

# 改进的 TOF 相机谐波和强度误差校正算法设计

蒋彬, 金湘亮\*

湖南师范大学物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410081

**摘要** 基于反射光强度和深度二维变量的含加性权值 B 样条曲面误差拟合被用于校正由目标场景的低反射率或长距离引起的弱光强度相关深度误差。与传统的 B 样条曲面误差拟合相比,改进的模型使用权值参数优化每个曲面片的部分控制点,获得了更精确的误差拟合曲面片,使得平均校正误差小于 2 mm,精度提高了近 2 倍。此外,为克服乘性权值矩阵无法通过最小二乘法获取的难题,对每个控制点添加加性权值参数,实现相机参数校准过程中一次性求得控制点参数矩阵和加性权值参数矩阵。同时,考虑到谐波相关误差也与深度相关,将谐波相关误差的校正统一到校正方法中。

**关键词** 成像系统; 飞行时间法; 谐波相关误差; 强度相关误差; B 样条曲面拟合; 加性权值

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111024

## Improved Correction Algorithm for Harmonic- and Intensity-Related Errors in Time-of-Flight Cameras

Jiang Bin, Jin Xiangliang\*

School of Physics and Electronics, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China

**Abstract** This study uses a B-spline surface error fitting function based on reflected light intensity and depth two-dimensional variable with additive weights to correct the weak light intensity-related depth error that occurs because of the low reflectivity or long distance of the target scene. In contrast to the traditional B-spline surface error fitting, the improved model uses weight parameters to optimize partial control points of each surface to obtain a more accurate error-fitting surface. It allows average correction errors to be less than 2 mm, which is nearly three times the accuracy of the traditional model. Furthermore, the additive weight parameter is added to each control point, which ensures that the parameter matrices of control points and additive weight can be obtained in a single step during the camera parameter calibration process, overcoming the issue that the multiplicative weight matrix cannot be obtained by the least squares method. Moreover, considering that the harmonic-related error is also connected to depth, the correction of the harmonic-related error is unified into the proposed correction method.

**Key words** imaging systems; time of flight; harmonic related error; intensity related error; B-spline surface fitting; additive weight

**OCIS codes** 110.6880; 100.6890; 100.3008

## 1 引 言

3D 信息的获取已经成为许多领域的重要应用。获取三维深度信息主要有三种方法:立体视觉系统、结构光系统和飞行时间法(TOF)相机。立体视觉系统通过先进的匹配算法可以得到高精度的深度信息<sup>[1]</sup>,而结构光系统在强光或高反射率场景条件下需要进行投射优化补偿以实现高精

度的深度图像获取<sup>[2]</sup>。与其他两种方法相比,TOF 相机结合了近红外主动照明和简单原理的优点,可以提供准确的光强度和深度信息,其帧率高,具有单一视点的高分辨率以及结构紧凑等优点,可大量用于机器人导航、手术成像、人机交互和形状重建等新兴领域。

最常见的调幅连续波 TOF 相机主要由调幅连续波光源和光电探测器组成。正弦调制光源发射的

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-10-06; 录用日期: 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61827812,61774129)、湖南省科技厅湖湘高层次人才集聚项目(2019RS1037)、长沙市科技计划重点项目(kq1801035)

\* E-mail: jinxl@hunnu.edu.cn

近红外(NIR)信号被目标场景点反射后,由探测器接收并获得其相位偏移。由相移可以得到近红外光的飞行时间以及准确的场景深度信息。但由于其独特的测距原理和硬件结构,TOF相机在测距过程中会引入各种系统和非系统误差。这些误差是由许多因素引起的,例如硬件系统噪声、像素差异(或固定模式噪声)、谐波干扰、芯片温度、积分时间、多路径信号接收、运动模糊、强光引起的像素饱和,以及弱光引起的深度偏移等。本研究中是谐波干扰和弱光强度引起的深度误差。

谐波干扰会使测量深度偏离实际深度,其偏离程度会随着被测深度周期性摆动。这种摆动效应的产生是因为调制和解调信号实际上并不是理想的正弦信号,会叠加高次谐波。根据谐波相关误差形成的原因,可以通过修改调制解调方案来进行校正<sup>[3]</sup>,这类方法要进行大量不同相位的数据采集。弱光强度目标场景对应的像素点也会产生错误的深度信息,从而引起强度相关误差。该误差是由相机光学系统内部散射造成的。严重的内部散射来自于近距离或高反射率物体的强光信号的污染。这些强光信号在相机内部经不均匀镜片材料反射后,又被弱光照或低反射率的背景所对应的像素点区域接收,从而产生辐射式的大面积深度失真。一种校正方法是设计合适的空间点扩展函数来表示该散射误差模型,然后通过去卷积的方法消除散射效应的影响<sup>[4]</sup>,该类方法对于光强对比度较大的区域校正效果不佳。

强度相关误差受到测量光强度和深度两个因素的影响<sup>[5-6]</sup>,通常可以在后期数据处理中利用查找表或拟合函数对其和谐波相关误差进行统一补偿校正。第一类补偿校正方法是建立基于光强度和深度数据的二维误差查找表,利用误差查找表中相邻条目的插值来补偿原始深度<sup>[7-9]</sup>。其中 Hussmann 等<sup>[7]</sup>基于近测距区域建立的二维查找表在 0.15~0.25 m 范围内的平均校正误差为 4.8 mm。Ferstl 等<sup>[9]</sup>基于回归森林建立了光强度和深度数据与深度偏移量之间类似于查找表的直接映射,该方法在简单场景中的平均校正误差为 2.65 mm,复杂场景下该误差上升为 52.18 mm。

