

虚拟结构光三维数据压缩算法的量化误差抑制

武迎春¹, 曹益平^{2*}, 吉聪建¹, 王安红¹, 赵贤凌¹

¹太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024;

²四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 虚拟结构光编码算法将三维(3D)数据编码成二维(2D)彩色条纹图像的相位信息,以实现数据压缩存储。在将 2D 彩色条纹图像解码成 3D 数据时,需要计算条纹相位并进行相位展开,最后映射为 3D 数据。2D 图像的压缩存储会使相位级次索引图出现边缘量化错误,导致 3D 数据 z 方向信息解码错误。针对这一问题,改进了虚拟结构光 3D 数据解码过程,提出了一种有效的局部相位误差修正算法,以提高 3D 数据的解码精度。数据解码过程中,建立算法,得到绝对相位展开与相对相位展开的准确差值,利用两者差值固定的特点,对其突变区域建立相位补偿机制,抑制相位级次索引图边缘量化误差而引起的 3D 数据解码错误。实验验证了所提算法的有效性,对编码得到的 2D 图像压缩存储后,改进的数据解码方法可有效提高虚拟结构光 3D 数据编码算法的稳健性,与中值滤波算法相比,所提方法可将数据解码方均根误差平均降低 9.7%。

关键词 测量; 条纹分析; 三维数据压缩; 虚拟结构光编码; 数据解码; 量化误差抑制; 相位展开

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.151203

Quantization Error Restraining of Virtual Structured-Light Three-Dimensional Data Compression Algorithm

Wu Yingchun¹, Cao Yiping^{2*}, Ji Congjian¹, Wang Anhong¹, Zhao Xianling¹

¹ School of Electronic and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

² School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Based on a virtual structured-light data coding algorithm, three-dimensional (3D) data can be encoded into the phase of a two-dimensional (2D) color fringe image to complete the data compression. In the process of decoding a 2D color fringe image to 3D data, phase calculation and phase unwrapping are required. Due to the compression and storage of the 2D image, a quantization error exists at the edge of the phase index map, which will cause a local error in the unwrapping phase and will result in a 3D data decoding error in the z direction. To overcome this limitation, the decoding process of virtual structured-light 3D data is improved. The proposed algorithm can revise the local phase error and enhance the 3D data decoding accuracy efficiently. In the proposed algorithm, deviation between absolute phase unwrapping and relative phase unwrapping is calculated. Since the deviation is fixed, phase compensation is performed when the local deviation is changed sharply, and the local error of the decoded 3D data caused by the edge quantization error of the phase index map is suppressed. Experiments are conducted to verify the effectiveness of the proposed algorithm, which makes the virtual structured-light 3D data encoding algorithm more robust after compressing and storing the encoded 2D images. In comparison with the median filtering algorithm, the proposed algorithm can reduce the root-mean-square error of data decoding by an average of 9.7%.

Key words measurement; fringe analysis; three-dimensional data compression; virtual structured-light coding;

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-03-01; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61601318)、山西省青年科技研究基金(201601D021078)、山西省重点学科建设经费、山西省互联网+3D 打印协同创新中心、山西省 1331 工程重点创新团队、山西省科技创新团队(201705D131025)、太原科技大学博士启动基金(20132023)

* E-mail: ypcao@scu.edu.cn

data decoding; quantization error restraining; phase unwrapping

OCIS codes 120.6650; 110.2650; 210.1635

1 引言

近年来,三维(3D)点云数据已广泛地应用于计算机辅助设计、虚拟现实、工业快速成型及3D打印等领域,计算机运算速度的提高及光学成像技术的不断发展,为3D点云数据的实时获取创造了条件,同时也对3D数据后期的压缩存储技术提出新的要求^[1-3]。对于同一场景,若用相同的空间采样点记录,则3D点云数据存储量远远大于传统二维(2D)照片的数据量。以常见的单精度浮点型数据为例,存储一个3D点云数据点需要12 Byte(x, y, z 分别4 Byte),是普通二维(2D)RGB彩色图像每个像素点所需存储空间(3 Byte)的4倍^[3-4]。随着应用、科研领域对3D点云数据空间分辨率和采样面积等参数要求的不断提高,所需存储的3D数据点数也将急剧增加,此时,需要研究高效的数据压缩算法以完成海量数据存储^[5]。

