

基于灰度值编码的三维轮廓数据表示方法

张绍泽 张建奇 黄曦 刘德连

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 近年来,在线三维数字博物馆成为文物保护和资源共享的新兴手段,但是使用三维扫描技术获得的三维轮廓数据体积较大,不便于三维数字博物馆数据的实时加载与显示。针对该问题,提出了一种基于灰度值编码的三维轮廓数据表示方法。在虚拟条纹投影系统的基础上,根据虚拟照相机水平方向分辨率将灰度值编码为8位灰度图像或者8位灰度图像和二值图像,并将其作为投影图像进行投影。使用虚拟照相机对发生形变的投影图像进行拍摄,实现三维轮廓数据的图片表示。实验结果表明,与传统三维数据格式相比,提出方法所需的数据加载及显示时间减少了98%以上,非常适合基于三维轮廓数据数字博物馆的数据实时加载与显示。

关键词 信号处理; 三维轮廓数据压缩; 灰度值编码; 虚拟条纹投影系统; 三维数字博物馆

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1209001

Three-Dimensional Profile Data Representation Based on Gray Value Encoding

Zhang Shaoze Zhang Jianqi Huang Xi Liu Delian

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract Recently, the online three-dimensional(3D) digital museum is becoming an emerging method for the protection and resource sharing of the heritage. However, the size of 3D profile data obtained by 3D scanning techniques is too large for 3D digital museums to properly load and display in real time. To solve this problem, a representation method of 3D profile data based on gray value encoding is proposed. On the basis of the virtual fringe projection system, the gray values are encoded into an 8 bit gray image or an 8 bit gray image along with a binary image according to the resolution of the virtual camera in the horizontal direction, and then the images are projected as projection fringes. By utilizing the virtual camera to capture the projection fringes that have been distorted, 3D profile data are represented as images. The experimental results show that the loading and display time of the data within the proposed method is reduced by more than 98% compared with the traditional 3D data format, and it is very suitable for the real-time loading and display of digital museums based on 3D profile data.

Key words signal processing; three-dimensional profile data compression; gray value encoding; virtual fringe projection system; three-dimensional digital museum

OCIS codes 100.2650; 100.5070; 120.2650

1 引言

通过三维扫描技术获得的三维轮廓数据由于具有精度高,可以精确表示三维物体的特点,已经被广泛应用于质量控制、生物医学、在线教育和虚拟娱乐等领域^[1-3]。在这些应用中,基于三维轮廓数据的在线三维数字博物馆^[4-6]成为文物保护和资源共享的新兴手段。由于在线的特点,实时性与交互性成为影响三维数字博物馆用户体验的主要因素。对于构成三维轮廓数据的每个点来说,至少需要3个浮点型数据(12 bit)来表

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(61301290)

作者简介: 张绍泽(1985—),男,博士研究生,主要从事光学三维测量和信息光学方面的研究。E-mail: shzzhang@163.com

导师简介: 张建奇(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光电虚拟现实和光电对抗与图像处理等方面的研究。

E-mail: jqzhang@mail.xidian.edu.cn

示其三维空间坐标 (x, y, z) 。而随着扫描精度的进一步提升和扫描面积的不断扩大,三维轮廓数据的体积也急剧增加。现有三维数字博物馆的三维轮廓数据通常由多级不同精细程度的数据组成。在进行数据展示时先加载、显示精细程度最低的数据,然后再逐级加载、显示高精度的数据,重复该过程直至精细程度最高的数据完成加载。虽然该方法通过不同精细程度数据的加载与显示实现了用户与数据的交互^[7-9],但是完成数据的最终加载需要使用较长时间,因而影响了用户的实时性体验。因此,如何有效地降低传输数据大小、实现数据的实时加载与显示成为研究难点。针对该问题,已经提出了一些适用于通过三维扫描技术获得的三维轮廓数据的表示方法^[10-14]。其中,基于图像的表达方法可以使用二维图像来存储三维轮廓数据,而且二维图像压缩技术比较成熟,能够在实现高数据压缩比的同时保持较低的误差。因此,该方法比较适于三维轮廓数据的压缩存储^[15]。