第二类方法是利用查找表与函数拟合相结合的方法进行谐波和强度相关误差的补偿校正<sup>[10-15]</sup>。这类方法按照像素光强度大小或其与相邻像素的光强对比度建立不同条目数量的一维查找表,而在任意条目内随测量深度变化的误差部分则使用多项式<sup>[10-12]</sup>、B样条<sup>[12-15]</sup>等来进行拟合。Jung 等<sup>[14]</sup>根据

像素光强及其与邻域像素的对比度不同进行聚类查找,并结合 B 样条误差曲线拟合进行补偿校正,该方法进行补偿的平均误差为 3.8 mm。Chen 等<sup>[15]</sup>结合光强度分区查找与 B 样条曲线进行误差拟合,其平均校正误差约为 5 mm。

第三类方法是设计基于光强度和深度二维变量的曲面误差拟合函数进行校正<sup>[6,16-20]</sup>。研究者们根据谐波和强度相关误差的变化特点设计了 B 样条曲面拟合<sup>[6,17-18]</sup>,以及利用基于正弦(或其线性叠加)函数结合样条函数<sup>[19-21]</sup>等的二维曲面拟合模型进行补偿校正。其中 Lindner 等<sup>[6]</sup>设计的误差模型在 0.9~4 m 范围内,实现了 3.2 mm 的最小校正误差,但最大误差有 17.3 mm。Mersmann 等<sup>[19]</sup>所采用的误差拟合模型的平均校正误差为 2.4 mm,而同样条件下用于实验对比的 B 样条曲面误差拟合补偿的平均误差为 13.0 mm。Jiao 等<sup>[20]</sup>使用三个正弦函数的叠加对随深度变化的误差部分进行拟合,而采用样条函数对随光强度变化的误差部分进行拟合,以此形成了基于深度和光强度变化的二维误差校正曲面,其在 0.7~2.1 m 范围内低反射率情况下的校正平均误差为 6 mm。

本文将计算机图形学中的 B 样条曲面拟合方法用于误差拟合补偿,并且对得到的误差拟合曲面中每一个曲面片的部分控制点自适应地添加加权值参数,使得优化后的控制点矩阵可以更好地拟合实际误差,从而显著提高补偿精度。此外,由于采用加权值对控制点进行优化,权值参数和控制点参数矩阵可以在参数校准过程中通过一次最小二乘法拟合同时获得,权值参数的获取方便,并没有显著增加参数校准过程所需的校准数据和工作量。

## 2 TOF 测距原理

TOF-3D 测距是一种基于飞行时间原理的间接测距技术。如图 1 所示,由正弦信号进行幅度调制的照明单元发射 NIR 光,被目标场景反射,并最终由光电探测器的像素阵列接收。在单个调制周期的  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  四个不同相位,使用参考信号(一般为正弦信号)对接收的光信号进行相关积分采样,可以得到  $x(0), x(1), x(2), x(3)$  四个相关采样值。由离散傅里叶变换可以计算出光信号的相位偏移  $\varphi$ ,即

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{x(3) - x(1)}{x(0) - x(2)} \right] - \theta, \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为参考信号的初始相位,通常被设置为 0。

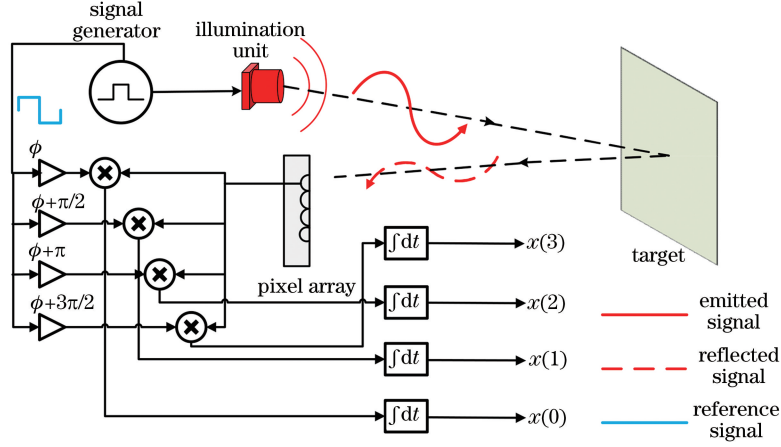


图 1 TOF 相机的信号处理过程

Fig. 1 Signal processing of TOF cameras

像素对应场景点的深度值  $d$  与相位偏移  $\varphi$  成正比,可表示为

$$d = \frac{c}{4\pi f} \varphi, \quad (2)$$

式中:  $f$  为光源调制信号和解调参考信号的频率;  $c$  为光在空气中的传播速度。

接收光信号的幅度  $a$  可表示为

$$a = \frac{\sqrt{[x(3) - x(1)]^2 + [x(2) - x(0)]^2}}{2}. \quad (3)$$

考虑到光强度是由正弦信号进行幅度调制得到的,幅度  $a$  可以表示每个像素的入射光强度大小。通过(2)式和(3)式分别计算出每个像素的深度和光强度信息。由此,TOF 相机同时获取了目标场景区域的深度和光强度图像。

### 3 谐波与强度相关误差改进校正模型

#### 3.1 传统校正模型

在后期数据处理中,有三类对谐波和强度相关误差进行补偿校正的方法:第一、二类方法要实现较高精度都需要进行精细的查找表条目划分,这对参数校准和存储空间提出了较高的要求。第三类方法中很多研究者采用双三次 B 样条曲面误差拟合模型,其补偿精度较高,稳定性强。该误差拟合方式基于光强度和深度两个变量得到了一个曲面误差拟合函数,表达式为

$$Q(a, d) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n N_i^3(a) \cdot N_j^3(d) \cdot P_{i,j}, \quad (4)$$