不同用途的3D数据有着不同的存储表示形式,维基百科列出了最常用的文件格式。在计算机辅助设计(CAD)中,一般使用STL文件格式^[6],采用三角形网格表示物体的3D信息。在计算机图形学中,OBJ是一种得到普遍接受的文件格式,其以纯文本的形式存储了模型的顶点、法线、纹理坐标和材质使用信息^[7]。PLY文件是斯坦福大学开发的一种多边形数据储存格式,每个文件通过顶点、面等描述一个多边形模型对象。常用于储存3D扫描原始数据的MAT,包括 x, y, z 、颜色和质量5个矩阵,属于非结构化数据格式。在视频应用领域,“Holoimage”是一种很具潜力的数据存储表示格式,其使用虚拟结构光编码算法,将物体的3D信息编码于“类全息图像”的条纹中,实现了3D数据到2D图像的转化存储^[8-9]。

虚拟结构光编码算法利用结构光三维重建原理^[9-12],建立虚拟正弦结构光投影模型并设定系统参数,得到3D点云数据的深度信息与正弦条纹的相位映射关系,最后将3D点云数据逐点编码到2D彩色图像的每个像素中。当需要3D点云数据时,再从2D图像解码出所需的3D点云数据。这种编码算法在彩色图像R、G通道存储受深度信息调制的正、余弦条纹相位,B通道存储相位展开的相位级次索引,由于其索引图呈阶梯状分布,在对2D彩色

图像(如JPG格式)解码时,B通道阶梯的边缘量化误差会造成相位展开局部错误,最终导致解码出来的3D点云数据发生错误。采用相对相位展开辅助绝对相位展开的方法,抑制B通道中相位级次索引图的边缘量化误差,从而达到提高3D数据解码精度的目的。

2 虚拟结构光编码原理

利用光学三维测量方法获取物体的三维形状后,物体的3D点云数据通常以坐标点及对应深度数据值的方式进行存放,其顺序也按照行列顺序进行。对3D点云数据编码时,每个3D数据由 (x, y, z) 3个点值确定,为了将3D点云数据编码到2D图像中,需要逐点编码^[9]。先将3D点云数据的坐标 (x, y) 映射为2D图像的像素坐标 (i, j) ,物体的深度 z 映射为像素点 (i, j) 对应的灰度值。传统的直接将深度信息非线性量化为0~255的灰度值存储的方法对深度信息损失较大,而虚拟结构光编码算法将深度信息转化为相位信息^[13],因此存储的方法可大大提高数据的保真度。虚拟结构光的数据编码、解码过程如下。

2.1 3D数据编码

根据文献[3]建立虚拟结构光系统并设定系统参数, (x, y) 和 (i, j) 的映射关系满足如下关系

$$i = x \cdot W, \quad (1)$$

$$j = y \cdot W, \quad (2)$$

式中: $1/W$ 为每个像素的物理尺寸; (x, y) 点对应的深度信息 z 与其在 (i, j) 点引起的相位变化 φ 存在线性关系,线性系数为 k 。

$$\varphi(i, j) = k \cdot z(x, y). \quad (3)$$

当条纹的频率为 f 时,受物体深度调制的条纹相位为 $\phi(i, j) = 2\pi fi + \varphi(i, j)$,故R、G通道的正、余弦条纹的强度^[14]可表示为

$$I_r(i, j) = 255/2 \cdot [1 + \sin \phi(i, j)], \quad (4)$$

$$I_g(i, j) = 255/2 \cdot [1 + \cos \phi(i, j)]. \quad (5)$$

用B通道存储相位级次索引 $K(i, j)$, $K(i, j) = \text{round}[\phi(i, j)/2\pi]$,其中 $\text{round}[\cdot]$ 表示向下取整运算,B通道的强度可表示为

$$I_b(i, j) = \text{gray}[K(i, j)], \quad (6)$$

式中: $\text{gray}[\cdot]$ 表示将索引 $K(i, j)$ 平均分布到256个灰度级。

2.2 数据解码

将 2.1 节编码好的条纹图读入计算机内存,得到 R、G、B 三通道的灰度值, 联立(4)、(5)式可得:

$$\phi'(i, j) = \arctan \left[\frac{I_r(i, j) - 255/2}{I_g(i, j) - 255/2} \right]. \quad (7)$$

