Dec. 2019

# TOF 相机实时高精度深度误差补偿方法

李占利1,周康1,年琦1,2,李洪安1

(1. 西安科技大学 计算机科学与技术学院,陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 机械工程学院,陕西 西安 710054)

摘 要: TOF(Time-Of-Flight)相机获取的深度值存在着边角畸变和精度偏移,目前主要是通过误差查找表或曲线拟合等技术进行误差补偿,计算量大且补偿速度慢。通过对 TOF 相机在不同距离的深度误差分布规律的分析,提出了一种实时、高精度的误差补偿方法。该方法利用 TOF 深度图像的旋转对称性以及误差分布的特性,简化了误差补偿模型、降低参数数量级,有效提升了补偿的精度和速度。将算法应用于基于 TOF 原理的 Kinect v2 深度传感器进行深度补偿,使得有效距离内平面度误差下降到 0.63 mm 内,平均误差下降到 0.704 0 mm 内,单帧数据补偿时间在 90 ms 内。由于该算法仅基于光径差进行补偿,因此适用于所有 TOF 原理的相机。实验结果表明,该算法能够快速有效减少 TOF 相机的深度误差,适用于实时、高精度的大视场三维重建。

关键词: TOF 深度相机; 深度误差补偿; 曲线拟合; Kinect v2 传感器

中图分类号: TH741; TP391 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1213004

# TOF camera real-time high precision depth error compensation method

Li Zhanli<sup>1</sup>, Zhou Kang<sup>1</sup>, Mu Qi<sup>1,2</sup>, Li Hong'an<sup>1</sup>

- (1. College of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
  - 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: When using Time –Of –Flight (TOF) camera to obtain depth values, corner distortion and precision offset often occur. At present, the main methods to compensate depth errors are based on the techniques like error look–up table or curve fitting, which has a large amount of calculation resulting in slow compensation speed. By analyzing the depth error distribution law of TOF camera at different distances, a real –time and high –precision error compensation method was proposed. The error compensation model was simplified by using the rotational symmetry of TOF depth image and the characteristics of error distribution. The order of magnitude of the parameters was reduced, and the accuracy and speed of compensation process were effectively improved. The proposed algorithm was applied to Kinect v2 depth sensor for depth compensation, the flatness error within the effective distance

收稿日期:2019-06-06; 修订日期:2019-07-21

基金项目:中国博士后科学基金(2016M602941XB)

作者简介:李占利(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事图像处理,视觉计算与可视化等方面的研究。Email: lizl@xust.edu.cn

通讯作者: 牟琦(1974-), 女, 副教授, 主要从事图像处理, 计算机视觉, 人工智能等方面的研究。 Email: mu\_qi@xust.edu.cn 周康(1993-), 男, 硕士生, 主要从事图像处理、三维重建等方面的研究。 Email: 283124296@qq.com

dropped to 0.63 mm, the average error dropped to 0.704 0 mm, and the single frame data compensation time was less than 90 ms. Since the algorithm compensates only based on the optical path difference, it is suitable for all TOF principle cameras. The results of experiments show that the proposed algorithm can quickly and effectively reduce the depth error of TOF camera, and is suitable for real-time, high-precision three-dimensional reconstruction of large field of view.

Key words: TOF depth camera; depth error compensation; curve fitting; Kinect v2 sensor

# 0 引言

在非接触式三维重建技术中,时间飞行法(Time-Of-Flight, TOF)因成本低,数据处理简单,响应速度快等优点,被广泛应用在游戏娱乐、虚拟现实、文物保护、人体姿态识别、机器人的避障导航[1-5]等领域。但受自身成像原理限制,TOF方法获取的深度值存在着边角畸变和精度偏移[6-7],且边角畸变误差和偏移误差随着测量距离的增加而增加,这限制了其在高精度、大视场的三维重建场景中的应用。微软的 Kinect v2 是一款基于 TOF 技术的消费级深度传感器,它能够实时获取物体的深度和彩色图像信息,被广泛地应用于机器人定位导航、虚拟现实、产品展示、影视游戏等消费级场景中[8-9]。但因Kinect v2 在深度测量值和真实深度之间存在着明显的系统性偏移[10],也限制了其在更高精度及大视场三维重建场景的应用。