式中:  $N_i^3$  为均匀三次 B 样条拟合的基函数;  $P_{i,j}$  为决定曲面形状的控制点参数;  $m \times n$  为控制点参数

矩阵的大小。将每个像素处的测量光强度和深度代入误差拟合曲面中就可以计算出深度补偿量。

在 TOF 相机参数校准过程中,需要预先对 B 样条误差拟合函数的各个控制点参数进行校准,这是精确地拟合出各个深度和强度处的深度误差的关键的一步。为了获取精确的控制点参数矩阵,需要通过实验测量获取足够多的三维数据集  $\{(a_k, d_k, d_{k\_ref}) | k \in K\}$ , 其中  $a_k, d_k$  分别为像素点的接收光强度和初测深度,二者均由 TOF 相机测量得到,  $d_{k\_ref}$  为像素点对应场景点的实际参考深度,可由高精度的深度扫描仪准确获取。将这  $K$  组三维数据带入(5)式得到一组线性方程,然后由最小二乘法解出控制点参数矩阵:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n N_i^3(a_k) \cdot N_j^3(d_k) \cdot P_{i,j} = d_k - d_{k\_ref}. \quad (5)$$

双三次 B 样条误差曲面拟合的方法将谐波相关误差和强度相关误差进行统一校正,但与其他误差拟合模型相比,其校正精度没有明显提高。如图 2 所示,在误差拟合曲面中截取第  $i$  个强度结点处的一条三次 B 样条拟合曲线。可以看出任意控制点参数  $P_{i,j}$  决定了第  $j-3, j-2, j-1, j$  这 4 个深度结点区间的拟合曲线段形状,扩展到整个 B 样条拟合曲面,则  $P_{i,j}$  决定了  $\{(s, t) | s = i-3, \dots, i; t = j-3, \dots, j\}$  共 16 个网格结点区间的拟合曲面片形状。校准过程使用最小二乘法估计控制点参数,即要求出使拟合曲面上各个拟合误差值与实际观测误差值之间偏差的平方和最小的控制点参数集合。考虑到基函数的周期性 ( $N_i^3 = N_{i+4}^3, N_j^3 = N_{j+4}^3$ ), 故有

$$\{P_{i,j} \mid i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\} = \operatorname{argmin} \left[ \sum_{k=1}^K (d_k - d_{k\_ref} - \sum_{i=4}^m \sum_{j=4}^n \sum_{h=1}^4 \sum_{q=1}^4 N_h^3(a_k) \cdot N_q^3(d_k) \cdot \hat{P}_{i-h+1, j-q+1})^2 \right], \quad (6)$$

式中： $\hat{P}_{i,j}$  和  $P_{i,j}$  分别为控制点参数变量以及最佳的控制点参数； $q, h$  分别表示深度和强度两个维度

上进行 B 样条拟合的四个基函数的序列号； $k$  为所有三维数据点的序列号。

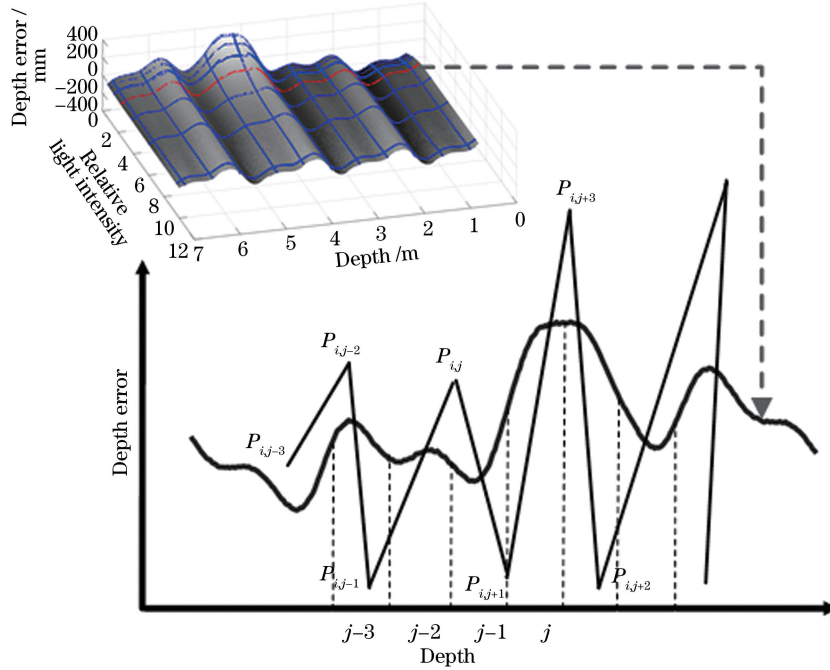


图 2 深度误差拟合曲面中三次 B 样条拟合曲线示意图

Fig. 2 Cubic B-spline fitting curve in depth error fitting surface

由于任意一个控制点参数  $\hat{P}_{i,j}$  都决定了相邻 16 个误差拟合曲面片形状(图 2 所示), 要使 (6) 式

取得极小值, 最佳控制点参数  $P_{i,j}$  应使(6)式一阶偏导数为零:

$$\frac{\partial}{\partial \hat{P}_{i,j}} \left\{ \sum_{\alpha=i-3}^i \sum_{\beta=j-3}^j \underbrace{\left[ \sum_{\Omega_{\alpha,\beta}} (d_k - d_{k\_ref} - \sum_{h=1}^4 \sum_{q=1}^4 N_h^3(a_k) \cdot N_q^3(d_k) \cdot \hat{P}_{\alpha+h-1, \beta+q-1})^2 \right]}_{\Gamma(\alpha,\beta)} \right\} \Big|_{\hat{P}_{i,j}=P_{i,j}} = 0, \quad (7)$$