由于(7)式采用反正切计算, 相位 $\phi'(i, j)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 之间截断, 需要进行相位展开。相位展开所需级次索引 $K(i, j)$ 通过解码 B 通道条纹图得到的相位展开结果表示, 即

$$\phi(i, j) = \phi'(i, j) + 2K(i, j) \cdot \pi. \quad (8)$$

物体深度引起的相位变化 $\varphi(i, j) = \phi(i, j) - 2\pi fi$, 反求(1) ~ (3)式, 即可解码出对应的 (x, y, z) 值。

3 基于相对相位展开的量化误差抑制

(8)式使用 B 通道所存储的相位级次索引 $K(i, j)$ 完成相位展开, 该方法属于绝对相位展开方法, 可以直接获得条纹的绝对相位(实际相位)^[15]。还有一种相位展开算法, 不需要事先编码相位级次索引, 通过选定相位展开起始点, 对比展开点与相邻点的相位

差完成相位展开, 这种称为相对相位展开^[16]。具体展开原则是: 计算相位展开起始点与相邻像素点的相位差, 如果相位差大于 π , 则后一像素点的相位值减去 2π ; 如果相位差值小于 $-\pi$, 则后一像素的相位值加上 2π 。由于起始点的选取不是绝对相位起始点, 此算法获得的连续相位与条纹的实际相位(绝对相位)相差 2π 的整数倍, 如图 1(a)所示。对比两种相位展开方法的结果可知, 绝对相位展开可获得实际相位, 但编码后的 3D 数据以 2D 图像格式压缩存储(如 JPG 格式), 使得 B 通道存储的相位展开索引图引入量化误差, 最终导致相位展开面局部有突变错误, 如图 1(b)中的 $\phi_1(i, j)$; 相对相位展开结果平滑, 整体相位展开结果与实际相位的差值为 2π 的整数 p 倍, 但 p 值无法确定, 如图 1(b)中的 $\phi_2(i, j)$ 。根据两种相位展开结果的特点, 本文将两种相位展开的结果进行有效结合, 用于优化虚拟结构光数据解码过程。

图 2 为所提出的考虑 B 通道量化误差抑制的数据解码过程, 读取图像的 R 通道与 G 通道条纹灰度值, 计算截断相位 $\phi'(i, j)$, 同时采用绝对相位展

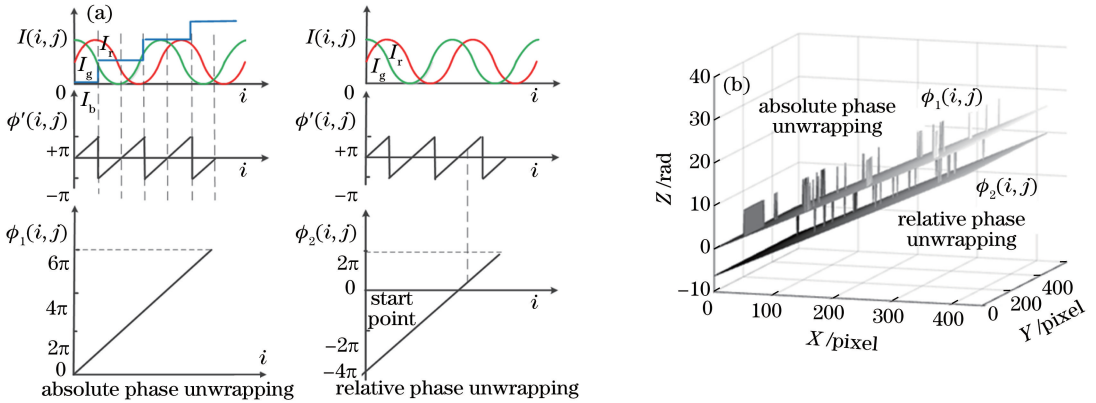


图 1 相对相位展开与绝对相位展开对比。(a)绝对、相对相位展开原理;(b)相对、绝对相位展开结果

Fig. 1 Comparison of relative and absolute phase unwrapping. (a) Principles of absolute and relative phase unwrapping; (b) relative and absolute phase unwrapping results

