

乘员舱大角度飞行时间相机的设计与验证

吴凤占 周可

(采埃孚汽车科技上海有限公司, 上海 210600)

【摘要】针对汽车乘员舱飞行时间(TOF)相机可视角度小、无法兼顾前排所有成员等问题,提出一种TOF相机设计方案,通过热设计仿真的方式解决了TOF相机的散热问题,并通过对TOF相机镜头的光学设计与仿真,有效扩大了相机的视场角(FOV),同时进行了完整的设计验证试验,结果表明,该系统完整实现了TOF相机的功能,并可以大角度视场覆盖车内前排乘员,且满足车规级性能要求。

关键词:飞行时间相机 视场角 高功率垂直腔面发射激光器

中图分类号:TN219

文献标志码:A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230367

Large FOV TOF Camera Design and Validation in Cabin

Wu Fengzhan, Zhou Ke

(ZF Automotive Technology Co., Ltd, Shanghai 210600)

【Abstract】Current Time Of Flight (TOF) camera products have problems such as small viewing angle, and inability to consider all passengers in the front row. To address this issue, this article proposed a design method for TOF cameras, which solved the heat dissipation problem through thermal design simulation, and effectively expanded the camera's Field Of View (FOV) through optical design and simulation of the TOF camera lens. At the same time, a complete design verification test was conducted to verify the performance of the TOF camera product. The results show that the system fully realizes the functions of the TOF camera, cover the passengers in the front row with a large FOV, and meets the performance requirements of the automotive grade.

Key words: Time Of Flight (TOF) camera, Field Of View (FOV), High power Vertical-Cavity Surface-Emitting Lighting (VCSEL)

【引用格式】吴凤占,周可.乘员舱大角度飞行时间相机的设计与验证[J].汽车技术,2024(3):35-42.

WU F Z, ZHOU K. Large FOV TOF Camera Design and Validation in Cabin[J]. Automobile Technology, 2024(3): 35-42.

1 前言

飞行时间(Time Of Flight, TOF)相机已广泛应用于工业安防、消费电子等领域,在汽车领域的应用还处于起步阶段。

目前,针对TOF相机的研究大部分聚焦于其误差校正与空间匹配问题。文献[1]总结了TOF相机的原理并提出了极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)空间匹配模型。文献[2]阐述了相机二维数据与空间三维数据的一种融合方法。文献[3]结合TOF相机的应用提出了一种光学镜头的优化方法。由于TOF相机属于新型产品,其工程应用

方案设计研究仍较少涉及,行业内关于TOF相机系统构成的研究较少。文献[4]提出了一种TOF相机的设计方案,但主要基于制造商提供的原始设计方案,为便于实现上位机的功能,增加了很多冗余设计,性价比较差,无法量产应用。文献[5]设计了一种TOF相机的主芯片,但未形成系统方案。

因此,本文根据车载应用需求,在满足车规级要求的条件下,提出一种低成本的TOF相机解决方案,并进行试验验证。

2 TOF相机成像原理

TOF相机通过发射端发射一定波长的光束,并

通过接收端接收该光束,从而测量光束的往返时间,计算反射目标点与相机的距离。

TOF 技术分为直接飞行时间 (direct Time Of Flight, dTOF) 和间接飞行时间 (indirect Time Of Flight, iTOF) 两类。iTOF 技术从实现方式上又分为基于脉冲波 (Pulse Wave, PW) 和基于连续波 (Continuous Wave, CW) 两种,区别为光波的调制方式不同,本文主要针对连续波技术进行研究。

iTOF 的测距原理为,由激光发射器调制一定波长的红外光,图像传感器在曝光时间内接收反射光并进行光电转换,曝光结束后读取曝光 (积分) 时间内累计的电荷数,经过模拟转数字信号单元将电荷差对应到每个像素的相位偏移。常用算法为四相位采样算法,利用 4 个相位延迟分别为 0° 、 90° 、 180° 和 270° 的采样信号计算深度。计算发射端与接收端的相位差,从而获得目标物体的距离信息。

如图 1 所示,接收信号的光强分别表示为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 ,可以看出,接收信号光强比发射信号光强低。对接收光强进行积分可得 TOF 相机测得的距离为^[4]:

$$d = \frac{c \cdot \arctan\left(\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4}\right)}{2 \times 2\pi f} \quad (1)$$