国内外学者针对 TOF 技术存在的系统误差进 行了分析和研究。张旭四分析了光强传递函数对测 量精度的影响。卢纯青[12]将误差分为成像系统误差 和场景误差两类,分析了成像系统中的光源误差,场 景中表面反射率、场景距离和场景反射多径的误差。 Corti<sup>[13]</sup>设计了实验,分析了温度、测量距离、测量角 度、被测材料属性等对 Kinect v2 测量精度的影响。 Butkiewicz[14]分析了 Kinect v2 的彩色相机和红外 相机的径向和切向畸变带来的误差对精度的影响。 但是以上方法并没有对误差进行补偿。Yang [15]对 Kinect v2 的深度精度、边缘噪声、结构噪音等进行 了分析,并提出基于三角测量原理的三设备测量法 来提高精度,建立了圆锥误差分布图。Pagliari<sup>[16]</sup> 对 Kinect v2 的深度相机进行了标定,消除了径向 和切向带来的畸变,提高了重建精度。在此基础上, 一些研究对误差进行了补偿,补偿方法大致可以分

为三类,第一类是利用基于小孔成像和 TOF 测量原理的三角关系进行的误差补偿<sup>[17-18]</sup>,该方法虽然简单易行,但是由于设备内部往往已经进行了初步的误差补偿,再进行重复补偿无法达到理想效果。第二类是通过建立三维误差查找表进行误差补偿<sup>[19-20]</sup>,该方法误差补偿精度较高,但补偿精度依赖于三维查找表的密度,且其计算量大,补偿耗时随着分辨率的增加而急剧增加。第三类采用曲线拟合误差,例如张洪等<sup>[21]</sup>在对 Kinect 一代进行深度误差矫正时,采用二次曲线进行拟合。Shim 等<sup>[19]</sup>在对 TOF 相机标定后对误差进行了初步非线性拟合,但没有进行补偿。Lachat 等<sup>[7]</sup>在对 Kinect v2 误差分析时,使用了B样条对误差进行拟合。曲线拟合方法简单有效,但存在较多参数,张洪拟合后的补偿模型的参数规模达到 90 多万个,补偿速度过慢。

针对上述问题,文中将三维误差查找表和曲线 拟合相结合,提出一种快速高精度的 TOF 深度补偿 算法。该算法首先根据误差查找表对误差进行曲线 拟合,然后利用深度误差的旋转对称关系和误差分 布的变化特性,简化误差模型,并求解补偿模型中的 系数项。将方法应用于 Kinect v2 深度数据的误差补 偿,其在有效范围内的最大深度误差下降了 91%,最 大平均误差下降了 91%,最大标准差下降了 93%; 且补偿模型参数规模降低到 16 个,Matlab 中单帧 数据补偿时间 90 ms 内,相比参考文献[20]中存储 大量误差查找表,参考文献[21]中需要 90 万个参数 的规模,该算法极大地降低了时间复杂度与空间复 杂度,速度提升明显。

# 1 TOF 相机成像误差分析

TOF 相机通过光在传感器与被测量物体之间的 飞行时间计算距离。通过内置红外发射器不断向场 景内投射红外光源,信号到达被测物体后反射返回 第 12 期 www.irla.cn 第 48 巻

到红外相机中,通过测量发射信号与返回信号之间的相位差,计算出飞行时间,结合光速即可求解出距离。测量原理示意图如图1所示。

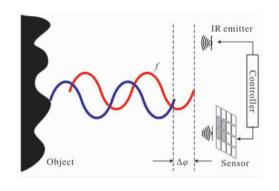


图 1 TOF 测量原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of TOF measuring principle

TOF 测量原理公式:

$$d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{\Delta \varphi}{2\pi f} \tag{1}$$

式中:d 为传感器到被测物体之间的距离;c 为光速,空气中速度约为  $3\times10^8$ m/s; $\Delta\varphi$  为相位差;f 为传感器的调制频率。

接收光信号的红外相机的光路模型是小孔成像模型。由小孔成像及 TOF 原理可知,在深度相机成像时,距离深度图像中心越远的像素的光信号,所经过的光路的距离(光径,Optical path)越长,光飞行时间越久,获取的深度值越大,如图 2 所示。但是实际同一平面的深度值应该都是一致的,所以这就导致采集到数据边缘像素的误差大于中心像素点附近的误差[18, 20, 22]。同时该误差会随着测量距离的增加而增加。如果不能较好地补偿该误差,直接获取的点云