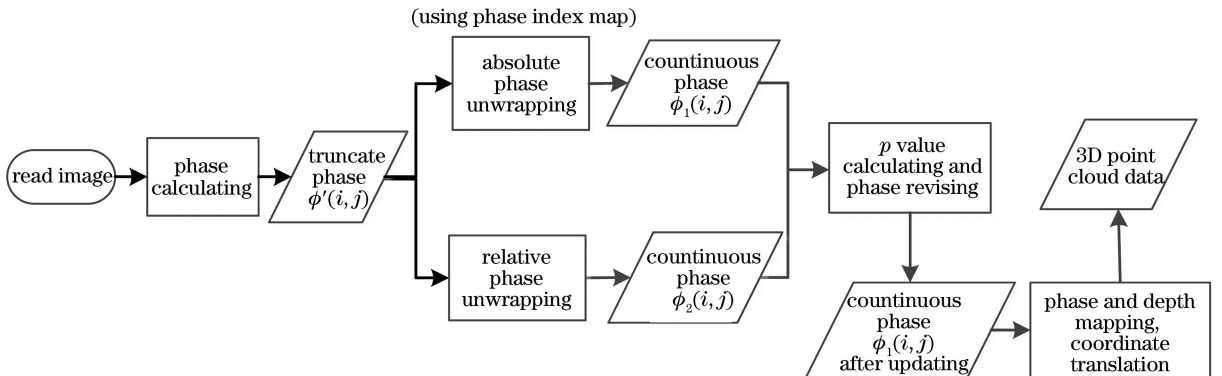


图 2 改进后的数据解码

Fig. 2 Improved data decoding

开算法和相对相位展开算法对 $\phi'(i, j)$ 进行相位展开, 得到 $\phi_1(i, j)$ 和 $\phi_2(i, j)$, 求出相对相位展开结果 $\phi_2(i, j)$ 与实际相位面的差值 $p \cdot 2\pi$, 其中 p 值的计算方法为

$$p = \text{round}\left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [\phi_1(i, j) - \phi_2(i, j)] / 2\pi \right\}, \quad (9)$$

式中: M, N 表示图像尺寸。

逐点计算 $\phi_1(i, j) - \phi_2(i, j)$ 的值。对于大多数点, 相位级次索引 K 没有误差, 差值在 $p \cdot 2\pi$ 附近波动, 记为 $p \cdot 2\pi \pm \Delta$ (其中, Δ 为一小量, 代表相位展开时存在的小误差, 一般取值范围为 $[0 \sim 0.3\pi]$); 当相位级次索引 K 发生量化错误时, K 的量化误差为 ± 1 , $\phi_1(i, j)$ 与 $\phi_2(i, j)$ 的差值为 $(p \pm 1) \cdot 2\pi \pm \Delta$ 。根据差值, 对绝对相位展开结果 $\phi_1(i, j)$ 的值进行修正, 具体算法为

$$\phi_1(i, j) = \begin{cases} \phi_1(i, j), \phi_1(i, j) - \phi_2(i, j) = p \cdot 2\pi \pm \Delta \\ \phi_1(i, j) - 2\pi, \phi_1(i, j) - \phi_2(i, j) = (p + 1) \cdot 2\pi \pm \Delta. \\ \phi_1(i, j) + 2\pi, \phi_1(i, j) - \phi_2(i, j) = (p - 1) \cdot 2\pi \pm \Delta \end{cases} \quad (10)$$

最后根据修正后的 $\phi_1(i, j)$ 值, 反求 (1) ~ (3) 式, 即可解码出对应的 (x, y, z) 值。

虚拟结构光的编码算法基于结构光系统, 其编、解码方法的精度与结构光光栅的等效波长相关, 即与光栅条纹的周期相关, 周期越小, 等效波长越短, 数据解码精度越高。但是由于 (9) 式采用统计方法来计算相对相位展开和绝对相位展开的差值, 所以条纹周期过小会导致绝对相位局部误差点过多, 降低了数据解码精度。同时, 条纹周期太小还会引起相对相位展开出错, 从而进一步影响 (9) 式的计算结果。因此, 在编码时需选择合适的条纹周期以保证所提算法的解码精度。

4 实验结果与分析

为了论证所提方法的可行性, 进行实验验证。采用的 3D 点云数据如图 3 所示。经过虚拟结构光编码算法编码后, R、G、B 通道对应的灰度图如图 4 所示, 解码结果如图 5 所示。对比图 3 和图 5 可知, B 通道编码的相位级次索引 K 在压缩存储后出现

