

## 深度相机的测量误差建模及校正

魏瑞丽 王明军 周熠铭 易芳

### Modeling and correction of measurement errors based on depth cameras

WEI Rui-li, WANG Ming-jun, ZHOU Yi-ming, YI Fang

引用本文:

魏瑞丽, 王明军, 周熠铭, 易芳. 深度相机的测量误差建模及校正[J]. *中国光学*, 2024, 17(2): 271–277. doi: 10.37188/CO.2023–0047

WEI Rui-li, WANG Ming-jun, ZHOU Yi-ming, YI Fang. Modeling and correction of measurement errors based on depth cameras[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 271–277. doi: 10.37188/CO.2023–0047

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0047>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大随机相位误差下条带模式合成孔径激光雷达成像实验

Stripmap mode synthetic aperture ladar imaging under large random phase errors condition

中国光学 (中英文). 2019, 12(1): 130 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0130>

#### 低阶梯多级微反射镜高度误差分析及制作研究

Error analysis and fabrication of low-stepped mirrors

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 791 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0791>

#### 光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system

中国光学 (中英文). 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

#### 基于小波神经网络的光纤陀螺误差补偿方法

A fiber optic gyro error compensation method based on wavelet neural network

中国光学 (中英文). 2018, 11(6): 1024 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1024>

#### 空间引力波探测任务的入轨误差分析

Injection error analysis of space gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 493 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0493>

#### Seya-Namioka单色仪中光栅曲率半径误差的影响及补偿

Effect and compensate of grating curvature radius error in Seya-Namioka monochromator

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 623 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0623>

文章编号 2097-1842(2024)02-0271-07

## 深度相机的测量误差建模及校正

魏瑞丽<sup>1</sup>, 王明军<sup>2,3,4\*</sup>, 周熠铭<sup>2</sup>, 易芳<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学图书馆, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

3. 西安市无线光通信与网络研究重点实验室, 陕西 西安 710048;

4. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710126)

**摘要:** ToF (Time of Flight) 深度相机是获取三维点云数据的重要手段之一, 但 ToF 深度相机受到自身硬件和外部环境的限制, 其测量数据存在一定的误差。本文针对 ToF 深度相机的非系统误差进行研究, 通过实验验证了被测目标的颜色、距离和相对运动等因素均会对深度相机获取的数据产生影响, 且影响均不相同。本文提出了一种新的测量误差模型对颜色和距离产生的误差进行校正, 对于相对运动产生的误差, 建立了三维运动模糊函数进行恢复, 通过对所建立的校正模型进行数值分析, 距离和颜色的残余误差小于 4 mm, 相对运动所带来的误差小于 0.7 mm。本文所做工作改善了 ToF 深度相机的测量数据的质量, 为开展三维点云重建等工作提供了更精准的数据支持。

**关键词:** ToF 深度相机; 深度误差; 误差校正

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0047

## Modeling and correction of measurement errors based on depth cameras

WEI Rui-li<sup>1</sup>, WANG Ming-jun<sup>2,3,4\*</sup>, ZHOU Yi-ming<sup>2</sup>, YI Fang<sup>2</sup>

(1. Library of Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Networking, Xi'an 710048, China;

4. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Collaborative Network for  
Civil-Military Cooperation, Xi'an 710126, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangmingjun@xaut.edu.cn

**Abstract:** Time of Flight (ToF) depth camera is one of the important means to obtain three-dimensional point cloud data, but ToF depth camera is limited by its own hardware and external environment, and its measurement data has certain errors. Aiming at the unsystematic error of ToF depth camera, this paper experimentally verifies that the color, distance, and relative motion of the measured target affect the data obtained by the

收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-04-19

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目 (No. 92052106); 国家自然科学基金 (No. 61771385, No. 62101313); 陕西省杰出青年科学基金 (No. 2020JC-42)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 92052106, No. 61771385, No. 62101313) and Shaanxi Province Science Foundation for Distinguished Young Scholars (Grant No. 2020JC-42)

depth camera, and the error effects are different. A new measurement error model is proposed to correct the error caused by color and distance. For the error caused by relative motion, a three-dimensional motion blur function is established to recover it. Through the numerical analysis of the established calibration model, the residual error of distance and color is less than 4 mm, and the error caused by relative motion is less than 0.7 mm. The work done in this paper improves the quality of the measurement data of the ToF depth camera, and provides more accurate data support for 3D point cloud reconstruction and other work.