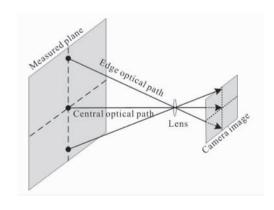


图 2 TOF 相机光信号路径图 Fig.2 Diagram of TOF camera optical signal path

数据也会直接存在较大误差,这对后续实际应用中的精度会造成较大影响。

# 2 TOF 深度误差补偿原理

误差补偿的关键是获取坐标位置和补偿值之间 的关系。补偿值是每个坐标位置上真实深度值与测量深度值之间的差值。

由图 2 可以看出,深度值由光径的长度决定。在 测量同一平面中,坐标位置决定了光径的长度。

图 3 是正对和非成对情况下的误差示意图。可以看到,在正对情况下,对于以 O 点为中心的对称的坐标位置,它们的光径长度是相同的 AO=BO,误差来源于光径差为 AA'-AO;在非正对情况下,虽然以 O 点为中心的对称的坐标位置所对应的光径长度不相同  $AO \neq BO$ ,但是误差来源仍然是光径长度 AA'-AO、BB'-BO,不受角度影响。

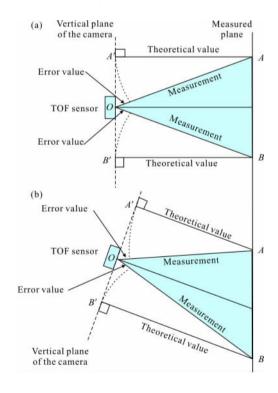


图 3 正对(a)与非正对(b)误差示意图 Fig.3 Schematic diagram of vertical (a) and non-vertical (b) error

因此,文中仅在正对情况下采集数据,获取每个 坐标点在不同光径下的补偿值。所建立的模型可以 直接应用于非正对情况。 型,如图4所示。

建立误差模型主要为三步:建立误差查找表、建立误差模型、模型的改进及优化。其中模型的改进及优化是通过误差旋转对称性、等效距离、误差分布连续性,得到坐标值,测量值(光径)与补偿值的关系模

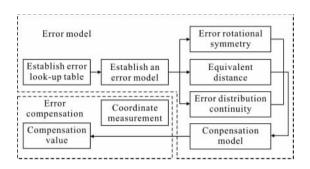


图 4 建立误差模型流程图

Fig.4 Flow diagram of establishing error model

误差补偿时只需测量值与坐标值,通过补偿模型的坐标值求解模型参数,将测量值代入模型中即可完成补偿。

#### 2.1 建立深度误差查找表

误差查找表记录了坐标位置和补偿值之间的对应关系。为了得到误差查找表,设计如图 5 所示的数据采集系统。在深度相机正前方设一标准平面,在有效距离内以固定步长(文中为 20 cm)移动深度相机与标准平面的距离,每个位置采集 n 次数据,共采集 m 个位置上的数据。

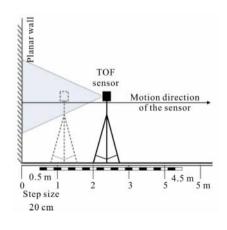


图 5 数据采集示意图

Fig.5 Schematic diagram of data acquisition

对于像素点(u,v),其在位置i处的测量深度值取n次测量值的平均值,如公式(2)所示。

$$Z^{i}(u,v) = \frac{\sum_{k=0}^{n} Z^{k}(u,v)}{n}$$

 $(i=1,2, \dots, m, u=0,1, \dots, 511, v=0,1, \dots, 423)$  (2) 式中: $Z^{i}(u,v)$ 为坐标在位置 i 处的测量深度值; $Z^{k}(u,v)$ 为第 k 次的测量值。

则该位置的误差补偿值为真实深度值与测量深度值之间的差值,如公式(3)所示。

$$\Delta d^{i}(u,v) = D^{i}(u,v) - Z^{i}(u,v)$$

 $(i=1,2, \dots, 20, u=0,1, \dots, 511, v=0,1, \dots, 423)$  (3) 式中, $D^{i}(u,v)$ 为位置 i 处的直变深度值, $\Delta d^{i}(u,v)$ 为

式中: $D^{i}(u,v)$ 为位置 i 处的真实深度值; $\Delta d^{i}(u,v)$ 为该位置的误差补偿值。

采用此方法,可得到每一个坐标点在 m 个位置的误差补偿值,共得到 u×v 个以测量距离为横坐标、误差补偿值为纵坐标的序列,即深度误差查找表。

#### 2.2 建立误差模型

误差查找表是离散非连续的,不能实现连续值的补偿。文中算法对每一个像素点在不同深度的补偿值,使用三次多项式进行拟合,得到连续的误差补偿值函数 f(u,v),该误差补偿函数是以测量值为自变量,误差补偿值为因变量。如公式(4)所示。

$$d = f(u,v) = k1 \cdot (Z^{i}(u,v))^{3} + k2 \cdot (Z^{i}(u,v))^{2} + k3 \cdot (Z^{i}(u,v)) + k4$$
(4)