式中: d 为相机与被测物体的距离, f 为调制频率, c 为光速。

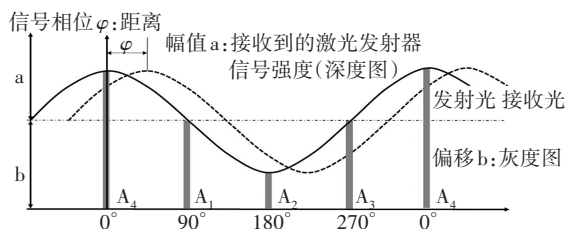


图 1 TOF 的四相位图

iTOF 技术的优点是图像分辨率较高,一般可以达到 640 像素×480 像素分辨率级别,且相机模组类似于传统相机,故制造工艺较简单、成本较低。但 iTOF 技术不同位置距离计算出的相位偏移均会落在 $0 \sim 2\pi$ 范围内,因此相同的相位解算结果对应不同的距离结果,即存在模糊距离的问题,且无法做到远距离探测^[6]。

整车乘员舱内监控应用场景中,所需测量距离较短,且后期算法对图像分辨率要求较高,因此一般选择 iTOF 技术方案。

3 iTOF 相机设计方案

3.1 总体设计方案

iTOF 相机的整体电气设计方案采用全车规级

电子器件设计,并采用两级电源为系统供电,使用串行器将 TOF 的信号输出,iTOF 相机的系统设计框图如图 2 所示。

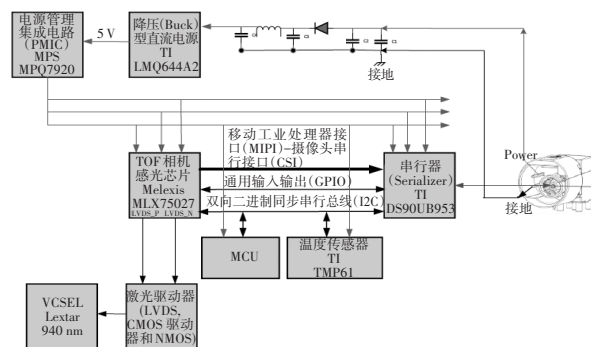


图 2 iTOF 相机系统框图

3.2 镜头设计

TOF 相机主要接收波长为 940 nm 的红外光源,因此相机上主要使用红外镜头,红外镜头与普通镜头在镜片材料、滤波特性、光源折射率上有较大差异^[7]。本文设计的 TOF 相机主要应用在乘员舱内,周边环境较为固定,乘员舱内尺寸和测试目标的距离范围变化不大,因此红外镜头主要采用定焦镜头,同时视场范围需覆盖驾驶员和前排乘员。根据此应用场景进行产品光学设计目标的拆分,镜头的设计指标如表 1 所示。

表 1 TOF 镜头设计指标

项目	指标
传感器长度×宽度×对角线长度/mm×mm×mm	6.4×4.8×8
水平视场角/(°)	130
垂直视场角/(°)	110
中心波长/nm	940
后焦距/mm	<3
光学总长/mm	<20
光圈数	<1.4
最大像圈直径/mm	<8.4
相对照度/%	>40
光学畸变(全视野)/%	<6
光学滤波精度/nm	±10
调制传递函数(MTF)/对·mm ⁻¹	50
防护等级	IP5K2
镜头接口	主动对准(Active Alignment, AA)
工作温度/°C	-40~85

3.2.1 镜片设计

TOF 相机的镜头设计主要分为镜片、镜筒和底座的设计,其中镜筒和底座的设计以机械设计为主,镜片设计主要是光学设计,主要在 Zemax-

OpticalStudio 光学仿真软件中进行。

3.2.1.1 调制传递函数

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 表征成像系统将分辨率转换为对比度的能力。

MTF 的仿真结果如图 3 所示,其中,视场设置为 0F、0.3F、0.5F、0.7F、0.9F、1.0F。1.0F 指 1 视场,即镜头对角尺寸像高所对应的角度,频率最高设置为 50 线对/mm, $N_y=500/p_e$ (p_e 为像元尺寸) 为极限频率。从图 3 中可以看出,0F 的解像力 >0.6 周期/mm,在 0.5F 的角度上解像力大于 0.5 周期/mm,在 0.7F 的角度上解像力大于 0.3 周期/mm,镜头的解像力足够,满足 TOF 相机的设计要求。