式中： $\Omega_{\alpha,\beta}$  为属于  $(\alpha, \beta)$  网格区间的三维数据点集合； $\Gamma(\alpha, \beta)$  为该网格区间的拟合偏差的平方和。(7)式并不能保证 16 个网格区间内每个曲面片的  $\Gamma(\alpha, \beta)$  恒取最小值。

$$\frac{\partial}{\partial \hat{P}_{i,j}} \Gamma(\alpha, \beta) \Big|_{\hat{P}_{i,j}=P_{i,j}} \equiv 0, \alpha = i - 3, \dots, i, \quad (8)$$

$$\beta = j - 3, \dots, j,$$

即(8)式不成立。因此, 求得的最佳控制点参数  $P_{i,j}$  只是使得由其决定的 16 个曲面片整体拟合精度最高。而对于其中每个单独的拟合曲面片,  $P_{i,j}$  并不是最佳的, 故该模型的误差拟合精度并不高。

### 3.2 改进的校正模型

对于决定每个拟合曲面片形状的大小为  $4 \times 4$  控制点矩阵, 取其中间大小为  $2 \times 2$  的子矩阵分别添加不同的权值, 使得在不同的曲面片中可以自适应地调整同一个控制点的值, 从而提高误差拟合的精度。对于任意第  $i$  个强度结点区间和第  $j$  个深度结点区间组成的二维网格区间, 使其误差曲面片中的控制点中间子矩阵  $[P_{i+1, j+1}, P_{i+1, j+2}; P_{i+2, j+1}, P_{i+2, j+2}]$  加上权值参数矩阵  $[\omega_{i, j, 1}, \omega_{i, j, 2}; \omega_{i, j, 3}, \omega_{i, j, 4}]$ ; 从而, 决定  $(i, j)$  曲面片形状的 16 个控制点参数的中间 4 个控制点参数  $\{P_{i+1, j+1}, P_{i+1, j+2}, P_{i+2, j+1}, P_{i+2, j+2}\}$  可以自适应地调节大小, 使得

$(i, j)$  曲面片的拟合偏差平方和  $\Gamma(i, j)$  对这四个控制点参数变量的偏导数恒为零。

$$\frac{\partial}{\partial \hat{P}_{i+h, j+q}} \Gamma(i, j) \Big|_{\hat{P}_{i+h, j+q} = P_{i+h, j+q} + w_{i, j, 2 \cdot (h-1) + q}} \equiv 0, \quad h=1, 2, q=1, 2, \quad (9)$$

即(9)式成立。因此改进的校正模型中,任意 $(i, j)$ 拟合曲面片的 $4 \times 4$ 控制点矩阵的中间 $2 \times 2$ 个控制点参数不仅对于整个误差拟合曲面是最佳的,而且在其本身所在的 $(i, j)$ 曲面片中也经过最小二乘拟合达到了最优,该改进模型的误差拟合精度得到了很大提高。

改进模型可以得到拟合精度更高的误差曲面片  $Q_{i, j}(a, d)$ , 可表示为

$$Q_{i, j}(a, d) = \sum_{s=i}^{i+3} \sum_{t=j}^{j+3} N_s^3(a) \cdot N_t^3(d) \cdot P_{s, t} + \sum_{s=i+1}^{i+2} \sum_{t=j+1}^{j+2} N_s^3(a) \cdot N_t^3(d) \cdot w_{i, j, 2 \cdot (s-i-1) + (t-j)}, \quad (10)$$

式中: $Q_{i, j}(a, d)$ 的形状是由该曲面片的控制点矩阵和权值参数矩阵共同决定的。这里将权值矩阵表示为

$$w_{i, j} = [w_{i, j, 2 \cdot (s-i-1) + (t-j)}]_{s=i+1, i+2; t=j+1, j+2}. \quad (11)$$

最终,可以得到整个误差曲面拟合函数为所有误差曲面片函数的总和:

$$Q(a, d) = \sum_{i=1}^{m-3} \sum_{j=1}^{n-3} \left[ \sum_{s=i}^{i+3} \sum_{t=j}^{j+3} N_s^3(a) \cdot N_t^3(d) \cdot P_{s, t} + \sum_{s=i+1}^{i+2} \sum_{t=j+1}^{j+2} N_s^3(a) \cdot N_t^3(d) \cdot w_{i, j, 2 \cdot (s-i-1) + (t-j)} \right]. \quad (12)$$

误差曲面拟合函数  $Q(a, d)$  的控制点参数矩阵和权值参数矩阵可以在 TOF 相机的参数校准过程中通过一次最小二乘拟合合同时获得。将校准过程中实验测量得到的三维数据集  $\{(a_k, d_k, d_{k\_ref}) | k \in K\}$  代入(12)式,可以得到  $K$  组线性方程,表达式为

$$\sum_{i=1}^{m-3} \sum_{j=1}^{n-3} \left[ \sum_{s=i}^{i+3} \sum_{t=j}^{j+3} N_s^3(a_k) \cdot N_t^3(d_k) \cdot P_{s, t} + \sum_{s=i+1}^{i+2} \sum_{t=j+1}^{j+2} N_s^3(a_k) \cdot N_t^3(d_k) \cdot w_{i, j, 2 \cdot (s-i-1) + (t-j)} \right] = d_k - d_{k\_ref}, \quad (13)$$

式中: $k=1, 2, \dots, K$ 。

将大小为  $m \times n$  的控制点矩阵表示成

$$\mathbf{P} = [P_{1,1}, \dots, P_{1,n}; \dots; P_{i,1}, \dots, P_{i,n}; \dots; P_{m,1}, \dots, P_{m,n}]. \quad (14)$$

将大小为  $(m-3) \cdot (n-3) \cdot 4$  的三维加权矩阵也表示成

$$\mathbf{w} = [w_{1,1}, \dots, w_{1,n-3}; \dots; w_{i,1}, \dots, w_{i,n-3}; \dots; w_{m-3,1}, \dots, w_{m-3,n-3}]. \quad (15)$$