式中:d 为点(u,v)在不同距离待补偿的值; $k1 \setminus k2 \setminus k3$  分别为三次、二次、一次项系数;k4 为常数项。

# 2.3 模型的改进及优化

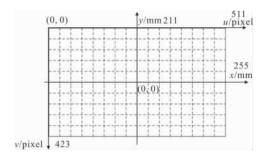
公式(4)得到的误差补偿曲线模型,虽然能较好地对误差进行补偿,但是参数过多,共有 u×v×4个参数。根据 TOF 成像原理及小孔成像原理可知,在深度相机成像时,正对采集一个平面,相机坐标系上四个象限内误差分布规律具有旋转对称性,即任意两不相邻象限经过 180°旋转后,对应坐标的误差值均近似相等。如图 6(a)所示。因此,文中将四个象限内的误差映射到第二象限内,如公式(5)所示。

$$g(u,v) = \frac{f(u,v)}{4} + \frac{f(u+255, v)}{4} + \frac{f(u,v+211)}{4} + \frac{f(u+255,v+211)}{4} \quad u < 255, v < 211$$
 (5)

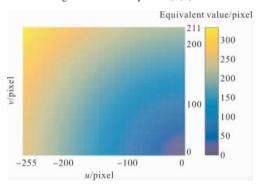
式中:g(u,v)为映射后的补偿函数;f(u+255,v)、f(u,v)、

f(u,v+211)、f(u+255,v+211)分别为一、二、三、四象限的误差补偿值。经过映射后,误差补偿模型参数的数量级减少到  $u\times v$ 个。

由 TOF 成像原理可知,相机坐标系中坐标点的误差值与其距离原点的欧式距离相关。在任一象限内,坐标点距离相机坐标系原点的欧式距离四舍五人后可划分为 $\left[\sqrt{\left(u/2\right)^2+\left(v/2\right)^2}\right]$ 种,文中称为等效距离(Equivalent distance),对 Kinect v2 相机坐标系的第二象限进行划分,有 333 种,如图6(b)所示。



- (a) Kinect v2 深度相机坐标系(x,y)与图像坐标系(u,v)
- (a) Kinect v2 depth camera coordinate system(x,y) and image coordinate system (u,v)



(b) 第二象限内相同等效距离像素点图

(b) Schematic diagram of the same equivalent distance pixel in the second quadrant

图 6 深度图像坐标系和第二象限内等效距离示意图

Fig.6 Depth image coordinate system and schematic diagram of equivalent distance in the second quadrant

如果坐标位置的等效距离相同,则坐标位置的 误差补偿值近似相同。因此,可将坐标位置与补偿 值之间的关系,转化为等效距离与补偿值之间的关 系。因此,可首先对相同等效距离的坐标点的误差 补偿值求平均,然后使用平均值后进行三次多项式拟 合,得到误差补偿值关于等效距离和测量值的变化函 数,从而进一步减少校正曲线模型数量级,即公式(6)。

$$h(u,v) = q1 \cdot \left[ \frac{\sum_{i=0}^{m} g_{i}(u,v)}{m} \right]^{3} + q2 \cdot \left[ \frac{\sum_{i=0}^{m} g_{i}(u,v)}{m} \right]^{2} + q3 \cdot \left[ \frac{\sum_{i=0}^{m} g_{i}(u,v)}{m} \right] + q4$$

$$l = \left[ \sqrt{(u-u_{c})^{2} + (v-v_{c})^{2}} \right]$$
(6)

式中:m 为等效距离相同的点个数; $u_c$ 和  $v_c$ 为相机坐标系原点,Kinect v2 第二象限相机坐标系原点坐标为 (255,211);l 即为第二象限内等效距离;q=(1,2,3,4)为系数项,以 Kinect v2 为例,l 的取值有 333种,即误差模型参数降低到 l×4 个,这里可以表示为 l×4 的矩阵;h(u,v)为误差补偿值关于等效距离的变化函数。

在某个位置测量得到的平面,该平面内坐标点的误差值与等效距离有关,对于某一个坐标,该坐标的误差变化与测量位置的变化有关。根据 TOF 成像原理和小孔成像三角关系,这两个变化都是连续且平滑的。因此可以将所有关于等效距离的误差补偿值三次函数的系数项分别做拟合,得到以等效距离为自变量,系数项值为因变量的函数模型。