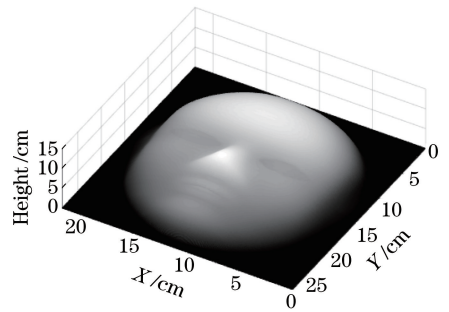


图 3 面具的 3D 点云分布

Fig. 3 3D point cloud distribution of mask

了量化误差, 导致最后解码的 3D 数据在 K 值分界处发生误差。B 通道原始数据与产生量化误差的数据对比如图 6 所示。采用相对、绝对相位展开算法对截断相位进行展开的结果 $\phi_1(i, j)$ 和 $\phi_2(i, j)$ 如图 7(a)、(b) 所示, 以相对相位展开结果为依据, 对绝对相位展开结果进行修正, 其结果如图 7(c) 所示。将 (i, j, φ) 映射到 (x, y, z) 后, 解码得到的 3D 点云数据如图 8 所示。对比图 8 与图 5 可知, 前者的解码精度得到了明显提高。

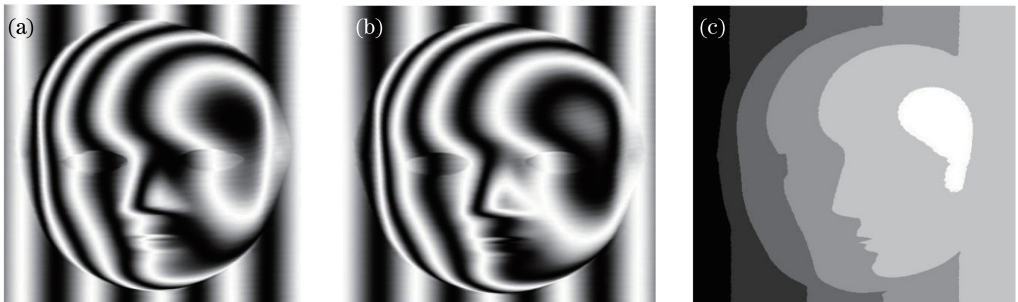


图 4 编码后 2D 图。(a) R 通道条纹图; (b) G 通道条纹图; (c) B 通道条纹图

Fig. 4 2D images after encoded. (a) Fringe pattern of channel R; (b) fringe pattern of channel G; (c) fringe pattern of channel B

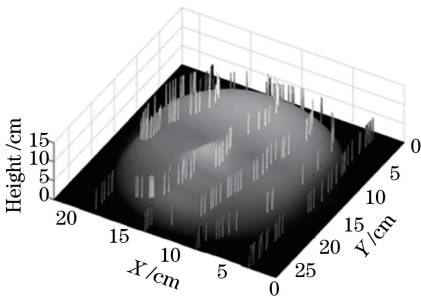


图5 传统方法的解码结果

Fig. 5 Decoding results of traditional method

为了进一步说明所提方法的有效性,对图9所示的6组3D点云数据进行了实验,原方法与所提

方法的解码数据的峰值信噪比(PSNR)如表1所示,原始数据解码结果与B通道量化误差抑制后解码结果的方均根误差(RMSE)如表2所示。与原方法相比,所提方法可使PSNR平均提高42.16%,RMSE降低87%,大大提高了3D点云数据的解码精度。

将所提误差抑制算法与文献[16]中提到的中值滤波的误差抑制方法进行对比,在压缩比分别为1:48.3、1:70.7的情况下,两种方法的解码结果及误差分布如图10与图11所示,对应的数据解码方均根误差如表3所示,可见所提算法具有较高的数据解码精度。

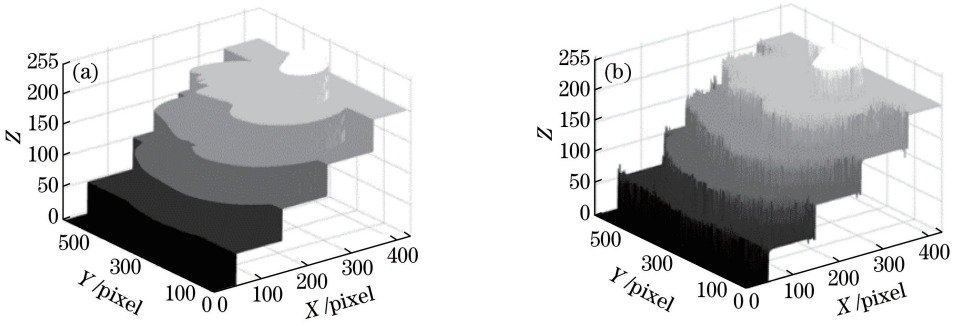


图6 B通道数据变化。(a) B通道原始数据;(b)压缩存储后存在量化误差的数据

Fig. 6 Data changing in channel B. (a) Raw data of channel B; (b) data with quantization error after suppression and storage