**Key words:** ToF depth camera; depth error; error correction

## 1 引言

在三维数据测量中, Time of Flight (ToF) 深度相机是获取三维数据的首选仪器。ToF 深度相机通过光在空间中的飞行时间来计算相机与目标物的距离<sup>[1]</sup>。该技术已具备实时获取三维点云数据所需的大部分基础功能。近年来,随着科技的发展, ToF 深度相机在自动驾驶<sup>[2]</sup>、三维重建<sup>[3]</sup>和地图测绘<sup>[4]</sup>等领域的应用逐渐增多,已经成为国内外学者的研究热点。然而, ToF 相机采集的数据存在一定的误差,并且没有统一的校正方法。由光接收、光散射以及运动模糊等外界环境引起的误差称为非系统误差,其形式不固定,因此需要根据不同情况对不同的深度误差进行分析、建模和修正。

对于非系统误差, Wang X Q 等<sup>[5]</sup>针对信噪比误差提出了一种优化方案,建立了幅度、相位、强度 3 个参数的组合误差模型,减小了不同信噪比下 ToF 深度相机的误差。同样针对信噪比误差,有方法指出通过分析固定阈值与每个像素点数据平均值的关系可以减少噪声的影响<sup>[6-7]</sup>。Lee S 等<sup>[8]</sup>人讨论了来自各向异性曲面、两个反射率模型之间的大量重叠以及光源反射率差异导致的误差,提出了一种对单深度图像进行反射率估计和分割的方法。但该方法对曲面类型的刻画不充分,且难以恢复可见光的特性。Chiabrand F 等<sup>[9]</sup>人评估了相机光轴与物体表面法线夹角对测距精度的影响,研究了物体内部多次反射引起的散射伪影的影响,及物体反射率对测量精度的影响,但未给出具体的校正方法。Jimenez D 等<sup>[10]</sup>人利用相关样本和像素局部邻域的一致性来恢复每个像素的深度,并从一帧图像中获得遮挡轮廓的运动流,从而减少运动伪影造成的误差,但该方法的前提是假设相位是线性混合的,故对于实际的 ToF 相

机存在误差。除了上述一些环境因素引起的误差外,温度漂移<sup>[11]</sup>、被探测目标的表面材料<sup>[12]</sup>以及探测角度<sup>[1]</sup>等都会对测量数据产生非系统误差。

针对 ToF 相机的非系统误差,文中首先分析了颜色、距离和相机与被测物体的相对运动等不同外部干扰对 ToF 相机深度误差的影响;其次,针对产生的误差,建立不同的误差校正模型,从而使得测量数据更贴近真实数据,为提高目标识别和三维重建的准确性提供依据。

## 2 ToF 深度相机误差分析

### 2.1 ToF 深度相机原理及参数

ToF 深度相机通过光源向目标物发送光脉冲,目标物表面反射后,成像传感器测量每个像素处发射和接收信号的相位,并得到两者的相位差,由此计算出相机到目标的距离,原理如图 1 所示。

