

ADI Analog Dialogue

ToF系统设计—第2部分: 飞行时间景深测量 摄像头的光学设计

Tzu-Yu Wu, 高级光学设计工程师

摘要

光学器件在飞行时间(ToF)景深测量摄像头中起着关键作用, 光学设计决定了最终系统的复杂性和可行性及其性能。3D ToF 摄像头有一些独特的特性¹,因此其在光学方面有一些特殊 要求。本文介绍景深测量光学系统架构,其由成像光学子组 件、接收器上的ToF传感器和发射器上的照明模块组成,并讨 论如何优化每个子模块以提高传感器和系统性能。

简介

ToF是一种新兴3D检测和成像技术,广泛应用于自动驾驶车辆、 虚拟和增强现实、特征识别、物体尺寸标注等领域。ToF摄像头 通过测量光线从光源行进到场景中的物体再返回像素阵列所需 的时间来获取景深图像。ADI公司的ADSD3100背光照明(BSI) CMOS传 感器实现的特定技术称为连续波(CW)调制,它是一种间接ToF检 测方法。在CW ToF摄像头中,来自幅度调制光源的光线被摄像头 视场(FOV)中的物体反向散射,然后测量发射波形和反射波形之 间的相移。通过测量多个调制频率下的相移,便可计算每个像 素的景深值。利用像素内光子混合解调,测量不同相对延迟下 发射波形与接收波形之间的相关性,可以获得相移²。CW ToF的概 念如图1所示。



图 1. ToF 技术概念

景深测量光学系统架构

图2显示了光学系统架构。它可以分为两个主要子模块:成像模块(也称为接收器或Rx)和照明模块(也称为发射器或Tx)。 下面介绍每个组件的功能、ToF系统特有的要求以及相应的设计示例。

照明模块

照明模块由光源、以高调制频率驱动光源的驱动器、将光束从 光源投影到设计的照明区(F0I)的漫射器组成,如图2所示。



图 2. ToF 光学系统架构横截面示例

光源和驱动器

ToF模块通常使用波长的温度相关性较低的窄带光源,包括垂 直腔面发射激光器(VCSEL)和边缘发射激光器(EEL)。发光二极管 (LED)一般太慢,不满足ToF调制要求。近年来,VCSEL由于成本较 低、外形尺寸小、可靠性高且易于集成到ToF模块中而越来越 受欢迎。与EEL(光线从侧面射出)和LED(光线从侧面和顶部 射出)相比,VCSEL射出的光束垂直于其表面,故生产良率更高 且制造成本更低。另外,期望的FOI可以利用单个特别开发的、 具有设计的散度和光学剖面的漫射器来实现。激光驱动器的优 化、印刷电路板(PCB)和光源的电气设计与布局,对于实现高调 制对比度和高光功率至关重要。

照明波长(850 nm与940 nm)

ToF工作原理不依赖于光波长(相反,它依赖于光速),因此波 长不应影响精度,但在某些使用场景中,波长的选择可能影响 系统级性能。下面是选择波长时的一些考虑:

▶ 传感器量子效率和响应度:

量子效率(QE)和响应度(R)彼此相关。

■ QE衡量光电探测器将光子转换为电子的能力。

■ R衡量光电探测器将光功率转换为电流的能力

响应度 =
$$\frac{\mathcal{H}$$
电探测器产生的电流
光电探测器上的光功率 A/W (2)
 $R = QE \times \frac{q}{hc/\lambda}$

其中, q为电子电荷, h为普朗克常数, c为光速, λ为波长。

通常, 硅基传感器在850 nm时的0E要比940 nm时高大约2倍或 更多。例如, ADI CW ToF传感器在850 nm时的0E为44% 0E, 在 940 nm时为27%。对于等量照明光功率, 0E和R越高,则信噪比 (SNR)越好, 尤其是当没有多少光返回传感器时(遥远或低反 射率的物体就是这种情况)。 ▶ 人类感知

