实测 4 个相位的系统增益、线性响应度等性能参数。在此基础上,根据 iTOF 相机的测量原理对 iTOF 相机进行建模,得到仿真灰度值与深度值,并进行实验验证,仿真结果和实验数据的相对误差保持在 $\pm 20\%$ 以内,平均相对误差可以达到 0.16%,证明基于该性能参数测量方法的仿真结果对 iTOF 相机的使用具有一定的指导意义,对实际工程具有一定的应用价值。根据性能参数选择曝光时间,可以避免灰度过饱和引起的深度图像失真、空间噪声过大等问题,从而有效提高 iTOF 相机的深度测量精度,为后续三维点云配准和航天器定姿提

供良好的数据基础。

参考文献:

- [1] 张宗华, 刘巍, 刘国栋, 等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(6): 1483-1502.
ZHANG Zonghua, LIU Wei, LIU Guodong, et al. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(6): 1483-1502.
- [2] STYTZ M R, FRIEDER G, FRIEDER O. Three-dimensional medical imaging[J]. ACM Computing Surveys, 1991, 23(4): 421-499.
- [3] FISHMAN E K, MAGID D, NEY D R, et al. Three-dimensional imaging[J]. Radiology, 1991, 181(2): 321-337.
- [4] CHIABRANDO F, CHIABRANDO R, PIATTI D, et al. Sensors for 3D imaging: metric evaluation and calibration of a CCD/CMOS time-of-flight camera[J]. Sensors, 2009, 9(12): 10080-10096.
- [5] 魏加立, 曲慧东, 王永宪, 等. 基于飞行时间法的 3D 相机研究综述[J]. 红外技术, 2021, 43(1): 60-67.
WEI Jiali, QU Huidong, WANG Yongxian, et al. Research review of 3D cameras based on time-of-flight method[J]. Infrared Technology, 2021, 43(1): 60-67.
- [6] CHEN X B, XI J T, JIN Y, et al. Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(3/4): 310-319.
- [7] PATEL D K, BACHANI P A, SHAH N R. Distance measurement system using binocular stereo vision approach[J]. International Journal of Engineering Research & Technology, 2013, 2(12): 2461-2464.
- [8] FOIX S, ALENYA G, TORRAS C. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: a survey[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(9): 1917-1926.
- [9] RICE K, MOIGNE J L E, JAIN P. Analyzing range maps data for future space robotics applications[C]//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology. New York: IEEE, 2006: 357.
- [10] 侯飞. 基于飞行时间的三维目标点云提取和重建研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019.
HOU Fei. Research on 3D target point cloud extraction

- and reconstruction based on flight time[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Center for Space Science, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [11] KOHOUTEK T. Analysis and processing the 3D-range-image-data for robot monitoring[J]. *Geodesy and Cartography*, 2008, 34(3): 92-96.
- [12] KUEHNLE J U, XUE Z, STOTZ M, et al. Grasping in depth maps of time-of-flight cameras[C]//2008 International Workshop on Robotic and Sensors Environments. Ottawa: IEEE, 2008: 132-137.
- [13] OGGIER T, LEHMANN M, KAUFMANN R, et al. An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRanger) [C]//Optical Design and Engineering. St. Etienne: SPIE, 2004, 5249: 534-545.
- [14] GOW R D, RENSHAW D, FINDLATER K, et al. A comprehensive tool for modeling CMOS image-sensor-noise performance[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, 54(6): 1321-1329.
- [15] BELHEDI A, BARTOLI A, BOURGEOIS S, et al. Noise modelling in time-of-flight sensors with application to depth noise removal and uncertainty estimation in three-dimensional measurement[J]. *IET Computer Vision*, 2015, 9(6): 967-977.
- [16] FALIE D, BUZULOIU V. Noise characteristics of 3D time-of-flight cameras[C]//2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems. Iasi: IEEE, 2007: 229-232.
- [17] PLAUE M. Theoretical and experimental error analysis of continuous-wave time-of-flight range cameras[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(1): 1-16.
- [18] SEITEL A, DOS SANTOS T R, MERSMANN S, et al. Adaptive bilateral filter for image denoising and its application to in-vitro time-of-flight data[C]//Medical Imaging 2011: Visualization, Image-Guided Procedures, and Modeling. Lake Buena Vista: SPIE, 2011: 636-643.
- [19] PLAUE M. Denoising of continuous-wave time-of-flight depth images using confidence measures[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(7): 077003.
- [20] MOSER B, BAUER F, ELBAU P, et al. Denoising techniques for raw 3D data of TOF cameras based on clustering and wavelets[C]//Three-Dimensional Image Capture and Applications 2008. San Jose: SPIE, 2008: 68050E.
- [21] EDELER T, OHLIGER K, HUSSMANN S, et al. Time-of-flight depth image denoising using prior noise information[C]//IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings. Beijing: IEEE, 2010: 119-122.
- [22] SCHÖNER H. Image processing for three-dimensional scans generated by time-of-flight range cameras[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, 21(2): 023012.
- [23] LENZEN F, SCHÄFER H, GARBE C. Denoising time-of-flight data with adaptive total variation[M]//Advances in Visual Computing. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 337-346.
- [24] LANGE R, SEITZ P. Solid-state time-of-flight range camera[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(3): 390-397.
- [25] HORAUD R, HANSARD M, EVANGELIDIS G, et al. An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies[J]. *Machine Vision and Applications*, 2016, 27(7): 1005-1020.
- [26] 卢纯青, 宋玉志, 武延鹏, 等. 基于 TOF 计算成像的三维信息获取与误差分析[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 160-166.
- LU Chunqing, SONG Yuzhi, WU Yanpeng, et al. 3D information acquisition and error analysis based on TOF computational imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 160-166.
- [27] European Machine Vision Association. EMVA standard 1288: standard for characterization of image sensors and cameras[EB/OL]. (2016-12-30)[2023-1-30]. <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.1a.pdf>.
- [28] JANESICK J, KLAASEN K, ELLIOTT T. CCD charge collection efficiency and the photon transfer technique [C]//Solid-State Imaging Arrays. San Diego: SPIE, 1985, 570: 7-19.
- [29] JANESICK J R, KLAASEN K P, ELLIOTT T. Charge-coupled-device charge-collection efficiency and the photon-transfer technique[J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(10): 972-980.
- [30] WIDENHORN R, BLOUKE M M, WEBER A, et al. Temperature dependence of dark current in a CCD[C]//Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications III. San Jose: SPIE, 2002, 4669: 193-201.
- [31] GARCIA J E, DYER A G, GREENTREE A D, et al. Linearisation of RGB camera responses for quantitative image analysis of visible and UV photography: a comparison of two techniques[J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e79534.