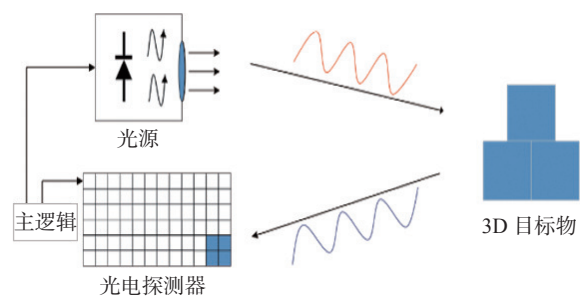


图 1 ToF 深度相机原理图

Fig. 1 Principle diagram of the ToF depth camera

在每个周期中,等间隔的对调制信号进行四次采样。假设 4 个采样相位分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$ 、 $\varphi_4$ , 则函数  $C(\varphi)$ 、相位差  $\phi$  的表达式为:

$$C(\varphi) = B \times (1 + \sin(2\pi f \tau)) + A, \quad (1)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{C(\varphi_1) - C(\varphi_3)}{C(\varphi_2) - C(\varphi_4)}\right), \quad (2)$$

式中,  $A$  为偏移量,  $B$  为振幅,  $f$  为调制频率,  $\tau$  为时间差。

距离的测量误差定义表达式如下:

$$h_{i,j} = \frac{\sum_{f=1}^N w_{i,j,f}}{N} - r_{i,j}, \quad (3)$$

$$g = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{i,j}}{m \times n}, \quad (4)$$

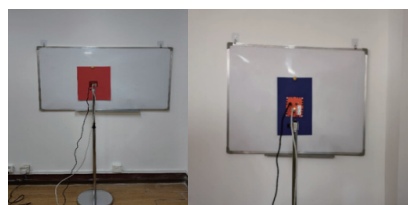
式中,  $h_{i,j}$  为  $N$  帧图像在  $(i, j)$  处的像素误差,  $w_{i,j,f}$  为第  $f$  帧图像在  $(i, j)$  处的测量距离,  $r_{i,j}$  为  $(i, j)$  处的真实距离,  $m \times n$  为像素大小。

### 2.2 实验设计

实验使用的是 SR4000 深度相机。其对光具有很好的鲁棒性, 可以适应室内各种光照条件<sup>[13]</sup>, 因此所有实验均在室内自然光照下进行。为了分析颜色和测量距离对深度数据造成的影响, 采用光滑的白板为测量目标, 设置红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种不同的光谱色及白色作为背景色。相机光轴中心对准物体的中心, 且与白板平行, 如图 2(a) 所示。相机与白板间的初始距离为 0.25 m, 每次沿两者中心连线移动 0.25 m, 直到测量距离为 4 m 时结束。在每个位置分别改变背景颜色, 获得连续的 40 帧数据, 并选择 70 pixel  $\times$  70 pixel 的中心区域进行数据处理。

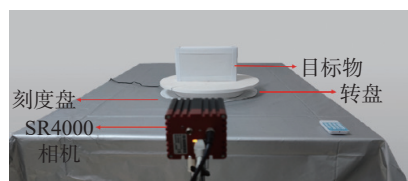
接下来, 研究被测物体的相对运动对深度误差产生的影响, 相机与目标物相距 1.5 m 放置, 目标物体的长、宽、高分别为 26 cm、10 cm、5 cm。