这样可以将由(13)式得到的  $K$  组线性方程表示成矩阵与向量乘积的形式:

$$\mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (16)$$

式中: $\boldsymbol{\xi} = [\mathbf{P}, \mathbf{w}]^T$ ;  $\boldsymbol{\varepsilon} = [d_1 - d_{1\_ref}, \dots, d_K - d_{K\_ref}]^T$ 。 $\mathbf{M}$  是一个大小为  $K \cdot [m \cdot n + (m-3) \cdot (n-3) \cdot 4]$  的矩阵,由  $K$  个行向量  $\mathbf{M}_k$  组成。当第  $k$  组三维数据  $(a_k, d_k, d_{k\_ref})$  在由第  $i$  个强度结点区间和第  $j$  个深度结点区间组成的二维网格区间时,  $\mathbf{M}_k$  可以表示为

$$\mathbf{M}_k = [\mathbf{O}_1, [N_s^3(a_k) \cdot N_t^3(d_k)]_{s=i, \dots, i+3; t=j, \dots, j+3}, \mathbf{O}_2, [N_s^3(a_k) \cdot N_t^3(d_k)]_{s=i+1, i+2; t=j+1, j+2}, \mathbf{O}_3], \quad (17)$$

式中: $\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \mathbf{O}_3$  分别为阶数不同的零向量。

(16)式为以所有待求控制点参数和加权值参数为未知量的线性超定方程组,可以通过最小二乘法解该方程组求得  $\boldsymbol{\xi}$ :

$$\boldsymbol{\xi} = (\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})^{-1} \cdot \mathbf{M}^T \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (18)$$

对向量  $\boldsymbol{\xi}$  进行分解和组合最终可分别得到控制点矩阵和加权值矩阵。

## 4 仿真与结果分析

本文的 TOF 模拟测距相机是基于四相移积分采样原理,同时参考了大量关于谐波相关误差和强度相关误差的文献数据而得到的<sup>[2, 5-6, 22-27]</sup>。只要输入参考深度图像矩阵及其对应的相对光强度图像矩阵,就可获得由谐波和弱光强度影响而产生的错误深度数据及其光强度数据。比较图 3 与表 1 数据,测量得到的数据与文献中<sup>[5-6, 22, 24, 26]</sup>的数据基本相吻合。因此,该 TOF 模拟测距相机是可以用于模拟真实的场景实验的。

实验中 TOF 模拟相机的光源调制信号和解调信号分别采用同频的余弦和方波波形,其频率均设置为 20 MHz。根据(2)式可得到模拟相机的最大测量深度为 7.5 m,因此误差拟合补偿模型的校正深度范围也为 0~7.5 m。同时为了消除积分时间不同造成的光强度变化,实验采用的积分时间均为调制周期的  $10^3$  倍,其大小为 0.05 ms。校正过程中,对实验获取的原始深度数据分别采用传统模型和改进模型进行校正,两个模型在光强和深度两个维度的控制点数量分别设置为 5 和 12。

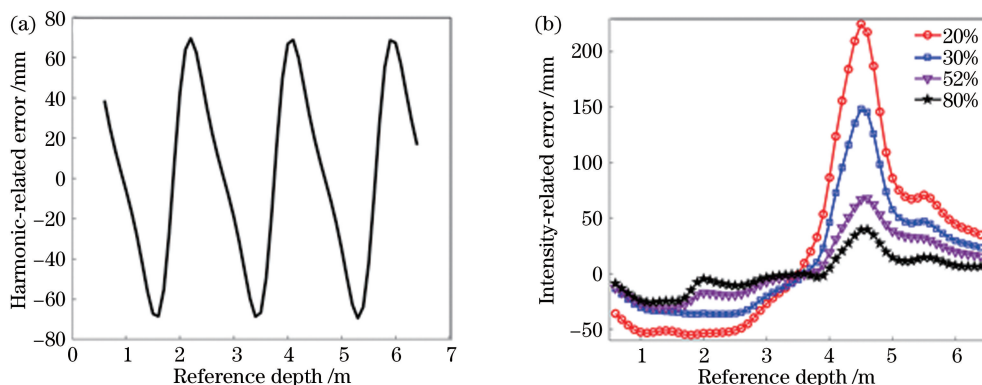


图 3 TOF 模拟测距相机所测谐波与强度相关误差。(a)测量谐波相关误差;(b)不同反射率目标下测量强度相关误差  
Fig. 3 Harmonic- and intensity-related errors measured by TOF simulation ranging camera. (a) Harmonic-related error;  
(b) intensity-related errors for different reflectivity targets

表 1 相关文献中<sup>[5-6,22,24,26]</sup>由 TOF 相机测得的不同反射率目标下部分原始深度偏移数据

Table 1 Partial raw depth deviation data measured by TOF camera in related references<sup>[5-6,22,24,26]</sup>

Reference depth / m	Deviation / mm			Reference depth / m	Deviation / mm
	20%	52%	80%		
2.0	-51.7	-16.4	-3.9	0.9	25.3
2.5	-52.8	-20	-11.6	1.1	35.0
3.0	-26.9	-7.2	-3.3	1.3	32.4
3.5	7.1	-1	-5.4	1.7	37.2
4.0	56.3	9.6	-1.2		
4.5	226.7	67.9	40.3		

#### 4.1 不同反射率的平板实验

在第一个实验中,不同光反射率的平板放置于 TOF 相机正前方不同参考深度处,TOF 相机同时测量得到平板的初始深度和光强度图像。对深度图

像分别采用传统 B 样条误差拟合模型和改进拟合模型进行补偿校正。为了减小相机测距引入的高斯和泊松噪声对实验数据的影响,取校正后残余误差图像矩阵的均值作为深度校正误差。