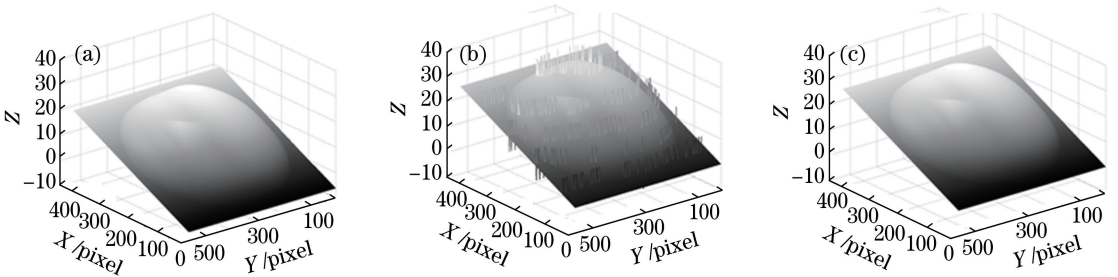


图7 相位展开结果。(a)相对相位展开结果;(b)绝对相位展开结果;(c)修正后的结果

Fig. 7 Phase unwrapping results. (a) Relative phase unwrapping results; (b) absolute phase unwrapping results;

(c) corrected results

表1 两种解码方法的PSNR对比

Table 1 PSNR comparisons of two decoding methods

Decoding method	Mask	Mickey	Statue	Ball abutment	Cone abutment	Hemisphere
Traditional method	40.4047	54.4448	38.3515	47.4106	47.0186	45.7326
After quantization error suppression	63.8344	81.8222	56.1330	60.0650	66.5915	59.4934

表2 两种解码方法的RMSE对比

Table 2 RMSE comparisons of two decoding methods

Decoding method	Mask	Mickey	Statue	Ball abutment	Cone abutment	Hemisphere
Traditional method	2.4339	0.6086	3.0829	1.0864	1.1366	1.3180
After quantization error suppression	0.1640	0.0207	0.3980	0.2531	0.1194	0.2703

5 结 论

采用虚拟结构光编码算法对 3D 点云数据进行压缩时,彩色图像的 B 通道存储阶梯跳变数据,其引入的量化误差会导致解码 3D 数据局部出错。针对这一问题,改进了解码过程中在相位展开环节抑制误差的方法。同时使用相对相位展开与绝对相位展开算法对截断相位进行展开,根据两种相位展开结果的关系修正绝对相位展开错误,从而完成对 3D 点云数据的正确解码。采用多组实验论证该方法的有效性。实验结果表明,所提方法可以有效抑制 B