测量目标下方分别放置一个刻度盘及直径为 40 cm 的转盘, 且几何中心均对齐, 如图 2(b) 所示。



(a) 颜色、距离的实验图

(a) Site map of color and distance experiment



(b) 相对运动的实验图

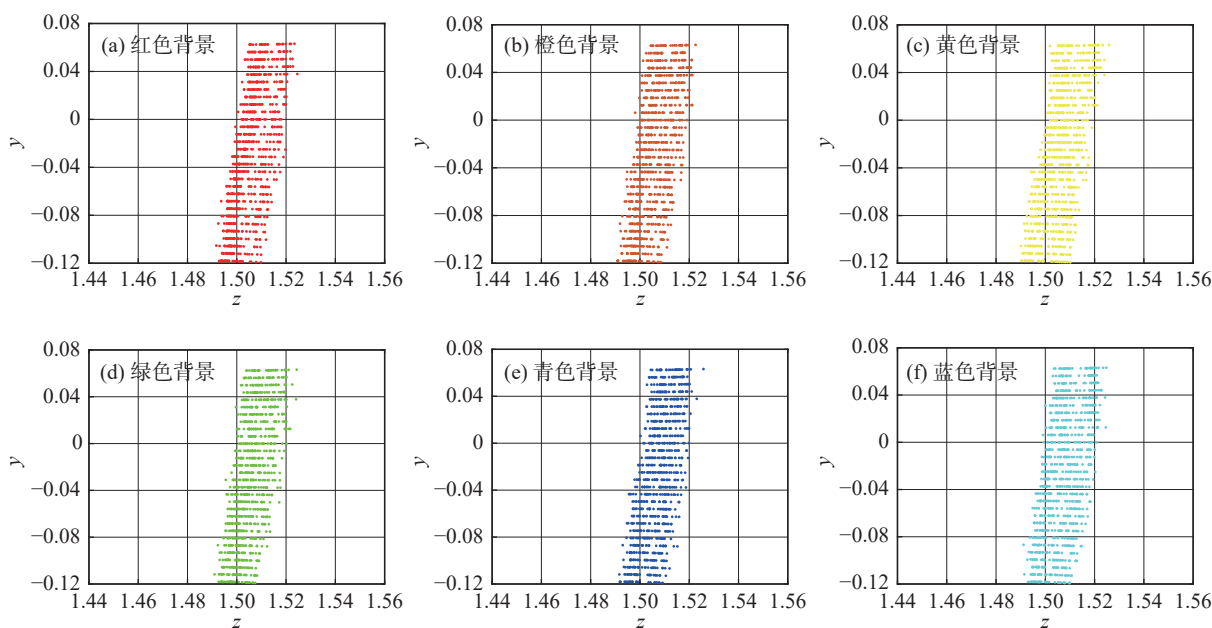
(b) Site map of relative motion experiment

图 2 颜色、距离及相对运动的实验图

Fig. 2 Site maps of color, distance, and relative motion experiment

### 2.3 颜色、距离及相对运动的误差影响

图 3(彩图见期刊电子版)为在距离相机 1.5 m, 不同颜色背景下, 深度相机所获取数据的侧面图。当不考虑自身硬件和外界干扰所带来的误差影响下, 深度数据的侧面图为一虚线。从图 3 中可以看出: 距离相机 1.5 m 时不同颜色的深度数据均有误差, 总体均在 1.5 m 左右浮动, 且浮动趋势大体一致。在 8 种背景色的实验中发现, 白色背景下的深度数据相较于其他颜色在 1.5 m 处总的误差浮动范围较大。



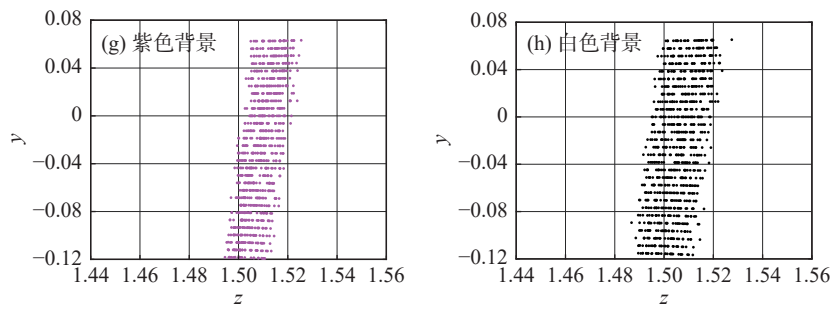


图 3 不同背景颜色下,在距离相机 1.5 m 时的侧面图

Fig. 3 Side view of background panels with different colors at a distance of 1.5 m from the camera

图 4 为目标物在转台旋转 30° 时的点云图。由于转盘的转动以及物体的运动,  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  点有明显偏移, 其他位置没有运动的场景, 点云的位置几乎没变。