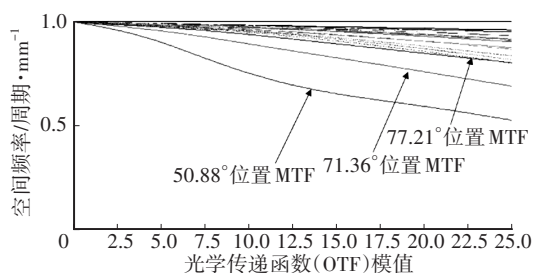


图3 MTF 的仿真结果

3.2.1.2 标准点列图

理想光学系统的点列图 (Spot Diagram) 为一个点,但由于实际光学系统存在各种公差,所以点列图表现为一个弥散斑,本文 TOF 镜头的点列图仿真结果如图 4 所示,其中, L 为像面距离, α 为物面角度。

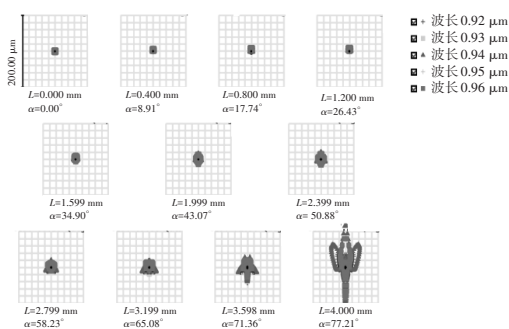


图4 标准点列图

由图 4 可以看出,点列图的像面在不同的视场中呈现不同的弥散范围,最终弥散斑的直径均小于艾里斑 (Airy Spot),满足光学系统的工作要求。

3.2.1.3 垂轴色差

垂轴色差 (Lateral Color) 的仿真结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,垂轴色差在 940 nm 处表现出非常低的色偏特性,在 930~950 nm 的波长范围内,以整个艾里斑为边界,最大视场角可以达到 77.052 6°,满足设计要求。

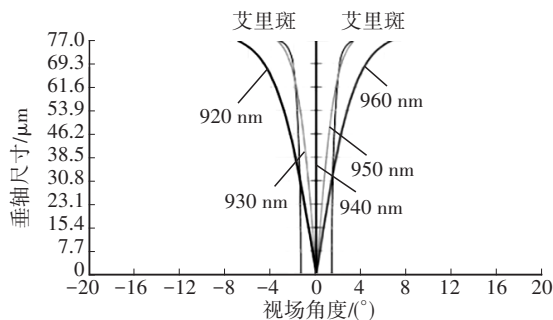


图5 垂轴色差仿真曲线

3.2.1.4 轴向像差

轴向像差 (Longitudinal Aberration) 的仿真结果如图 6 所示。由图 6 可知,初始和中间位置的轴向像差较大,但是在 0.6 倍入瞳处减小为 0,可以接受。

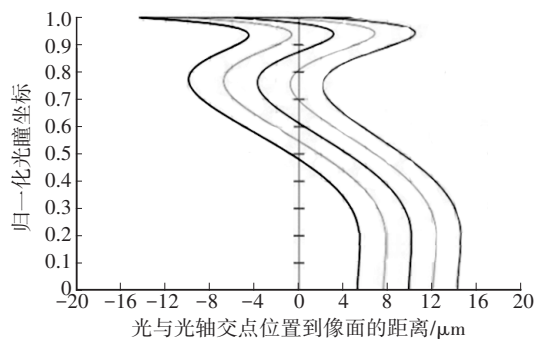


图6 轴向像差仿真曲线

3.2.1.5 场曲和畸变

通过 Zemax 仿真镜头设计的场曲和畸变 (Field Curvature and Distortion) 如图 7 所示。可以看出,子午面和弧矢面处的场曲分别为 0.111 9 mm 和 0.042 3 mm,整个镜头的场曲较小,满足设计要求。