Holoimage是一种基于图像的编码方法^[12],该方法利用计算机建立的虚拟条纹投影系统实现三维轮廓数据的高压缩实时存储。Karpinsky等^[15]基于Holoimage提出了合成相移算法,使用彩色图像的三个通道对相位进行编码,从而实现了三维轮廓数据的存储。Hou等^[16]提出了双通道相位编码方法,使用彩色图像的两个通道来表示三维轮廓数据。虽然使用两个通道对相位编码的方法降低了图像的大小,但是仍需要16位来保存三维轮廓数据。最近Karpinsky等^[17]提出了三维轮廓数据的3位表示方法。通过抖动技术对24位图像的三个通道分别进行抖动处理,将三维轮廓数据保存到了8位灰度图像中主要的3位。虽然使用Bayer抖动技术得到的结果图像的数据变化有规律,降低了结果图像的大小,但是该方法重构模型的误差较大。而Floyd-Steinberg抖动方法虽然可以达到较高的重构精度,但是其结果图像的数据变化没有规律,增加了图像的复杂程度,因此限制了数据压缩比。

为了进一步降低所传输的三维轮廓数据的大小,使其适合在线三维数字博物馆数据的实时加载与显示,本文提出了基于灰度值编码的三维轮廓数据表示方法。在计算机渲染管线建立的虚拟条纹投影系统的基础上,根据虚拟照相机水平方向分辨率,将一定范围内的灰度值编码为二维图像并将其作为投影图像向三维轮廓数据进行投影,使用虚拟照相机拍摄发生形变后的图像来实现三维轮廓数据的压缩存储。实验结果表明,与传统的三维数据格式相比,提出的方法有效地降低了传输数据的大小,减少了数据加载与显示所需的时间,非常适合在线三维数字博物馆数据的实时加载与显示。

2 基本原理

2.1 虚拟条纹投影系统

虚拟条纹投影系统如图1所示。该系统的构成及原理与基于条纹投影的三维轮廓测量系统类似^[15]。与真实的基于条纹投影的测量系统不同的是该虚拟条纹投影系统是使用计算机可编程渲染管线创建的,因此系统中的参数可以精确设置。该系统中的虚拟投影仪和虚拟照相机设置为相同的分辨率,投影方式设置为平行投影,并且两者间的几何关系也是精确定义的^[18]。

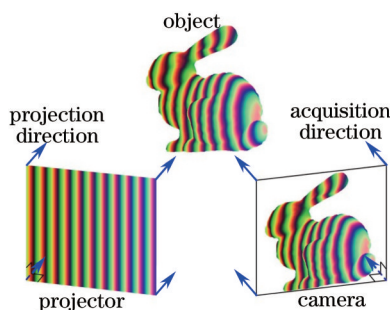


图1 虚拟条纹投影系统

Fig.1 Virtual fringe projection system

使用虚拟条纹投影系统进行三维轮廓数据[即表示物体三维轮廓信息的点的集合,每个点以三维坐标 (x, y, z) 表示]存储时,主要分为以下四个步骤:首先,根据三维轮廓数据水平及竖直方向上点的个数设置虚拟投影仪及虚拟照相机的分辨率;其次,将三维轮廓数据渲染显示为三维物体,并将其进行缩放使其位于投影

仪投影范围内;然后,使用虚拟投影仪向三维物体投射编码了已知信息的沿水平方向变化的条纹图像;最后,虚拟照相机从另一个角度拍摄物体上经过物体高度调制后发生形变的条纹图像。经过以上操作,虚拟照相机拍摄的图像包含了物体的三维轮廓信息,从而实现了三维轮廓数据的图像存储。

在进行三维重构(即还原三维轮廓数据)时,先对虚拟照相机拍摄的图像进行解码,并将解码得到的信息转换为相位信息;然后利用相位与坐标的关系还原出构成三维轮廓数据各个点的坐标;最后将三维轮廓数据渲染显示为三维物体。经过以上操作,虚拟照相机所拍摄的图像转换为三维轮廓数据,实现了物体的三维重构。