对同一反射率平板在 0.6~6.4 m 范围内每隔 0.1 m 的测量深度图像进行校正。如图 4(a)和图 4(b)所示,可以对比两种方法在各个深度处的校正误差。传统模型的校正误差在部分深度处虽然可以达到 5 mm 以下的精度,但其最大误差接近 20 mm。而改进模型的校正误差基本都稳定在了 5 mm 以下。表 2 给出了更具体的数据,改进模型的精度是传统模型的 3~4 倍,其在校正随深度变化的深度误差部分的性能优于传统模型。而且改进模型标准偏差也是传统模型的 1/3 左右,校正稳定性更高。

本研究实验同样对不同反射率平板在同一深度处的深度图像进行校正。如图 5 所示,分别在 1.8,

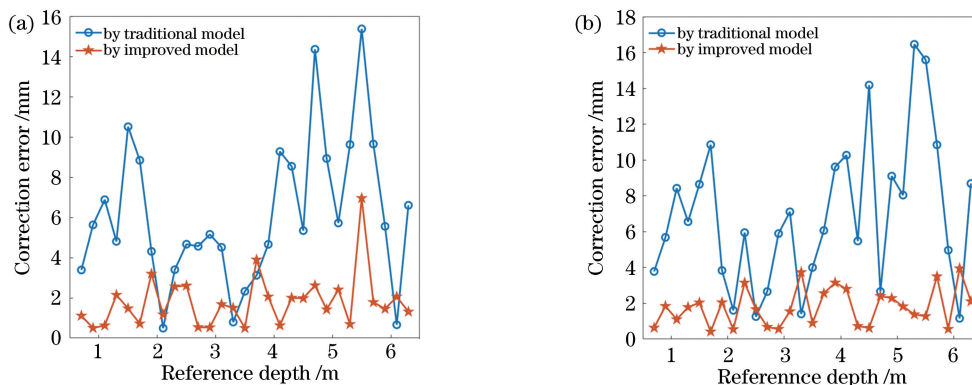


图 4 两种模型对同一反射率的平板在 0.6~6.4 m 范围内不同深度处进行校正的深度误差。  
(a)反射率为 25%;(b)反射率为 60%

Fig. 4 Depth error corrected by two models for plates with the same reflectivity at different depths in the range of 0.6~6.4 m.  
(a) Reflectivity of 25%; (b) reflectivity of 60%

表 2 同一反射率下各个深度处两种模型的平均校正误差与标准偏差

Table 2 Average correction error and standard deviation of two models under the same reflectance

Correction model	Mean Error /mm				Standard deviation /mm			
	25%	45%	60%	75%	25%	45%	60%	75%
Traditional model	5.58	5.75	6.11	6.45	3.63	3.56	4.18	4.82
Improved model	1.87	1.82	1.68	1.89	1.28	1.30	1.14	1.40

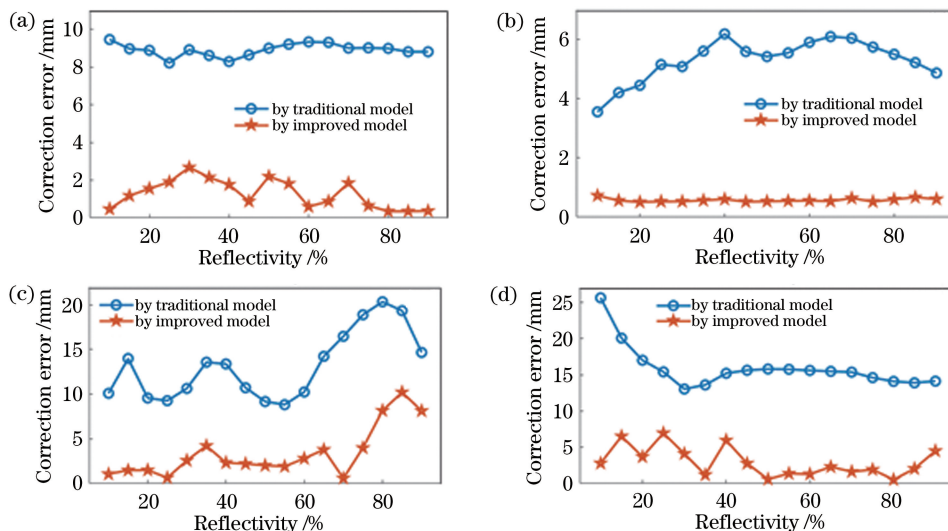


图 5 两种模型对不同反射率的平板在同一深度处进行校正的深度误差。(a) 1.8 m;(b) 2.9 m;(c) 4.1 m;(d) 5.5 m

Fig. 5 Depth error of plates with different reflectivity, respectively corrected by the two models at the same depth.

(a) 1.8 m; (b) 2.9 m; (c) 4.1 m; (d) 5.5 m

2.9,4.1,5.5 m 处对不同反射率的平板进行深度校正。可以看出传统模型在不同反射率下的校正误差普遍大于 5 mm,是本研究改进模型的 2 倍以上。而且传统模型校正的最大误差大于 25 mm,其精度在不同场景反射率下差异较大。而改进模型的校正误差基本都在 0~5 mm 范围内波动,比较稳定。因此,相比传统模型,含加权值的改进模型在校正随强度变化的深度误差部分这一方面不管是校正精度还是校正稳定性都有提高。

#### 4.2 人脸实验

在第二个实验中,TOF 模拟相机对其右前方的人脸进行深度测量及误差校正。如图 6 所示,人脸实际位于相机前方 1.7~1.8 m 处,位置稍靠右。因此脸部左半边比右半边辐射的近红外光强度大,如图 7(a)所示,相机接收光信号的强度从左向右逐渐减小。TOF 相机测得的深度图像如图 7(b)所示,人脸的深度图像位于 1.59~1.75 m 之间,而且人脸左右两边深度分布是不对称的。对比图 6(b)和 7(b)可以看出,人脸深度图像不仅整体发生了偏移,而且其内部各个部位的深度偏移大小也是不同