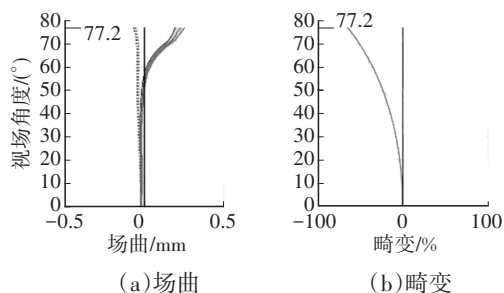


图7 场曲和畸变仿真结果

3.2.1.6 相对照度

相对照度 (Relative Illumination) 是指平面不同坐标点的照度与中心照度之比,计算公式为:

$$E = E_0 \cdot \cos^4 \omega \quad (4)$$

式中: E 为相对照度, E_0 为中心点相对照度, ω 为像方视场角。

相对照度的仿真结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,940 nm 红外光入射最大视场角 (77.1°) 处

的相对照度大于40%,满足本文对图像传感器的要求。

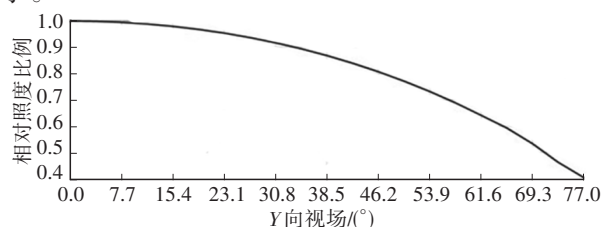


图8 相对照度的仿真结果

通过以上分析可以看出,TOF镜头的设计在仿真优化后,在有效视场角范围内,可以实现较高的对比度,同时成像通透,分辨率和锐度高,成像

清晰。此外,MTF弧矢方向和子午方向上的曲线接近,说明镜头的成像偏自然,无过度虚化产生。

3.2.2 镜筒设计

镜筒的设计需考虑整车的环境适应性,即表1提出的环境和适应性要求。镜筒的材料选择需考虑防水、轻量化、体积小需求,并保证在高、低温环境下的形变小,避免对镜头的焦距及光圈数产生影响。目前,典型的镜筒材料特性^[8]如表2所示。

上述材料中,ZTC4和7A09均符合使用要求,综合材料特性和性价比,镜筒和底座采用7A09铝合金,并使用氧化发黑工艺提高镜筒的光学性能。

表2 典型的镜筒材料特性

材料	密度/kg·m ⁻³	弹性模量/GPa	比刚度	热膨胀系数	导热率/W·(m·K) ⁻¹	比热容/J·(kg·°C) ⁻¹
TC4钛合金	4.44	109	2.45	9.1	7.4	611
7A09铝合金	2.8	71	2.54	23.6	142	904
碳纤维增强复合材料(CFRP)	1.8	95	5.28	0~1	70	
ZTC4铸造钛合金	4.4	114	2.59	0.9	8.8	577
T300B碳纤维	1.8	31	1.72		8.5	

为保证TOF镜头更好地接收920~960 nm波长的红外光,在TOF相机底部镜片上贴敷一块红外光滤波器,用于过滤920~960 nm波长范围外的光线^[9]。此外,在TOF相机镜桶上设计螺纹结构,用于镜筒与镜头底座的连接。镜头总长小于20 mm,满足设计要求,镜头设计如图9所示。

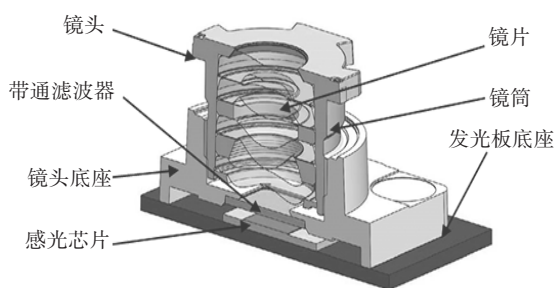


图9 TOF相机的镜头设计

3.3 激光发射器设计

激光发射器采用垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Lighting, VCSEL),相比于其他激光发射器,其具有体积小、集中输出激光功率高、光束质量高、精度高、波长受温度的影响小、寿命长的特点。针对车规级TOF的应用,VCSEL器件需要满足车规级的工作温度范围、环境和可靠性的要求。

根据文献[10]中的光量子结论,TOF相机的光

功率计算公式为:

$$P_{source} = \frac{N_e \times \frac{A_{img}}{A_{pixel}} \times hc}{\rho \times \left(\frac{D}{2L}\right)^2 \times K_{lens} \times E(\lambda) \times \lambda \times T_{exp}} \quad (5)$$