求取等效距离与补偿模型的变化规律能够进一步减小模型数据量。即对  $l \times 4$  的矩阵的四列分别进行拟合。公式(7)分别对  $q \times 1$ 、 $q \times 2$ 、 $q \times 3$ 、 $q \times 4$  四个系数项进行拟合。实验中三次多项式的函数的拟合残差达到了最小值,最终将模型参数减少到  $4 \times 4$  个,式中  $\lambda = (1,2,3,4)$ 为拟合后系数项。

$$p_{n}(u,v) = \lambda 1 \cdot \left(q_{n}^{l}\right)^{3} + \lambda 2 \cdot \left(q_{n}^{l}\right)^{2} + \lambda 3 \cdot \left(q_{n}^{l}\right) + \lambda 4$$

$$n = 1, 2, 3, 4 \tag{7}$$

式中:p(u,v)为补偿模型系数项关于等效距离的变化函数。

#### 2.4 误差补偿

由公式(7)得到误差模型参数的变化规律函数  $p_n(u,v)$ 。对实际测得的数据进行补偿时,只需根据公式(8)即可得到某像素点的误差补偿值 d,对测量值进行误差补偿,式中 p=(1,2,3,4)为公式(7)求得的系数项。

$$d=p_{1}(u,v)\cdot (Z^{i}(u,v))^{3} + p_{2}(u,v)\cdot (Z^{i}(u,v))^{2} + p_{3}(u,v)\cdot (Z^{i}(u,v)) + p_{4}(u,v)$$
(8)

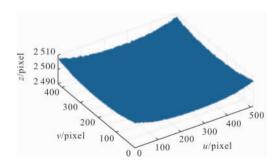
# 3 实验结果及分析

实验采用设备为 Kinect v2, 已知其分辨率为 512×424,有效测量距离在 0.5~4.5 m 内。除了由于 成像原理导致的深度误差外, Kinect v2 用于采集深 度信息的红外相机与普通相机一样存在着径向与切 向畸变[14],首先采用张正友的方法对红外相机畸变 进行了校正。对采集数据中出现的随机误差噪声,采 用均值滤波减弱随机误差。为保证 Kinect v2 采集数 据时与被测平面保持垂直,设计了两种方法同时进 行,首先使用外部辅助设备,在Kinect v2上固定一 可投影十字光线的激光仪, 在被测平面中标记出一 个十字图案, 在距离变化时使投影十字与被测平面 中的十字保持重合;为进一步保证设备姿态正确性, 在获取 Kinect v2 与被测平面的大致位置后,将该位 置的深度值范围与预览深度图之间比例关系放大, 当 Kinect v2 发生旋转偏移时,预览深度图颜色会发 生明显的偏差,调整 Kinect 使深度图各象限颜色平 衡。

通过上述实验,采集到的点云数据如图 7 所示, 其中图 7(a)为距离为 2 500 mm 时采集到的点云数据,图 7(b)为不同距离下同一平面点云数据的绝对误差图。

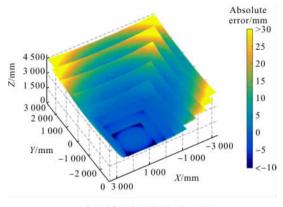
图 8 分别为 2 500 mm 的残差及误差统计直方图。

通过对数据的观察,可明显看出点云数据在边缘部分存在较大误差,呈现翘起的现象,这种误差在四个角的表现十分明显,这与笔者分析的 TOF 误差来源原理相似。



(a) 距离为 2 500 mm 时采集到的点云数据

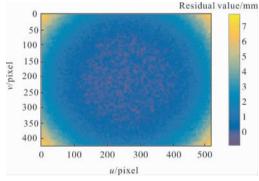
(a) Point cloud data collected at a distance of 2 500 mm



(b) 在不同距离测得的平面误差

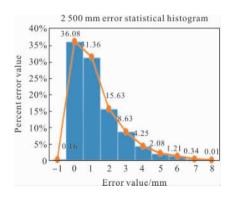
(b) Error in the plane measured at different distances 图 7 距离为 2 500 mm 点云图和不同距离绝对误差图

Fig.7 Distance is 2 500 mm point cloud map and the error map of the plane at different distances



(a) 2 500 mm 处残差图

(a) Residual map at 2 500 mm



(b) 2 500 mm 处误差统计直方图

(b) Error statistical histogram at 2 500 mm 图 8 残差图 \误差统计直方图

Fig.8 Residual map and error statistics histogram

官方给出的 Kinect v2 范围是 0.5~4.5 m, 但在 0.5 m 时,已经无法采集超过 50%的数据,所以在采集数据时,在距离 0.7~4.5 m 处,以 20 cm 为步长, 共采集 20 组数据,每组采集 100 次。对 1 100、2 100、