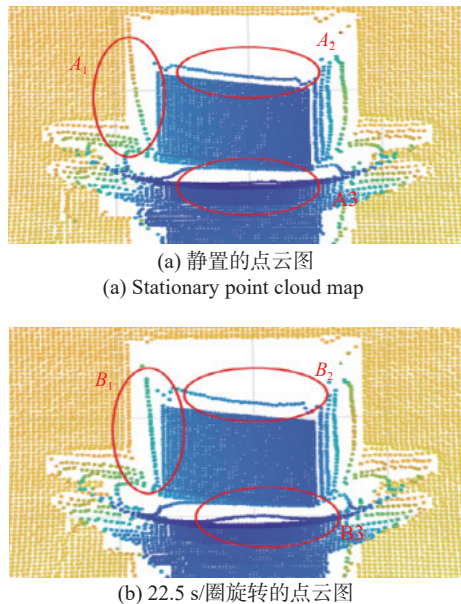


图 4 转台旋转 30° 的点云图

Fig. 4 Point cloud map when the turntable rotates 30°

图 5 为不同颜色对深度误差的影响。从图中可以看出, 深度误差受颜色的影响, 但在同一距离下不同颜色之间产生的相对误差较小, 在相同的条件下最大深度误差相差 0.016 m。随着测量距离的增大, 误差逐渐变大, 且该测量误差变化趋势符合文献 [12] 对 SR4000 相机的误差测试结果。SR4000 与目标物体的距离为 0.25~0.5 m 时, 属于近距离测量, 误差较大。这是因为激光在近距离容易出现过饱和现象, 且由于散射特性, 距离相机越近则散射现象越严重, 也会产生深度误差。

根据 SR4000 获取的连续帧图像, 求得在

30°, 60°, 90°, 120°, 150° 不同角度下的深度数据, 与静止状态下的情况做对比求出平均相对误差。图 6 (彩图见期刊电子版) 为不同转速下相对于静止状态物体在不同角度的平均误差。由图 6 可以看出: 在不同角度下, 物体运动对深度误差都有影响。物体以 22.5 s/圈的速度转到 150° 时, 深度误差最大, 误差为 2.3 mm; 以 34.5 s/圈的速度转到 30° 时, 深度误差最小, 误差为 0.2 mm。

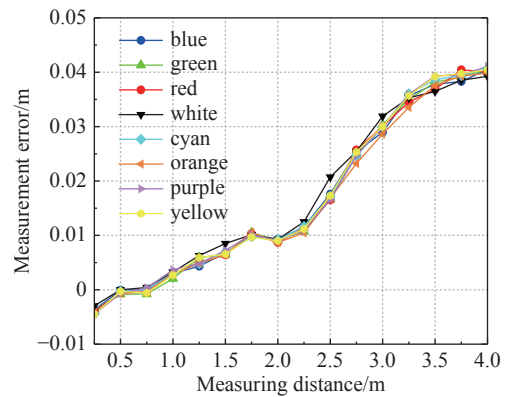


图 5 不同颜色对深度误差的影响

Fig. 5 Effect of different colors on depth errors

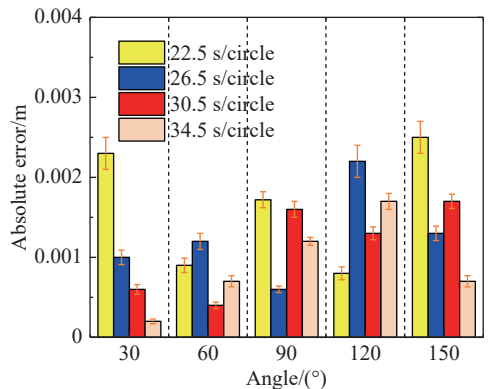


图 6 转台以不同转速旋转时不同角度相对于静止态的平均误差

Fig. 6 Average error of turntable at different speeds and angles relative to the static state

### 3 深度相机误差建模

为了讨论深度相机测量数据的真实性, 文献 [1]、[13] 和 [14] 利用 SR4000 相机测试分析了平均测量距离, 并考虑所有像素的差异平均值的变化情况。文献 [13] 和 [14] 的测试证实了 SR4000 相机的测量不会受到多次内反射引起的散射伪影的影响, 但是这种测试方法限制了其距离测量精度。文献 [1] 对测试数据进行了分析, 并建立了误差校正模型, 对误差进行了很好的补偿。测量误差表示如下:

$$e = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot m \cdot \sin(\lambda_2 \cdot m + \lambda_3) \quad (5)$$