式中: P_{source} 为光源功率, N_e 为自然界中的光子数量, A_{img} 为光学传感器的感光面积, A_{pixel} 为光学传感器上的像素面积, h 为普朗克常数, ρ 为被测物体的反射系数, D 为镜头的光圈孔径, L 为被测物体与相机的距离, K_{lens} 为相机镜头和光谱滤波器光功率损耗系数, $E(\lambda)$ 为传感器在波长为 λ 时的量子效率, λ 为光波长, T_{exp} 为传感器的曝光时间。

由式(5)可以看出,TOF相机的发射功率与传感器的量子效率、像素感光面积、光谱滤波器、相机曝光时间、镜头相关参数及物体的反射率、测量距离均有关。根据乘员舱内应用场景设置最大探测距离为3 m,按照表1中镜头的设计参数,以及VCSEL 940 nm的红外光条件,假设被测物体为黑色,反射率为0.1,VCSEL的最小发射功率为8.924 W,故选择Lextar的PV85QE4系列激光发射器,VCSEL端的发射角度不小于 $130^\circ \times 110^\circ$,顺向电流4.5 A、单颗功率6.5 W,选用2颗VCSEL进行串联,该VCSEL器件的视场角及典型的发射光强密度仿真结果如图10所示。

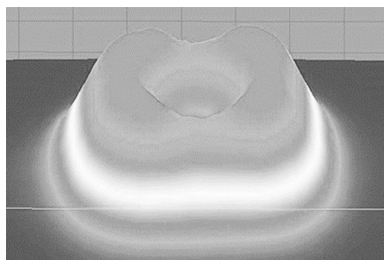


图10 VCSEL发光密度仿真结果

VCSEL中灯的驱动使用一个快速开关N型金属-氧化物-半导体(N-Metal-Oxide-Semiconductor, NMOS)管作为驱动控制单元,整个VCSEL的发光控制由感光芯片MLX75027的低电压差分信号(Low Voltage Differential Signaling, LVDS)总线输出。LVDS总线不具有驱动能力,因此将LVDS总线转换成互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)单端信号驱动快速开关NMOS管。VCSEL激光发射器的电路设计框图如图11所示。

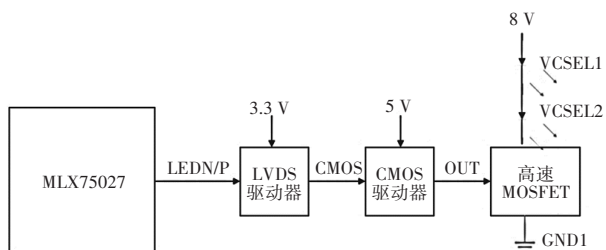


图11 VCSEL激光发射器电路框图

3.4 相机结构设计

相机的硬件分为主板、感光板,主板和感光板之间采用软排线连接。镜头底座通过螺钉固定在主板上,与镜筒采用螺纹安装,调焦后粘接固定。发光板采用螺钉固定在外壳上,TOF相机的外壳分为上、下壳2个部分,考虑到散热性能,上、下壳均使用A380铝合金材质,采用压铸铝工艺加工。TOF相机的部件装配图如图12所示。

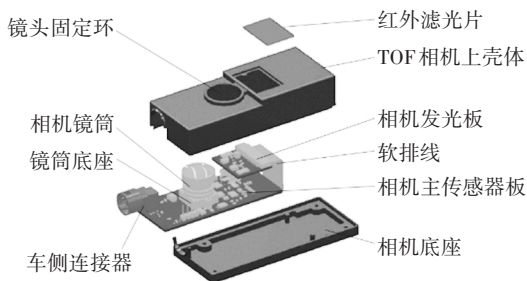


图12 TOF相机的零件装配图

整个TOF相机的尺寸为95 mm×35 mm×21 mm,适合整体安装在整车顶棚、内后视镜及阅读灯位

置。另外,根据不同的整车配置要求,可以与中控屏幕集成,实现屏下相机方案。

4 TOF相机的仿真与测试

除基本光学仿真外,还需考虑热特性。TOF相机需要满足在车规环境中的-40~85 °C的环境使用要求,同时,考虑到芯片的热稳定性,最高温升不能超过结温,另外,温漂对测量精度也存在一定影响。