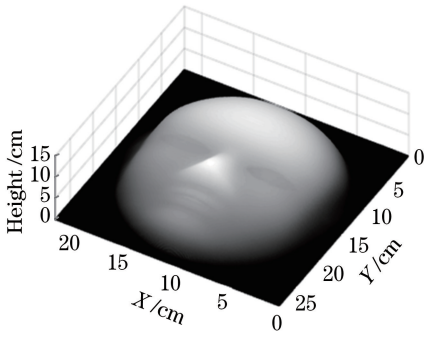


图 8 新的解码 3D 点云数据

Fig. 8 New decoded data of 3D point cloud

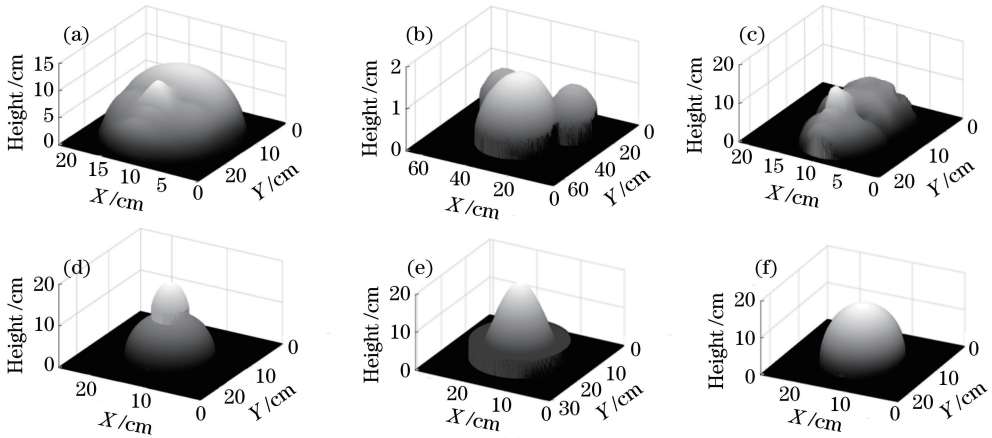


图 9 3D 点云数据分布。(a)面具;(b)米奇;(c)雕像;(d)球形台;(e)类圆锥台;(f)半球

Fig. 9 3D point cloud data distribution. (a) Mask; (b) mickey; (c) statue; (d) ball abutment; (e) cone abutment; (f) hemisphere

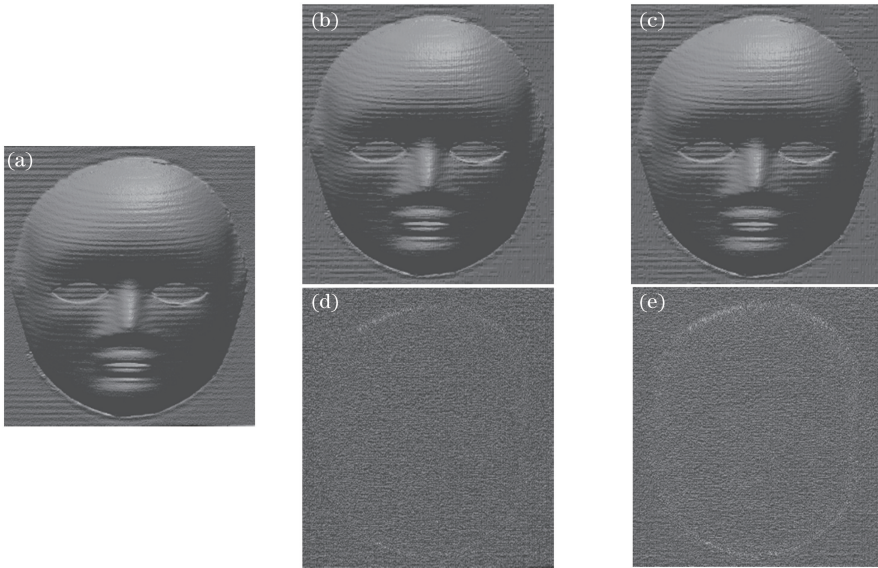


图 10 压缩比为 1 : 48.3 时两种方法的解码结果对比。(a)被编码 3D 数据;(b)所提方法解码结果;

(c)文献[13]方法解码结果;(d)所提方法解码误差分布;(e)文献[13]方法解码误差分布

Fig. 10 Comparisons of decoding results of two methods when compression ratio is 1 : 48.3. (a) 3D data to be encoded; (b) decoding results of proposed method; (c) decoding results of method in Ref. [13]; (d) error distribution of proposed method; (e) error distribution of method in Ref. [13]