2.2 灰度值编码方法

在进行三维重构时,需要对拍摄的图像进行解码以获得经过物体调制后的所编码的信息。因此,为了获得正确的经过物体调制后的所编码的信息,需要保证待编码信息的唯一性。由于虚拟投影仪和虚拟照相机的分辨率相同,而且用于投影的条纹图像是沿水平方向变化的,因此对于虚拟照相机水平分辨率为 W (即拍摄图像的水平方向分辨率)的情况,仅需对 W 个数值沿水平方向进行编码而使其沿竖直方向数值保持不变,即可保证待编码信息沿水平方向的唯一性。对于常用的8位的灰度图像,其灰度值在 $[0,255]$ 之间,共256个灰度级。而对于 k 位的灰度图像,其灰度值在 $[0,2^k - 1]$ 之间,共 2^k 个灰度级。因此,可以通过对 k 位图像 $[0,2^k - 1]$ 内的部分或全部灰度值进行编码来实现对拍摄图像的正确解码。

根据以上思路,这里提出灰度值编码方法。首先,根据虚拟照相机的水平方向分辨率 W 确定用于编码灰度值的图像位数;然后,根据像素的索引值对 $[0,N - 1]$ 内的 N 个灰度值进行编码,并将其存储为二维图像。为了保证编码信息沿水平方向的唯一性,这里使用的待编码灰度值的个数等于虚拟照相机水平方向分辨率,即 $N = W$ 。当 $W \leq 256$ 时,8位灰度图像共256个灰度级,可以满足对 W 个数值进行编码。因此,可以根据像素的索引值将 $[0,N - 1]$ 内的 N 个灰度值编码存储为单幅的8位灰度图像。当 $W > 256$ 时,至少需要 $k = \lceil \lg W \rceil$ 位的图像来对 W 个数值进行编码。常用的灰度图像有8位、24位和32位,如果使用24位图像中的 k 位存储灰度值的编码结果会浪费存储空间、增加编码图像大小。为了降低编码图像的大小,需要使用尽可能少的图像位数来存储编码结果。因此,这里使用单幅的8位灰度图像结合 M 幅1位的二值图像存储编码结果,其中 $M = k - 8 = \lceil \lg W \rceil - 8, (W > 256)$ 。

单幅的8位灰度图像可以表示为

$$I_{\text{gray}}(i,j) = \text{mod}[G(i,j), 256], \quad (1)$$

式中 i 和 j 分别为图像水平和竖直方向的像素索引值, $i \in [0, W - 1]$, $j \in [0, H - 1]$, H 为照相机竖直方向的分辨率, $I_{\text{gray}}(i,j)$ 为索引值为 (i,j) 的像素点编码后的灰度值, $\text{mod}(a,b)$ 表示取余操作, $G(i,j)$ 为索引值为 (i,j) 的像素点处待编码的灰度值。为了保证待编码的灰度值在 $[0,N - 1]$ 内并且编码结果变化简单,这里使用水平方向像素的索引值对其赋值,即 $G(i,j) = i$, 其沿水平方向递增,沿竖直方向保持不变。

当照相机水平方向分辨率大于256 pixel时,即 $W > 256$ 时,除了需要根据(1)式将灰度值编码存储为单幅的8位灰度图像外,还需要使用 M 幅1位的二值图像存储灰度值的编码结果。二值图像可以表示为

$$I_{\text{binary}_m}(i,j) = \text{mod}\left\{\left\lfloor \frac{G(i,j) - I_{\text{gray}}(i,j)}{2^{m+7}} \right\rfloor, 2\right\}, m \in [1, M], \quad (2)$$

式中 m 为二值图像的索引, $I_{\text{binary}_m}(i,j)$ 为第 m 幅二值图像上索引值为 (i,j) 的像素点编码后的灰度值。

经过以上公式的编码, $[0,N - 1]$ 内的 N 个灰度值被编码到单幅的8位灰度图像或者单幅的8位灰度图像和 M 幅1位的二值图像中。由于对灰度值进行编码时使用的是整数,因此避免了直接对相位 $[\phi(i,j) = 2\pi i/P]$, 其中 P 为条纹水平方向所占像素数]编码时由浮点型数据转换为整型数据时引起的量化误差^[9]。所提出的方法使用尽可能少的图像位数对灰度值的编码结果进行存储,并且编码后的灰度图像和二值图像变化简单,因此进一步降低了编码图像的大小。