使用ANSYS进行热特性仿真,在ANSYS中进行建模,如图13所示,底部为传感器板,传感器板上布置了感光芯片、电源芯片、串行器等,下板的材质为FR-4铺铜,6层印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)设计,铺铜率为75%,上层为发光板。

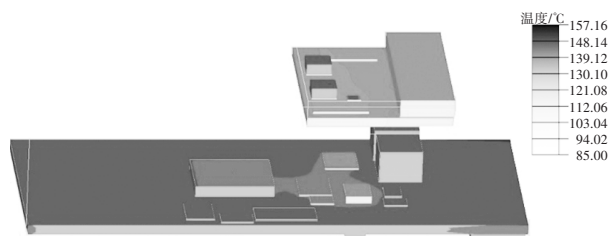


图13 TOF相机的热学仿真结果

TOF相机的热设计主要进行以下优化:对传感器中的PCB设计走线进行优化,增加周围覆铜,并且增加散热孔;底部增加散热硅胶,并使其接触到TOF的铸铝外壳,增加散热面积;外壳增加散热鳍。将优化后的设计方案导入ANSYS后,主要器件的仿真结果如表3所示,其中, R_{jc} 、 R_{jb} 分别为芯片的结合部到芯片封装表面、PCB的热阻。

表3 TOF相机85 °C下热仿真优化结果

器件	功率/W	温度/°C	最大结温/°C
电源芯片1	0.26($R_{jc}=19\text{ °C/W}$, $R_{jb}=19.2\text{ °C/W}$)	102.9	125
电源芯片2	0.416	101.0	125
传感器芯片	0.302($R_{jc}=45.8\text{ °C/W}$, $R_{jb}=23.4\text{ °C/W}$)	102.0	125
串行器芯片	0.324($R_{jc}=20\text{ °C/W}$, $R_{jb}=10.9\text{ °C/W}$)	102.2	125
驱动器芯片1	0.018	96.1	125
驱动器芯片2	0.012($R_{jc}=87.3\text{ °C/W}$, $R_{jb}=30.8\text{ °C/W}$)	96.0	150
存储芯片	0.0007	96.0	125
激光发射器1	0.664	106.5	150
激光发射器2	0.664	107.1	150
开关管	0.259($R_{jc}=6.5\text{ °C/W}$, $R_{jb}=65\text{ °C/W}$)	106.7	150

由表3可以看出,经散热优化后,整体温度有所下降,根据器件的最高结合点的温度来判断,目前主要器件的热温升结果均满足高温85℃下的使用要求。

5 TOF相机的软件设计

5.1 软件框架

TOF相机主要的应用层软件运行在主机侧,主机侧的软件包含了TOF传感器的寄存器设定、工作模式控制等功能。主机和TOF传感器侧主要使用集成电路总线(Integrated Circuit, IIC)进行通信,从原始数据中分离出灰度图像,深度图像的提取及深度图像与灰度图像的空间匹配主要由主机侧算法完成。同时,主机侧算法进行原始图像的噪声去除、失效像素的过滤等。图像数据通过视频串行通讯(Flat Panel Display Link III, FPD-LINK III)总线协议进行数据的传输。TOF相机的软件框架如图14所示。

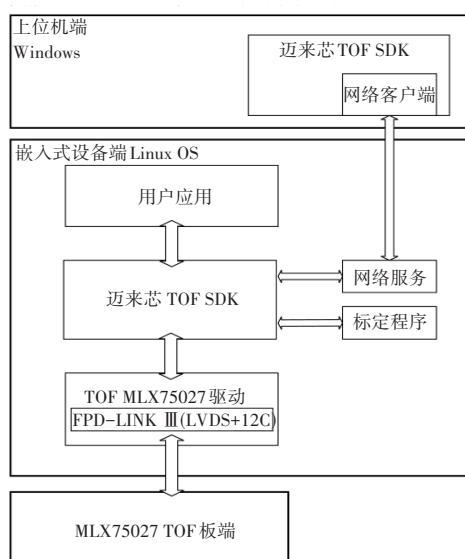


图14 TOF相机软件框架

5.2 测试验证

TOF相机的测试验证分为系统调试(包括TOF镜头的内参测试,上位机软件的匹配调试等)和对TOF相机测量的目标点距离进行标定比较2个步骤。系统调试框图如图15所示,所有测试在试验室环境下进行,如图16所示。