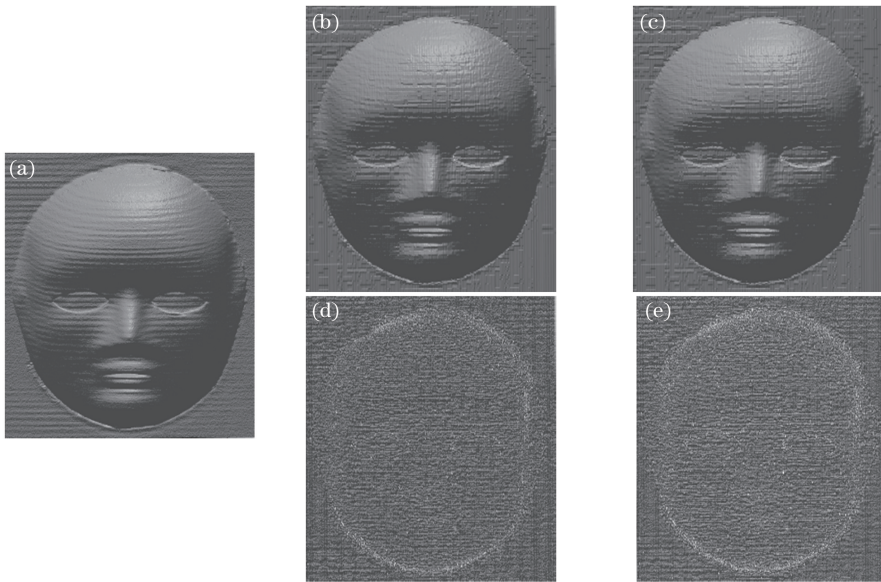


图 11 压缩比为 1:70.7 时两种方法的解码结果对比。(a) 被编码 3D 数据;(b)所提方法解码结果;
(c)文献 [13]方法解码结果;(d)所提方法解码误差分布;(e)文献 [13]方法解码误差分布

Fig. 11 Comparisons of decoding results of two methods when compression ratio is 1:70.7. (a) 3D data to be encoded;
(b) decoding results of proposed method; (c) decoding result of method in Ref. [13]; (d) error distribution of
proposed method; (e) error distribution of method in Ref. [13]

表 3 两种方法的解码精度对比(方均根误差)

Table 3 Decoding accuracy comparisons of
two methods (RMSE)

Quantization error restraining method	Compression ratio: 1:48.3	Compression ratio: 1:70.7
Proposed method	0.0214	0.0289
Ref. [13] method	0.0235	0.0323

通道量化误差带来的 3D 数据解码误差,进而提高 3D 数据的解码精度。

参 考 文 献

- [1] Li R Z, Yang M, Liu Y Y, *et al.* An uniform simplification algorithm for scattered point cloud[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0710002.
李仁忠, 杨曼, 刘阳阳, 等. 一种散乱点云的均匀精简算法[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0710002.
- [2] Liu Y G, Yi S L, Wu P F, *et al.* A novel 3D reconstruction algorithm for large-scale scenes [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(6): 91-96.
刘怡光, 易守林, 吴鹏飞, 等. 一种新的大场景 3 维重建算法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(6): 91-96.
- [3] Karpinsky N, Zhang S. Composite phase-shifting algorithm for three-dimensional shape compression [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(6): 063604.
- [4] Zhang S, Yau S T. High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(11): 113603.
- [5] Hou Z L, Su X Y, Zhang Q C. 3D shape compression based on virtual structural light encoding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0510003.
侯志凌, 苏显渝, 张启灿. 三维面形信息压缩的虚拟结构光编码算法[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0510003.
- [6] Béchet E, Cuilliere J C, Trochu F. Generation of a finite element MESH from stereolithography (STL) files[J]. *Computer-Aided Design*, 2002, 34(1): 1-17.
- [7] Possemiers A L, Lee I. Fast OBJ file importing and parsing in CUDA [J]. *Computational Visual Media*, 2015, 1(3): 229-238.
- [8] Zhang S, Yau S T. Three-dimensional data merging using Holoimage[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(3): 033608.
- [9] Karpinsky N, Zhang S. 3D range geometry video compression with the H. 264 codec[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 620-625.
- [10] Chen Y T, Cao Y P, Chen C, *et al.* Phase measurement profilometry based on binary gratings with unequal duty cycle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815021.

- 陈雨婷, 曹益平, 陈澄, 等. 基于不等占空比二元光栅的相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815021.
- [11] Peng K, Cao Y P, Wu Y C. An on-line three-dimensional measurement method of composite grating projection without filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1112003.
彭旷, 曹益平, 武迎春. 一种无需滤波的复合光栅投影的在线三维测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112003.
- [12] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003.
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.
- [13] Zhang S Z, Zhang J Q, Huang X, *et al.* Three-dimensional profile data compression based on composite dithering technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(7): 079002.
张绍泽, 张建奇, 黄曦, 等. 基于复合抖动技术的三维轮廓数据压缩方法[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(7): 079002.
- [14] Hou Z L, Su X Y, Zhang Q C. Virtual structured-light coding for three-dimensional shape data compression[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(6): 844-849.
- [15] Xiao S Z, Tao W, Zhao H. Absolute phase acquisition method for spatial discontinuous three-dimensional object surface based on encoding grating[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1212004.
肖素枝, 陶卫, 赵辉. 基于编码光栅的空间不连续三维物体表面的绝对相位获取方法[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1212004.
- [16] Zhang S. Composite phase-shifting algorithm for absolute phase measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1538-1541.