3 100、4 100 mm 位置处的点云数据左上角、中心、 右下角三个位置,窗口大小为 20×20 内的点云数据 进行误差分析,结果如表 1 所示。

表 1 点云误差分析

Tab.1 Point cloud error analysis

Distance/ mm	Upper left corner/mm	Center/mm	Bottom right corner/mm		
1 100	-7.55	0.15	-7.73		
2 100	1.62	-0.11	1.61		
3 100	14.24	-0.22	14.20		
4 100	45.46	-0.29	43.74		

对表1中的数据分析可知:

- (1)各位置中心处的误差明显小于边角误差,表1中中心误差最大达到0.29 mm,边角误差最大达到45.46 mm,该误差规律并不完全符合TOF相机三角关系误差原理,这可能因为Kinect v2深度误差已在出厂时进行了初步补偿,但这种补偿只在中心范围内效果较好,边缘范围仍存在较大误差。
- (2) 在边角处"翘起"的误差分布规律,并不完全符合 TOF 误差原理,该"翘起"误差并不是朝一个方向,呈现出先向内翘起,之后逐渐呈现外翘起,参考文献[10,13,15-16]皆描述了该现象,这种现象可能是由于 Kinect 出厂前进行了一定程度的补偿。同时,Yang<sup>[15]</sup>分析可能是由于深度数据随机方差的衍射造成的。Pagliari<sup>[16]</sup>分析可能是由系统的光学畸变以及不适当建模造成的失真。Corti <sup>[13]</sup>分析可能是由传感器矩阵中的缺陷造成的。正是由于这种现象的存在,所以丁津津、王乐等人的基于小孔成像的三角原理的补偿方法不能被广泛应用。而文中方法直接根据设备的误差现象建立模型,不受误差的表现形式影响。

对 20 组数据中每组 100 个数据使用公式(2)、(3)进行处理后,得到 20 组的误差数据,使用公式(4)、(5)对补偿值进行拟合并映射到第二象限内。再根据公式(6)将补偿值映射为等效距离为自变量,误差补偿值为因变量的误差补偿模型。其中等效距离为 265 时的误差补偿变化曲线如图 9 所示。

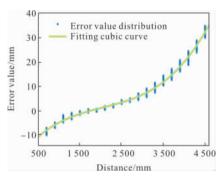
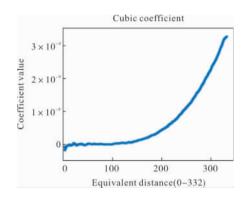


图 9 等效距离为 265 时的误差补偿曲线

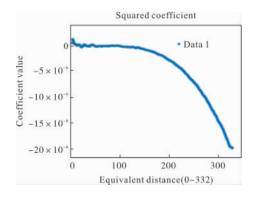
Fig.9 Error compensation curve with equivalent distance of 265

之后再使用公式(7)对333种等效距离的误差补偿函数的系数项 q1,q2,q3,q4进行三次多项式拟合。得到关于误差补偿模型的参数函数模型,如图10所示。

为了验证算法的有效性,在得到补偿模型后,分别采集900、1200、1700、2200、2700、3200、3700、4100mm处的被测平面数据,并使用模型进行误差补偿,补偿前后残差图对比如图11所示。对平面数

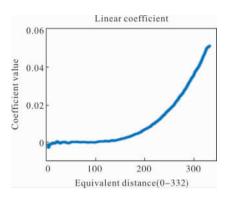


- (a) 三次方系数项(q1)变化规律
- (a) Change rule of cubic coefficient(q1)



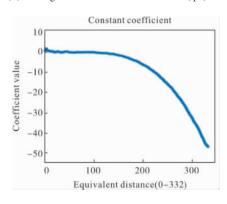
(b) 二次方系数项(q2)变化规律

(b) Change rule of squared coefficient(q2)



(c) 一次方系数项(q3)变化规律

#### (c) Change rule of linear coefficient(q3)



(d) 常数项系数(q4)变化规律

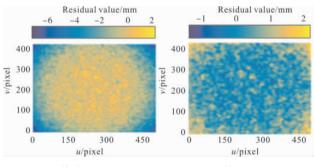
#### (d) Change rule of constant coefficient(q4)

图 10 不同等效距离下的误差补偿系数项变化规律

Fig.10 Variation rule of error compensation coefficient term under different equivalent distances

据分别计算了补偿前后的最大误差、平均误差、标准差,如表2所示。

表 2 中补偿前最大误差 50.209 3 mm,补偿后下降到 4.2 mm 内,减小了约 91%;补偿前最大平均误差为 8.152 7 mm,补偿后下降到 0.704 0 mm 内,



- (a1) 补偿前 1 200 mm
- (a1) 1 200 mm before compensation
- (a2) 补偿后 1 200 mm
- (a2) 1 200 mm after compensation