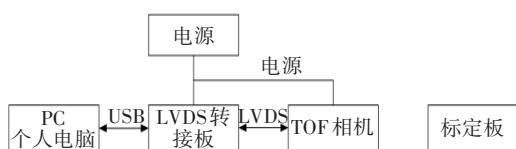


图15 TOF系统测试框图



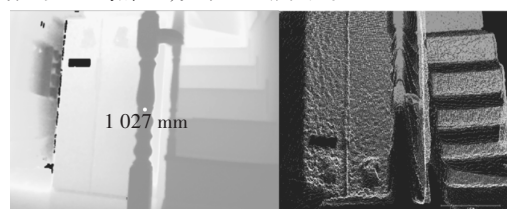
图16 TOF相机测试

通过对整个系统进行联调测试,完整地调试通过了TOF相机系统,并对TOF的镜头内参进行了校正,校正结果如表4所示。

表4 TOF相机的内、外参矩阵

参数	取值
图片大小	640×480
径向畸变	[-0.765,3.64,-17.25]
切向畸变	[0,0]
世界坐标点数量/个	40×2,双精度
估计偏差	1
径向畸变系数	3
估计切向畸变	0
重投影误差	40×2×21,双精度
检测到的关键点数量/个	40×21,逻辑值
旋转向量	21×3,双精度
内参矩阵K	$[1.61 \times 10^2, 0.061, 59.057; 0, 1.85 \times 10^2, 38.43; 0, 0, 1]$
图案数量/个	21
内在因素	1×1,相机内部函数
外参	21×1
焦距	$[1.61 \times 10^2, 1.85 \times 10^2]$
主点偏移	[59.057,38.434]
倾斜	0.060 990 904
平均重投影误差	0.359 016 632
重投影点数量/个	40×2×21,双精度

相机标定完成后,使用上位机软件显示相机的深度图及3D点云,如图17所示。



(a)深度图 (b)点云图
图17 TOF相机的深度图和点云图

设计完成后的TOF相机如图18所示,尺寸为35 mm×95 mm×21 mm,满足安装布置要求。



图18 设计完成后的TOF相机

5.3 室内外测试

为了考察不同光线环境对TOF相机深度数据结果的影响,在标定完成后进行了室外强、弱光环境的距离精度测试,测试采用TOF相机三脚架加标定板进行,测量位置为TOF相机光心到棋盘格中心位置,距离参考以激光笔读数进行比对,测试环境如图19所示。



图19 TOF的室外测试

TOF的距离精度测试主要考察环境光对结果的影响,因此,在室外晴天强光、阴天弱光及夜晚条件下进行测试,为消除数据抖动,以1 m距离为参考,每种环境下测试多次取中位数,得到室外测试的结果如表5所示。

表5 TOF相机的室外测试结果

测试环境	距离/mm		偏差/%
	激光笔读数	TOF相机读数	
晴天强光	1 022	1 057	-3.42
	1 029	1 025	0.39
	1 055	1 077	-2.09
	999	1 045	-4.60
阴天弱光	1 039	1 087	-4.62
	1 044	1 022	2.11
	1 007	1 025	-1.79
	1 021	1 023	-0.20
夜晚状态	1 022	1 111	-8.71
	1 051	1 103	-4.95
	1 098	1 191	-8.47
	997	1 009	-1.20

由以上结果可以看出,TOF相机在晴天和阴天弱光环境下表现良好,夜晚测试结果偏差较白天环境大,主要是夜间环境发射红外光减少所致,后续需要考虑进行算法的优化补偿。

5.4 性能测试结果

按照汽车行业通用标准 GB/T 28046.2—2019《道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第2部分:电气负荷》及 GB/T 28046.4—2011《道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第4部分:气候负荷》进行摸底测试,结果如表6所示。