2.3 灰度值解码及相位转换

对于编码图像中所编码的灰度值,对其解码的过程如下所述。

当照相机水平方向分辨率小于等于256 pixel时,即 $W \leq 256$ 时,编码的灰度值为

$$G(i,j) = I_{\text{gray}}(i,j), \quad (3)$$

当照相机水平方向分辨率大于 256 pixel 时, 即 $W > 256$ 时, 编码的灰度值为

$$G(i, j) = I_{\text{gray}}(i, j) + \sum_{m=1}^M 2^{m+7} I_{\text{binary}_m}(i, j). \quad (4)$$

由于编码图像中的相位信息可以表示为 $\phi(i, j) = 2\pi i/P$ (提出的方法是对 $N = W$ 个灰度值进行编码, 相当于 $P = W$), 并且编码的灰度值 $G(i, j) = i$, 因此该灰度值所对应的相位为

$$\Phi(i, j) = 2\pi G(i, j)/W. \quad (5)$$

这里得到的相位在 $0 \sim 2\pi$ 之间, 不存在 2π 相位的不连续, 因此避免了相位展开操作。图 2 给出了照相机水平分辨率为 1024 pixel 情况下, 所提出方法的编码及解码结果沿水平方向的变化曲线。

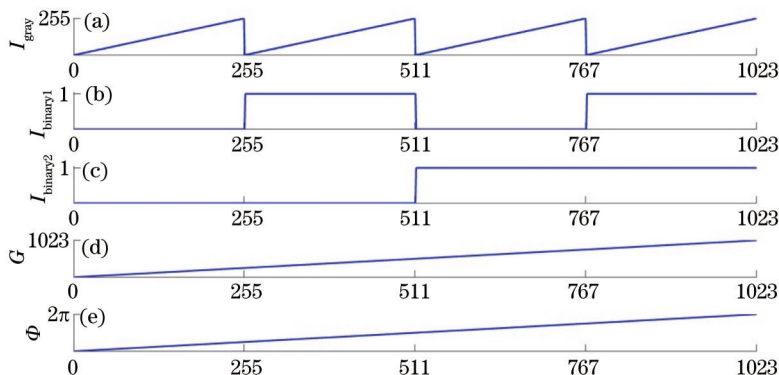


图 2 照相机水平分辨率为 1024 pixel 的情况下, 所提出方法的编码及解码结果沿水平方向的变化曲线。
(a) 编码的灰度图像水平方向灰度值; (b) 第一幅编码的二值图像水平方向灰度值; (c) 第二幅编码的二值图像水平方向灰度值;
(d) 水平方向所编码的灰度值; (e) 水平方向所编码的灰度值对应的相位

Fig.2 Curves of the encoding and decoding results of the proposed method in the horizontal direction when the resolution of the camera is 1024 pixel. (a) Gray value of the encoded gray image in the horizontal direction; (b) gray value of the first encoded binary image in the horizontal direction; (c) gray value of the second encoded binary image in the horizontal direction; (d) encoded gray value in the horizontal direction; (e) phase corresponding to the encoded gray value in the horizontal direction

将编码结果作为投影图像投影到三维物体上, 投影图像经过物体的高度调制后发生形变, 此时使用虚拟照相机所拍摄的物体上发生形变的灰度图像 I'_{gray} 或灰度图像 I'_{gray} 和二值图像 I'_{binary_m} 即包含了物体的三维轮廓信息。用 I'_{gray} 替换(3)式中的 I_{gray} 或用 I'_{gray} 和 I'_{binary_m} 替换(4)式中的 I_{gray} 和 I_{binary_m} 即可得到经过物体调制后的灰度值 G' , 将该灰度值代入(5)式即可得到包含了物体三维轮廓信息的相位 Φ' 。