式中,  $m$  为像素测量距离,  $\lambda_0$  为常数误差,  $\lambda_1$  为比例因子,  $\lambda_2$  为角频率,  $\lambda_3$  为相移,  $\sin(\lambda_2 \cdot m + \lambda_3)$  为摆动误差。

该模型产生的数据与真实数据间存在较大误差, 鉴于摆动误差以及任何信号都可以表示成傅立叶级数的形式, 文中提出了测量误差模型, 表示如下:

$$\begin{aligned} E = & a_0 + a_1 \cdot \cos(m \cdot w) + b_1 \cdot \sin(m \cdot w) + \\ & a_2 \cdot \cos(2m \cdot w) + b_2 \cdot \sin(2m \cdot w) + \\ & a_3 \cdot \cos(3m \cdot w) + b_3 \cdot \sin(3m \cdot w) + \\ & a_4 \cdot \cos(4m \cdot w) + b_4 \cdot \sin(4m \cdot w) \quad (6) \end{aligned}$$

将文献 [1] 中由 SR4000 测得的 81 组深度误差数据作为样本数据进行实验, 如图 7 所示。由图 7 可以看出, 当测量距离大于 4 m 时, 文献 [1] 误差模型的数据严重偏离了真实误差, 而本文的误差模型则能较好地拟合真实误差。求得的模型参数如表 1 所示。

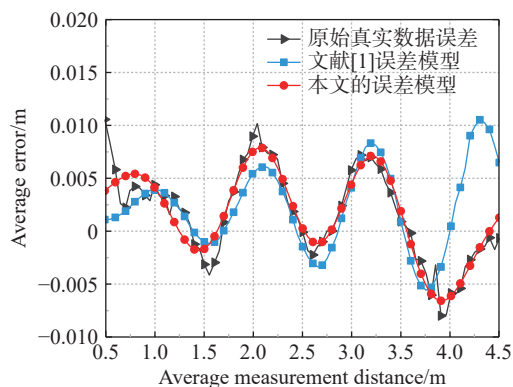


图 7 不同测量距离下的平均误差及文献 [1] 所提模型误差和本文所提模型误差

Fig. 7 Average depth error of error models proposed by Ref. 1 and this paper at different average measurement distances

表 1 本文模型参数

Tab. 1 Parameters of proposed model

参数名	参数值	参数名	参数值
$a_0$	0.001 684	$w$	1.464
$a_1$	-0.002 211	$b_1$	0.000 733 2
$a_2$	-0.001 091	$b_2$	0.002 141
$a_3$	-0.002 439	$b_3$	0.002 785
$a_4$	0.002 291	$b_4$	-0.000 4192

为了验证本文误差模型的有效性, 利用文献 [1] 中的数据进行实验, 校正后的结果如图 8 所示。由图 8 可知, 在测量距离小于 1.5 m 和大于 4 m 时, 文献 [1] 的校正模型的校正效果明显较差, 与前文误差模型的最终拟合效果一致。本文模型在 0.5 到 4.5 m 之间最大误差为 4.5 mm。通过对比分析可知, 本文误差模型的校正效果优于其他模型。

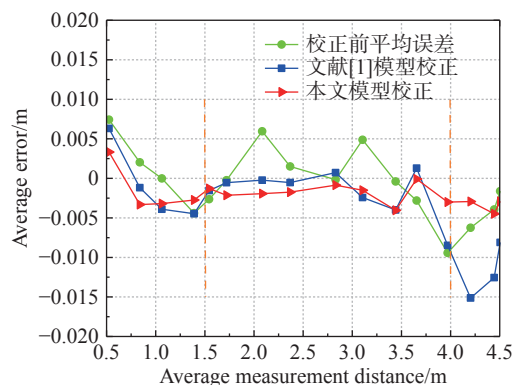


图 8 深度误差校正结果

Fig. 8 Depth error correction results

根据式 (6) 可知, 该模型没有考虑到目标相对运动所引起的深度误差, 在此引入帧序列对深度数据进行修正。模糊图像可表示为<sup>[15]</sup>:

$$g(x, y) = f(x, y)h(x, y) + n(x, y) \quad (7)$$

将二维运动模糊图像恢复的相关理论延伸到三维中, 对于仅由相对运动造成的误差可表达为:

$$G(x, y, z) = F(x, y, z)H(x, y, z) \quad (8)$$

式中:  $F(x, y, z)$  为没有误差的数据,  $H(x, y, z)$  为三维点扩展函数, 其表达式为:

$$H(x, y, z) = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n V_i(x, y, z)} \quad (9)$$

## 4 实验结果分析

对 ToF 相机测得的不同颜色不同距离的深度数据进行修正,将在蓝色背景下得到的深度误差数据作为样本数据得到误差校正模型,再对其他数据进行校正,各颜色背景下的校正结果及校正模型如图 9 所示。当测量背景为白色且测量距离为 2.5 m 时,误差最大,为 4 mm,其他情形下,残余误差均小于 4 mm。由此可知,该误差校正模型适用于对不同颜色背景 and 不同距离目标物的 ToF 相机测量数据校正。

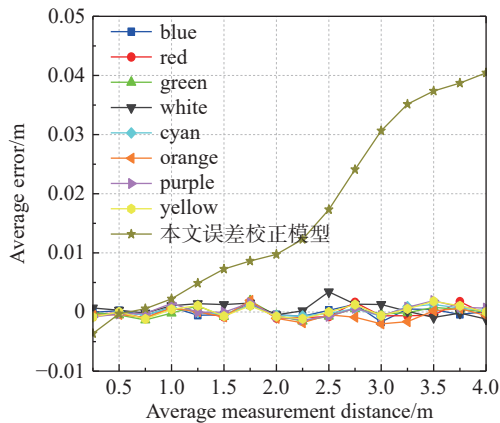


图 9 不同颜色的误差校正结果及校正模型

Fig. 9 Error correction results and correction models for different colors

对 ToF 相机在不同转速场景下获取的点云数据进行校正。根据之前所述,先对所获取的点云数据的深度值误差进行修正,再对由于相机与被测物体之间的相对运动所引入的误差进行校正,得到修正后的距离误差如图 10(彩图见期刊电子版)所示。由图 10 可知,当转盘的转速为 22.5 s/圈,角度为 150°时,相对于其静止时的误差最大为 0.7 mm。与图 6 相比,残余误差比没有校正的误差数据小。可以看出,在不同转速且不同