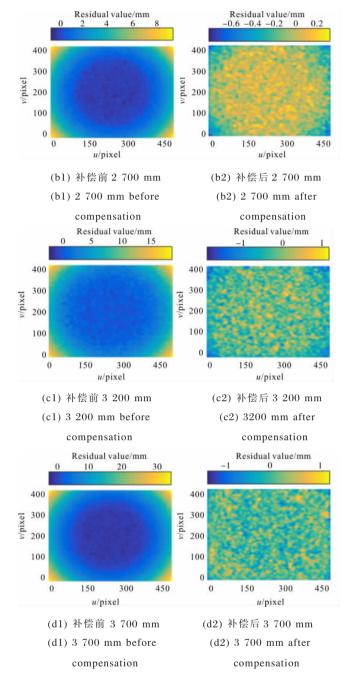


图 11 不同位置处误差补偿前后残差图对比

Fig.11 Comparison of residual maps before and after error compensation at different positions

下降了约 91%;补偿前最大标准差为 9.226 1,补偿后下降到 0.569 4,下降了约 93%。Hamed<sup>[23]</sup>在对 Kinect v2 进行补偿后平面度误差在 1.65 mm 内,牛振岐<sup>[20]</sup>补偿后的平面度误差在 0.68 mm 内,经文中方法补偿后平面度误差在 0.62 mm 内。因此,文中方法能够有效改善 Kinect v2 的测量结果,提高测量精度。

## 表 2 不同位置误差补偿前后分析(最大误差、平均误差、标准差、平面度误差)

Tab.2 Analysis before and after error compensation for different positions (maximum error, average error, standard deviation, flatness error)

Distance/mm	Maximum error (Absolute value)/mm		Mean error (Absolute value)/mm		Standard deviation		Flatness error	
	Before compensation	After compensation	Before compensation	After compensation	Before compensation	After compensation	Before compensation	After compensation
900	14.842 6	0.576 1	2.502 9	0.127 4	2.707 0	0.134 1	1.447 4	0.326 3
1 200	8.893 9	2.259 6	1.438 7	0.532 8	1.585 7	0.603 7	1.029 8	0.586 9
1 700	1.596 5	0.409 9	0.240 6	0.704 0	0.261 0	0.091 1	0.448 7	0.269 1
2 200	3.299 0	1.423 2	0.530 1	0.253 2	0.582 5	0.241 7	0.669 7	0.432 8
2 700	9.658 3	1.070 2	1.617 9	0.141 3	1.711 7	0.177 0	1.144 9	0.323 2
3 200	21.062 5	2.991 4	3.112 2	0.495 3	3.450 3	0.560 7	1.611 3	0.541 2
3 700	34.798 3	2.186 6	5.711 4	0.326 7	6.379 0	0.411 4	2.214 4	0.449 9
4 100	50.209 3	4.169 4	8.152 7	0.424 7	9.226 1	0.569 4	2.673 7	0.626 3

# 4 结束语

基于 TOF 原理的深度传感器,由于直接采集到 的数据精度不足,直接影响后期点云处理和三维重 建精度。对 TOF 原理以及误差现象进行分析,提出 了一种 TOF 相机的实时高精度误差补偿方法,该方 法将误差查找表和曲线拟合相结合,并利用旋转对 称模型、等效距离与误差值相关性,建立了补偿模 型。该方法只需要进行一次误差模型拟合,在后续的 补偿过程反向求解模型参数,即可对误差进行补偿。 将该方法应用于 Kinect v2 深度传感器误差补偿,在 有效范围内平面度误差不仅下降到 0.63 mm 内,而 且平均误差下降到 0.704 0 mm 内, 有效降低了 Kinect v2 的深度误差,并且将补偿模型参数规模降 低到16个,在滤波的同时即可进行补偿,有效地提 高了补偿速度。由于文中方法是基于 TOF 光径差原 理进行补偿,因此对各类 TOF 相机具有普遍适应 性。实验结果表明,该方法能够有效补偿 TOF 测量 原理的深度传感器,适用于实时、高精度大视场下三 维重建。

# 参考文献:

[1] Li Shirui, Li Qi, Li Haiyang, et al. Real-time accurate 3D reconstruction based on Kinect v2 [J]. Journal of Software, 2016, 27(10): 2519-2529. (in Chinese) 李诗锐, 李琪, 李海洋, 等. 基于 Kinect v2 的实时精确三维重建系统[J]. 软件学报, 2016, 27(10): 2519-2529.