的,这就导致了人脸的位置错误和变形。事实上,整体的深度偏移是由谐波干扰和光强分布不均匀共同导致的。而由图 7(a)可看出,其人脸各部分的光照强度是不同的,这就导致了其内部各个部位的深度偏移不同。

分别使用两种模型对人脸深度图像进行校正,得到了如图 8 所示的校正后深度图像。通过图 8(a)和图 8(b)对比,两种模型都恢复了人脸左右两边的深度对称,由光强度变化引起的深度误差部分通过两种模型都得到了有效的补偿。但由于传统模型校正性能不稳定,在不同深度处的校正精度不同,因此并不能就此断定两种模型的随光强度变化的深度误差部分的校正性能相同。此外,图 8(a)所示经传统校正模型校正后的深度图像基本位于 1.71~1.81 m,而图 8(b)所示经改进模型校正后的深度图像基本位于 1.7~1.8 m。将它们和图 6(b)对比,含加权值的改进模型有效减小了整体深度偏移,其在校正随深度变化的深度误差部分的性能明显优于传统 B 样条误差拟合校正模型。

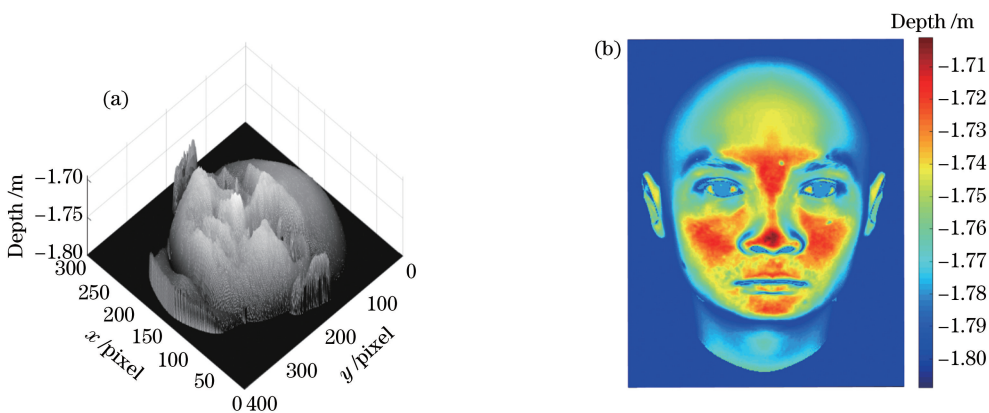


图 6 人脸实际位置深度图像。(a)三维深度图像;(b)深度颜色图像

Fig. 6 Actual position depth images of face. (a) 3D depth image; (b) depth color image

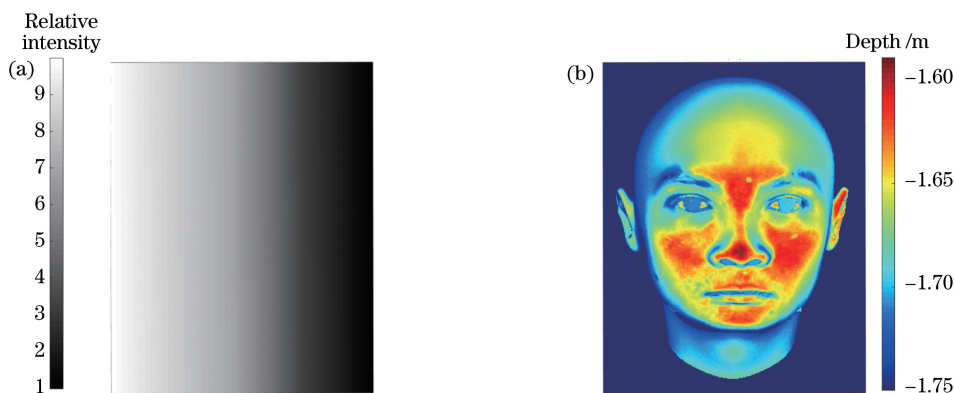


图 7 TOF 相机测量的光强度图像和深度颜色图像。(a)测量光强度图像;(b)测量深度图像

Fig. 7 Light intensity image and depth color image measured by TOF camera. (a) Measured light intensity image; (b) measured depth image

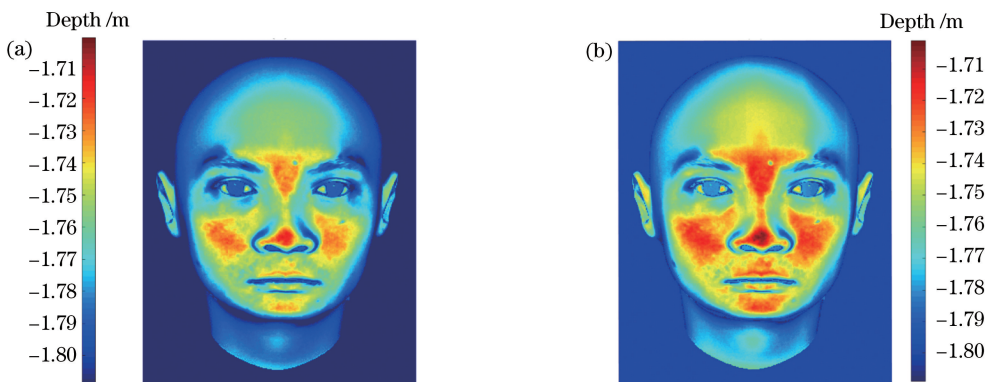


图 8 经两种模型校正后的深度图像。(a)传统模型;(b)改进模型

Fig. 8 Depth images corrected by the two models. (a) Traditional model; (b) improved model