表6 TOF相机的测试结果

测试项目	功能等级要求	测试结果
直流供电测试	功能状态 A	通过
过电压测试	功能状态 A	通过
交流发动机扰动试验	功能状态 A	通过
电压缓降缓升	功能状态 A	通过
短时电压跌落	功能状态 B	通过
反极性	功能状态 B	通过
接地偏移	功能状态 B	通过
开路试验	功能状态 B	通过
短路保护	功能状态 B	通过
温度阶梯试验	功能状态 A	通过
高低温循环试验	功能状态 A	通过
湿热循环试验	功能状态 A	通过
恒态湿热试验	功能状态 A	通过
防水测试	功能状态 B	通过

由以上结果可以看出,设计方案通过了基础的设计试验,满足车规使用要求。

6 结束语

本文基于乘员舱内TOF相机的应用设计了一种大角度TOF相机,并对设计的TOF相机进行了光学仿真分析和热分析,针对分析发现的问题进行了设计优化。通过对TOF相机的设计打样后对TOF相机的整体功能以及性能进行了测试,结果表明,所提出的TOF相机设计方案可以满足乘员舱内前、后排乘员监控的应用要求,同时性能满足车规级应用的需求。

参考文献

- [1] 王世程,于微波,杨宏韬. TOF相机的深度数据测量误差校正方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(7): 43-48.
WANG S C, YU W B, YANG H T. Research on Error Correction Method for Depth Data Measurement of TOF

- Camera[J]. Computer Application and Software, 2020, 37(7): 43-48.
- [2] 李文龙. 基于2D/3D数据融合的位姿测量方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- LI W L. Research on Pose Measurement Method Based on 2D/3D Data Fusion[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [3] 魏加立, 曲慧东, 王永宪, 等. 空间TOF相机大视场光学镜头结构优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 121-128.
- WEI J L, QU H D, WANG Y X, et al. Structural Optimization Design of Large Field of View Optical Lens for TOF Camera[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 41(10): 121-128.
- [4] 朱才喜. 高精度TOF三维深度相机设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- ZHU C X. Design and Implementation of High Precision TOF 3D Depth Camera[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [5] 胡敏. 高精度相位式TOF相机主控芯片的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- HU M. Design and Implementation of High Precision Phase TOF Camera Main Control Chip[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [6] 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 J L, QU H D, WANG Y X, et al. Review of 3D Camera Research Based on Time-of-Flight Method[J]. Infrared Technology, 2021, 43(1): 60-67.
- [7] 德州仪器半导体技术(上海)有限公司. 飞行器远距离接近和距离传感器系统设计介绍[Z]. 上海: 德州仪器半导体技术(上海)有限公司, 2018.
- Texas Instruments Semiconductor Technologies (Shanghai) Co., Ltd.. Introduction to Design of Long-Range Proximity and Distance Sensor System for Aircraft[Z]. Texas Instruments Semiconductor Technologies (Shanghai) Co., Ltd., 2018.
- [8] 张明奇. 空间TOF相机大视场光学镜头结构优化设计[J]. 中国新技术新产品, 2022(20): 79-82.
- ZHANG M Q. Optimal Design of Large-Field Optical Lens Structure for Space TOF Camera[J]. China New Technology and New Products, 2022(20): 79-82.
- [9] 魏加立. 空间TOF相机光机结构系统设计与实现[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
- WEI J L. Design and Implementation of Space TOF Camera Optical-Mechanical Structure System[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [10] HAENEL R, SEMLER Q, SEMIN E, et al. Evaluation of Low-Cost Depth Sensors for Outdoor Applications[C]// 7th International Workshop LowCost 3D - Sensors, Algorithms, Applications. Würzburg, Germany: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2022.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2023年9月14日。

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊,是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊,国家新闻出版广电总局第一批认定的学术期刊。

《汽车工程师》以报道汽车产品开发领域的成果为主,专注于技术开发与应用,提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势,努力在电池技术、电驱技术、电控技术、高压技术、补能技术、燃料电池技术、智慧控制、智能驾驶、智享座舱、智能悬架、线控转向、线控制动、NVH、功能安全、预期功能安全、信息安全、数据安全、被动安全、高效动力、高效传动、低风阻、低滚阻、轻量化领域吸收优质稿源,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表,我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神,为强大中国汽车工业作贡献!

本刊使用协同采编系统处理稿件,请登陆期刊网站注册后投稿,投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的“作者指南”,网址:<http://tjqc.cbpt.cnki.net>。

《汽车工程师》编辑部