- [2] Péter Fankhauser, Bloesch M, Rodriguez D, et al. Kinect v2 for mobile robot navigation: Evaluation and modeling [C]// International Conference on Advanced Robotics, IEEE, 2015.
- [3] Li Xingdong, Li Mantian, Guo Wei, et al. Estimating 6 DOF pose transformation of a TOF laser camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (7): 2231–2238. (in Chinese)
  - 李兴东,李满天,郭伟,等.TOF激光相机六自由度位姿变换估计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2231-2238.
- [4] Gilles M, Fayad H, Miglierini P, et al. EP-1511: Patient positioning using surface images from Time-of-Flight (ToF) cameras [J]. Radiotherapy and Oncology, 2015,115: S823.
- [5] Bu Yuming, Du Xiaoping, Zeng Zhaoyang, et al. Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 711-727. (in Chinese)
  - 卜禹铭, 杜小平, 曾朝阳, 等. 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 711-727.
- [6] Hansard M, Lee S, Choi O, et al. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications [M]. Heidelbery Germany: Springer Publishing Company, Incorporated, 2012.

- [7] Lachat E, Hélène Macher, Landes T, et al. Assessment and calibration of a RGB-D camera (Kinect v2 sensor) towards a potential use for close-range 3D modeling[J]. \*Remote Sensing\*, 2015, 10(7): 13070-13097.
- [8] Li Qinghui, Li Aihua, Zheng Yong, et al. Action recognition using geometric features and recurrent temporal attention network [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2584-2591. (in Chinese) 李庆辉, 李艾华, 郑勇, 等. 利用几何特征和时序注意递归 网络的动作识别[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(10): 2584-2591.
- [9] Liu Zhiqiang, Yin Jianqin. Human action recognition based on Kinect data principal component analysis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 702-711. (in Chinese) 刘志强, 尹建芹. 基于 Kinect 数据主成分分析的人体动作识别[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(10): 702-711.
- [10] Lachat E, Macher H, Mittet M A, et al. First experiences with Kinect V2 sensor for close range 3D modelling [C]//ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, XL-5/W4(5): 93-100.
- [11] Zhang Xu, Shao Shuangyun, Zhu Xiang, et al.

  Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system [J].

  Chinese Optics, 2018, 11(1): 123-130. (in Chinese)
  张旭, 邵双运, 祝祥, 等. 光学三维扫描仪光强传递函数的
  测量和校正[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 123-130.
- [12] 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): 1041004. (in Chinese) 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): 1041004.
- [13] Corti A, Giancola S, Mainetti G, et al. A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera [J]. Robotics & Autonomous Systems, 2016, 75 (PB): 584-594.
- [14] Butkiewicz T. Low-cost coastal mapping using Kinect

- v2 time-of-flight cameras[C]//Oceans. IEEE, 2015.
- [15] Yang L, Zhang L, Dong H, et al. Evaluating and improving the depth accuracy of Kinect for windows v2
  [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(8): 4275-4285.
- [16] Pagliari D, Menna F, Roncella R, et al. Kinect fusion improvement using depth camera calibration [J]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing & S, 2014, XL-5(5): 479-485.
- [17] Wang Le, Luo Yu, Wang Haikuan, et al. Measurement error correction model of ToF depth camera[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29 (10): 2323-2329. (in Chinese)
  王乐, 罗宇, 王海宽, 等. ToF 深度相机测量误差校正模型
- [J]. 系统仿真学报, 2017, 29(10): 2323-2329.
  [18] Ding Jinjin. Error analysis and compensation research of the TOF 3D camera [D]. Heifei: Hefei University of
  - Technology, 2011. (in Chinese) 丁津津. TOF 三维摄像机的误差分析及补偿方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [19] Shim H, Adelsberger R, Kim J D, et al. Time-of-flight sensor and color camera calibration for multi-view acquisition [J]. *The Visual Computer*, 2012, 28 (12): 1139-1151.
- [20] Niu Z Q, Liu K. Pixel-by-pixel depth measurement error compensation method for Kinect [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2016, 27(11): 1169-1175.
- [21] Zhang Hong, Zheng Zijun, Sun Chunlong. Research on system error compensation in depth measurement of kinect[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(12): 120-25. (in Chinese) 张洪,郑梓均,孙春龙. Kinect 深度测量的系统误差补偿研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(12): 120-125.
- [22] Jung J, Lee J Y, Jeong Y, et al. Time-of-flight sensor calibration for a color and depth camera pair [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 37(7): 1501-1513.
- [23] Hamed Sarbolandi, Damien Lefloch, Andreas Kolb. Kinect range sensing: structured-light versus time-of-flight kinect [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2015, 139: 1-20.