## 5 结 论

基于传统的 B 样条误差拟合模型,本文采用一种改进的含加性权值的曲面误差拟合模型来补偿谐波与强度相关误差。改进的拟合模型针对误差拟合曲面中每个曲面片的拟合要求,给其控制点矩阵自适应地添加不同的权值参数矩阵,提高

了误差拟合精度。与传统模型相比,其拟合精度提高了近两倍,校正的稳定性也提高了。而且,权值参数以相加的形式添加,这使得在参数校准过程中只通过一次最小二乘拟合就可以同时获取权值参数和控制点参数。总之,改进的含加性权值的曲面误差拟合模型在几乎不增加校准和校正工作量的情况下,提供了一种更高精度和稳定性的



深度误差补偿校正方法。

## 参 考 文 献

- [1] Xiao J S, Tian H, Zou W T, et al. Stereo matching based on convolutional neural network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815017.  
肖进胜, 田红, 邹文涛, 等. 基于深度卷积神经网络的双目立体视觉匹配算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815017.
- [2] Liu F, He C Q, Shen A M, et al. Optimized compensation method of divisional projection for saturated region of structured light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0612001.  
刘飞, 何春桥, 申爱民, 等. 结构光饱和和区域分区投射优化补偿方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0612001.
- [3] Peters C, Klein J, Hullin M B, et al. Solving trigonometric moment problems for fast transient imaging [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(6): 220.
- [4] Mure-Dubois J, Hügli H. Optimized scattering compensation for time-of-flight camera [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6762: 67620H.
- [5] Gudmundsson S A, Aanaes H, Larsen R. Environmental effects on measurement uncertainties of time-of-flight cameras [C]//2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems, July 13-14, 2007, Iasi, Romania. New York: IEEE, 2007: 9832948.
- [6] Lindner M, Kolb A. Calibration of the intensity-related distance error of the PMD TOF-camera [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6764: 67640W.
- [7] Hussmann S, Huhn P, Hermanski A. Systematic distance deviation error compensation for a TOF-camera in the close-up range [C]//2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, May 13-16, 2012, Graz, Austria. New York: IEEE, 2012: 12837181.
- [8] Budge S E, Badamkar N S. Calibration method for texel images created from fused flash lidar and digital camera images [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 103101.
- [9] Ferstl D, Reinbacher C, Riegler G, et al. Learning depth calibration of time-of-flight cameras [C]//BMVC 2015, September 7-10, 2015, Swansea, UK. UK: BMVA Press, 2015: 102.
- [10] Wiedemann M, Sauer M, Driewer F, et al. Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, 41(2): 13689-13694.
- [11] Kim Y M, Chan D, Theobalt C, et al. Design and calibration of a multi-view TOF sensor fusion system [C]//2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE, 2008: 10104290.
- [12] Alenyà G, Foix S, Torras C. TOF cameras for active vision in robotics [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 218: 10-22.
- [13] Staranowicz A, Mariottini G L. A comparative study of calibration methods for Kinect-style cameras [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, June 6-8, 2012, Heraklion, Crete, Greece. New York: ACM, 2012: 49.
- [14] 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 and Machine Intelligence*, 2015, 37(7): 1501-1513.
- [15] Chen C, Yang B S, Song S, et al. Calibrate multiple consumer RGB-D cameras for low-cost and efficient 3D indoor mapping [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 328.
- [16] Xie M, Cooperstock J R. Time-of-flight camera calibration for improved 3D reconstruction of indoor scenes [C]//2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design, December 13-14, 2014, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2014: 478-481.
- [17] Lachat E, MacHer H, 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, 7(10): 13070-13097.
- [18] Rodriguez-Gonzalvez P, Gonzalez-Aguilera D, Gonzalez-Jorge H, et al. Low-cost reflectance-based method for the radiometric calibration of Kinect 2 [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(7): 1975-1985.
- [19] Mersmann S, Seitel A, Erz M, et al. Calibration of time-of-flight cameras for accurate intraoperative surface reconstruction [J]. *Medical Physics*, 2013, 40(8): 082701.
- [20] Jiao J C, Yuan L B, Tang W H, et al. A post-rectification approach of depth images of Kinect v2 for 3D reconstruction of indoor scenes [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(11): 349.
- [21] Lindner M, Kolb A. Lateral and depth calibration of PMD-distance sensors [M]//Bebis G, Boyle R, Parvin B, et al. *Advances in visual computing. Lecture notes in computer science*. Berlin,

- Heidelberg: Springer, 2006, 4292: 524-533.
- [22] Lindner M, Schiller I, Kolb A, et al. Time-of-flight sensor calibration for accurate range sensing [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, 114(12): 1318-1328.
- [23] Hussmann S, Knoll F, Edeler T. Modulation method including noise model for minimizing the wiggling error of TOF cameras [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(5): 1127-1136.
- [24] Radmer J, Fusté P M, Schmidt H, et al. Incident light related distance error study and calibration of the PMD-range imaging camera [C]//2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE, 2008: 10104295.
- [25] Belhedi A, Bourgeois S, Gay-Bellile V, et al. Non-parametric depth calibration of a TOF camera [C]//2012 19th IEEE International Conference on Image Processing, September 30-October 3, 2012, Orlando, FL, USA. New York: IEEE, 2012: 549-552.
- [26] Oprisescu S, Falie D, Ciuc M, et al. Measurements with TOF cameras and their necessary corrections [C]//2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems, July 13-14, 2007, Iasi, Romania. New York: IEEE, 2007: 9808818.
- [27] Corti A, Giancola S, Mainetti G, et al. A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 75: 584-594.