角度下,运动所带来的误差在该校正模型下得到了修正。

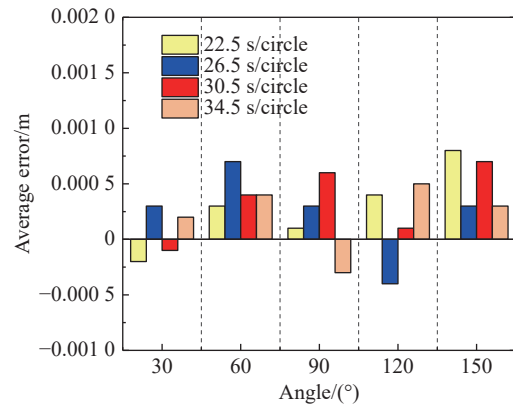


图 10 不同转速下不同角度的误差校正结果

Fig. 10 Error correction results at different angles and speeds

## 5 结论

针对 ToF 深度相机在测量目标时,由于自身硬件限制以及外界环境引起的相机测量误差,建立了傅立叶级数误差模型和运动模糊函数校正模型。文中分析了被测目标的颜色、距离和相对运动等对 ToF 相机测量误差的影响,得知深度误差受被测目标颜色影响较弱,且被测物体与相机的距离越远,所测得的深度误差越大,同时深度数据也受被测物体与相机的相对运动的影响。针对相对静止的被测物体颜色和距离引起的误差,文章提出了新的误差校正模型,与以往的误差校正模型进行对比发现,所提误差模型在提高误差校正性能的基础上,扩大了误差校正范围,提高了深度数据的可靠性。针对被测物体与相机的相对运动引起的误差,文中借鉴二维图像运动伪影修正的思想,将其引入三维运动误差的修正。实验结果证明误差得到了改善。本文工作能够为今后的相关研究提供更精确的数据支持。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] CATTINI S, CASSANELLI D, DI LORO G, *et al.* Analysis, quantification, and discussion of the approximations introduced by pulsed 3-D LiDARs[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 7007311.
- [3] JUNG S, LEE Y S, LEE Y, *et al.* 3D reconstruction using 3D registration-based ToF-stereo fusion[J]. *Sensors*, 2022, 22(21): 8369.

- [4] LI Y F, GAO J, WANG X X, *et al.*. Depth camera based remote three-dimensional reconstruction using incremental point cloud compression[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, 99: 107767.
- [5] WANG X Q, SONG P, ZHANG W Y, *et al.*. A systematic non-uniformity correction method for correlation-based ToF imaging[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1907-1924.
- [6] 王明星, 郑福, 王艳秋, 等. 基于置信度的飞行时间点云去噪方法[J]. *红外技术*, 2022, 44(5): 513-520.  
WANG M X, ZHENG F, WANG Y Q, *et al.*. Time-of-flight point cloud denoising method based on confidence level[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(5): 513-520. (in Chinese)
- [7] KEPSKI M, KWOLEK B. Fall detection using ceiling-mounted 3D depth camera[C]. *International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, IEEE, 2014: 640-647.
- [8] LEE S, KIM J, LIM H, *et al.*. Surface reflectance estimation and segmentation from single depth image of ToF camera[J]. *Signal Processing:Image Communication*, 2016, 47: 452-462.
- [9] CHIABRANDO F, PIATTI D, RINAUDO F. SR-4000 ToF camera: further experimental tests and first applications to metric surveys[J]. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010, 38: 149-154.
- [10] JIMENEZ D, PIZARRO D, MAZO M. Single frame correction of motion artifacts in PMD-based time of flight cameras[J]. *Image and Vision Computing*, 2014, 32(12): 1127-1143.
- [11] AHMED F, CONDE M H, MARTÍNEZ P L, *et al.*. Pseudo-passive time-of-flight imaging: simultaneous illumination, communication, and 3D sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(21): 21218-21231.
- [12] HASSAN M, EBERHARDT J, MALORODOV S, *et al.*. Robust Multiview 3D pose estimation using time of flight cameras[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(3): 2672-2684.
- [13] WEYER C A, BAE K H, LIM K, *et al.*. Extensive metric performance evaluation of a 3D range camera[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Sens*, 2008, 37: 939-944.
- [14] MURE-DUBOIS J, HÜGLI H. Real-time scattering compensation for time-of-flight camera[C]. *5th International Conference on Computer Vision Systems (ICVS)*, ICVS, 2007: 1-12.
- [15] 李胜荣. 动态模糊图像复原研究[J]. *信息与电脑*, 2021, 33(9): 46-49.  
LI SH R. Study of dynamic MODULUS and image restoration[J]. *China Computer & Communication*, 2021, 33(9): 46-49. (in Chinese)

#### 通讯作者:



王明军(1979—),男,陕西安康人,博士,教授,博士生导师,2004年、2008年于西安电子科技大学无线电物理专业分别获得硕士、博士学位。2009年至2011年在西北工业大学电子信息学院做博士后,2012年在美国佛罗里达州立大学做访问学者,2013年至2016年在西安理工大学自动化与信息工程学院做博士后,主要从事无线光通信理论与技术方面的研究。E-mail: wangmingjun@xaut.edu.cn