人眼对近红外(NIR)波长范围的光不敏感,但人眼可以感知 850 nm的光。另一方面,人眼看不到940 nm的光。

▶ 太阳光

虽然可见光谱区域中的太阳光最强,但NIR区域中的能量仍然 很大。阳光(更一般地说是环境光)会增加景深噪声,缩短 Tof摄像头的有效距离。幸运的是,由于大气吸收,阳光辐照 度在920 nm至960 nm区域中急剧下降,与850 nm区域相比要小 一半以上(参见图3)。在室外应用中,工作在940 nm的ToF系 统可以更好地抑制环境光,实现更好的景深测量性能。



图 3. 太阳光谱辐照度 (NIR)3

辐射强度(每立体角的光功率)

光源产生恒定的光功率,其分布到漫射光学元件所产生的F0l内 的三维空间中。随着F0l增大,每立体弧度(sr)承受的能量——即 辐射强度[W/sr]——减小。了解F0l和辐射强度之间的消长关系很 重要,因为这会影响ToF系统的SNR,进而影响景深范围。

表1列出了FOI的几个例子及其对应的辐射强度(归一化为 60°×45°F0I的辐射强度)。注意、辐射强度计算为每个矩形立体 角的光功率。

表1. 归一化辐射强度

案例	水平FOI	垂直FOI	归一化辐射强度
1	60°	45°	100%
2	52°	52°	100%
3	60°	60°	76%
4	72°	58°	67%
5	78°	65°	56%

照明剖面规格

为了全面定义照明剖面,应当清楚地指定若干特性,包括剖面 形状、剖面宽度、光效率(即某个FOV内围住的能量)及FOI外的 光功率衰减。照明剖面规格一般用角域中的辐射强度来定义, 其数学表达式为

$$I = -\frac{d\Phi}{d\Omega}$$
(3)

其中dφ为射入立体角dω的功率。F0I需要匹配成像器的纵横比, 因此一般是正方形或矩形。

▶ F0I内的照明剖面形状

Illumination Profile ~ cos⁻ⁿ(Θ)

ToF泛光照明的最常见辐射强度剖面呈蝙蝠翼形状,其剖面以 cos[¬](θ)变化,以补偿成像透镜的衰减 (即相对照度)。图5显 示了蝙蝠翼形照明剖面的例子。如果希望一个平坦目标在成 像器的像素阵列上实现恒定辐照度,则还应考虑目标中心与 目标边缘之间的辐照度(E)以cos3(θ)的衰减因子衰减[W/m²],定 义如下:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I(\theta)\cos(\theta)}{R(\theta)^2} = \frac{I(\theta)\cos^3(\theta)}{R_0^2}$$
(4)

其中, E为辐照度, dA为光功率dφ照射的表面积, R(θ)为图4中定 义的光源到dA的距离, $d\Omega = dAcos(\theta)/R(\theta)^2$ 。

(a) Radiant Intensity (Cross-Section)

FOI (FWHM)







FOV of the Imaging Lens (c) Radiant Intensity (Top View)

图 5. 照明剖面示例



图 4. 辐照度分布与强度的关系

▶ 剖面宽度

剖面的宽度决定照明剖面的FOL。它可以定义为最大强度的全 宽半峰或1/e²。为了适应成像透镜与成像器之间的对准误差以 及漫射器的容差、FOI一般设计成略大于透镜的FOV、以避免 暗像素。

剖面的宽度是光源的强度剖面到漫散器对准直光束的响应 的卷积。漫射器的输入散度角越宽,则剖面宽度越宽,过 渡斜坡越慢。更宽且更慢的过渡斜坡会导致更多能量落在 FOI外部,造成光功率损耗。这种损耗的接受标准可以利用 以下两个要求指定。

▶ 光效率——成像透镜F0V内围住的能量

该规格定义成像模块将收到多少能量,规定如下:

透镜
$$FOV内的二维积分$$

光效率 = $\frac{光功率}{2}$ % × 漫射器的透射 (5)
整个照明剖面的二维积分
光功率

图5c显示了FOV内的照明剖面的二维积分的概念。

▶ F0l外的光功率衰减

照明剖面总积分 –
FOI外的光功率衰减 =
$$\frac{FOI内的照明剖面积分}{BBB副面包积分}$$
% (6)

一般来说,在光源和漫射器之间设置一个准直透镜以减小漫 射器的输入角度,或者选择散度角更小的光源,可以改善光 效率。

成像模块

成像模块由成像透镜组件、带通滤波器(BPF)和成像器上的微透 镜阵列组成。成像器上的背面光学堆叠的厚度和材料应优化, 以降低背反射。图6为成像模块的插图。



图 6. 成像模块插图

ToF成像透镜设计考虑

ToF摄像头收集主动照明产生的光,因此像素阵列上光收集的 效率和均匀性对整体性能有重大影响。透镜需要具有强收集能 力、高透射性和低杂散光。以下是ToF透镜的设计考虑因素,其 与传统的RGB摄像头透镜不同。

▶ 光收集效率

光收集效率与1/(f/#)°成比例,其中f/# = (焦距)/(孔径大小)。f/# 越小,效率越高。小f/#光学系统有利也有弊。当孔径增大 时,暗角和像差往往更大,使得光学元件更难以设计。小 f/#系统的景深往往较浅。

▶ 相对照度(RI)和主光角(CRA)

RI定义为:

在无失真、无暗角的透镜系统中,传感器照度以(cos q)定律减小,其中q为传感器平面上的CRA入射角。结果是越趋向传感器边界,图像相对越暗。在透镜系统中引入负失真,可以减少辐照度衰减。

传感器边缘处的最大CRA应基于成像器微透镜阵列规格进行 优化。较小的CRA有助于缩小BPF的带宽,从而实现更好的环 境光抑制。 以下例子展示了CRA和视场上的聚焦光锥尺寸如何影响Rl。 随着场角增大,图7中示例1的透镜系统具有更大的CRA和逐 渐减小的成像锥(即更大的f/#)。相应的Rl随着场角显著下 降,如相应的Rl图所示。图7中的示例2表明,使CRA最小化并 让视场上的f/#保持均匀,便可很好地维持Rl。

▶ 杂散光

杂散光是系统中可以由传感器检测到的意料之外的光。杂 散光可以来自场内或场外源,其通过偶数次反射形成"鬼 影"(例如透镜光斑)。杂散光也可以从光机械结构和任 何散射表面散发出来。ToF系统对杂散光特别敏感,因为杂 散光的多路径特性会对一个像素产生不同的光路长度,导 致景深测量不准确。设计过程中需要采取多种策略来减少 杂散光,例如:抗反射(AR)镀膜和机械孔径的优化,使透镜 边缘和安装结构变暗,以及定制设计BPF以优化波长和CRA。

以下是可能影响系统中的杂散光的一些物品:

■ 暗角

理想情况下,ToF透镜系统中不应该有任何暗角。暗角会截 断成像光线,有时用作提高图像质量的技术,但外围视场 的亮度会受影响。然而,截断的光线常常在透镜系统内反 弹,往往会引起杂散光问题。

■ AR镀膜

光学元件上的AR镀膜可降低每个表面的反射率,并且能有效 降低透镜反射对景深计算的影响。应针对光源波长范围和 透镜表面上入射角的角度范围仔细设计AR镀膜。

■ 透镜元件数量

虽然增加更多透镜元件可以为实现设计规格和更好的图像 质量(就分辨率而言)提供更大的自由度,但这也会带来 不可避免的背反射,并且提高复杂性和成本。

带通滤波器(BPF)

BPF会截断环境光贡献,对于ToF系统至关重要。BPF设计应根据以下参数量身定制,以便拥有出色性能。

- (a) 透镜参数, 例如视场上的f/#和CRA
- (b) 光源参数, 例如带宽、标称波长容差和热漂移
- (c) 衬底材料特性,相对于波长的低入射角漂移或低热 漂移
- ▶ 微透镜阵列

ToF背光照明(BSI)传感器一般具有一个微透镜阵列层,它会汇 聚入射到图像传感器的光线,使到达像素调制区域的光子 数量最大化。微透镜的几何形状经过优化,以在光子转换 为电子的像素区域内实现最高吸收。



图 7. 相对照度示例

在许多透镜设计中,越靠近传感器的边缘,图像高度越高,透镜的CRA随之增大,如图8所示。当CRA过大时,偏斜入射会导致像素的吸收损耗和相邻像素之间的串扰。设计或选择成像透镜时,应使透镜的CRA与微透镜阵列的设计规格匹配,这点很重要。例如,在传感器的水平和垂直边缘,与ADI ToF传感器ADSD3100匹配的最佳CRA约为12°。



图 8. 成像透镜的最大 CRA

结论

为了实现优化性能,ToF光学元件具有独特的要求。本文概述了 3D ToF摄像头光学架构以及照明和成像子模块的设计指南,以帮 助设计这种光学系统和/或选择子组件。对于照明子模块,关 键因素有功率效率、可靠性和在高调制频率下以高调制对比度 驱动光源的能力。本文详细讨论了850 nm和940 nm的波长选择考 虑,以及如何指定照明剖面。对于成像子模块,透镜设计考虑 因素包括f/#、与微透镜规格相匹配的CRA和杂散光控制,这些 因素对于系统级性能至关重要。

参考资料

- Paul O'Sullivan和Nicolas Le Dortz。"飞行时间系统设计——第1部分: 系统概述"。《模拟对话》,第55卷第3期,2021年7月。
- Cyrus S. Bamji、Swati Mehta、Barry Thompson、Tamer Elkhatib、Stefan Wurster、Onur Akkaya、Andrew Payne、John Godbaz、Mike Fenton、Vijay Rajasekaran、Larry Prather、Satya Nagaraja、Vishali Mogallapu、Dane Snow、Rich McCauley、Mustansir Mukadam、Iskender Agi、Shaun McCarthy、Zhanping Xu、Travis Perry、William Qian、 Vei-Han Chan、Prabhu Adepu、Gazi Ali、Muneeb Ahmed、Aditya Mukherjee、Sheethal Nayak、Dave Gampell、Sunil Acharya、Lou Kordus 和Pat O' Connor。"拥有3µm全域快门像素和模拟储存技术的 IMpixel 65nm BSI 320MHz解调TOF图像传感器(IMpixel 65nm BSI 320MHz demodulated TOF Image sensor with 3µm global shutter pixels and analog binning)"。2018年IEEE国际固态电路会议(ISSCC)、2018年2月。
- ³ "参考空气质量1.5光谱(Reference Air Mass 1.5 Spectra)"。 国家可 再生能源实验室。



作者简介

Wu是ADI公司的高级光设计工程师。她领导ADI公司针对飞行时间(ToF)技术的光学元件开发,并从事如下 工作:成像透镜、照明光学元件的光学设计,杂散光分析,以及背光照明CMOS ToF传感器的微透镜阵列 和光学堆叠的优化。在加入ADI公司之前,她在Canon U.S.A.工作,从事超小型内窥镜和心血管成像导管等 先进医学成像系统的开发。她获得了亚利桑那大学光学硕士学位和博士学位,以及台湾大学的物理学 硕士学位。她的博士研究专注于高分辨率成像设备的开发;通过微创手术,此类设备能够快速检测早 期癌症。联系方式: tzu-yu.wu@analog.com。



如需了解区域总部、销售和分销商,或联系客户服务和 技术支持,请访问<u>analog.com/cn/contact</u>。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解答,或参与EngineerZone在线支持社区讨论。 请访问ez.analog.com/cn。 ©2021 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。 商标和注册商标属各自所有人所有。

"超越一切可能"是ADI公司的商标。



请访问analog.com/cn