2.4 相位到坐标转换

根据得到的相位 Φ' , 归一化的坐标 (x^n, y^n, z^n) 可以表示为^[18]

$$x^n = \frac{i}{W}, \quad (6)$$

$$y^n = \frac{j}{H}, \quad (7)$$

$$z^n = \frac{P(\Phi' - 2\pi i \cos \theta/P)}{2\pi W \sin \theta}, \quad (8)$$

式中 θ 为投影仪投影方向与照相机拍摄方向间的夹角。对于提出的方法有 $P = W$ 。

原始三维轮廓数据中点的坐标可以根据归一化的坐标 (x^n, y^n, z^n) 逐点进行还原^[18], 即

$$x = x^n \times S_c + C_x, \quad (9)$$

$$y = y^n \times S_c + C_y, \quad (10)$$

$$z = z^n \times S_c + C_z, \quad (11)$$

式中 S_c 是三维模型的归一化缩放因子, (C_x, C_y, C_z) 为原始三维模型的中心点坐标。

以上操作均使用 OpenGL 着色器语言 (GLSL) 编写代码实现, 利用图形处理器 (GPU) 的并行处理能力即可完成三维轮廓数据的实时重构与显示。

3 实验结果及分析

为了验证提出方法的有效性,这里对简单和复杂的模型进行了重构实验,并与其他方法进行了比较。在以下实验中,虚拟照相机的分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,其他方法条纹宽度 P 为 58 pixel ,投影方向与照相机拍摄方向间的夹角 θ 为 30° 。为了在获得高数据压缩比的同时保证较高的重构精度,这里将最终结果保存为体积较小、无损的便携式网络图像(PNG)格式。

首先对计算机生成的多边形档案(PLY)格式的理想单位半球进行重构实验,实验结果如图3所示。重构结果与理想单位半球的误差结果如图4所示。图3(a)为原始理想单位半球轮廓数据。图3(b)和(h)为Holoimage方法存储及重构结果,图4(a)和(f)分别为重构模型与理想单位半球横截面误差结果及重构模型与理想单位半球误差图。由图可见,Holoimage方法还原结果表面十分光滑,其与理想单位半球误差较小,均方根误差约为0.34%。对于Holoimage方法,在其投影时对投影图进行了纹理插值滤波处理,并且在重构计算时通过中值滤波滤除了纹理插值导致的误差,因此还原结果十分光滑。双通道相位编码方法得到的结果如图3(c)、图3(i)、图4(b)和图4(g)所示。由图可见,该方法整体实现了模型的还原,但是还原结果表面存在台阶状条纹,其误差也大于Holoimage方法,均方根误差约为0.39%。Bayer抖动方法得到的结果如图3(d)、图3(j)、图4(c)和图4(h)所示,Floyd-Steinberg抖动方法得到的结果如图3(e)、图3(k)、图4(d)和图4(i)所示。与Floyd-Steinberg抖动方法相比,Bayer抖动方法得到的结果表面有明显的凹凸起伏,而其误差也明显大于Floyd-Steinberg抖动方法,Bayer抖动方法和Floyd-Steinberg抖动方法的均方根误差分别为0.44%和0.37%。对于抖动方法,在进行三维重构之前需要对抖动结果进行低通滤波处理,使其尽可能地接近抖动前的状态,而进行低通滤波处理后的图像灰度值仍然是不连续、存在噪声的,因此使用抖动方法还原结果表面凹凸不平。由于Floyd-Steinberg抖动方法将误差分散到了相邻像素,因此其还原结果噪声要小于Bayer抖动方法。由于该实验中照相机的水平分辨率为 512 pixel ,因此所提出的方法需要1幅8位灰度图像和1幅二值图像存储三维轮廓数据,存储结果如图3(f)和图3(g)所示。利用所提出方法得到的还原结果如图3(l)所示,误差结果如图4(e)和图4(j)所示。由图可见,所提出方法还原结果与双通道方法类似,均方根误差约为0.36%。还原结果表面的台阶状条纹主要是由于相同的相位值导致的。当投影仪与照相机间夹角大于 0° 时,投影图像上一个像素点在参考平面上宽度大于一个像素,使得相位相同点出现,并最终导致台阶状条纹产生。

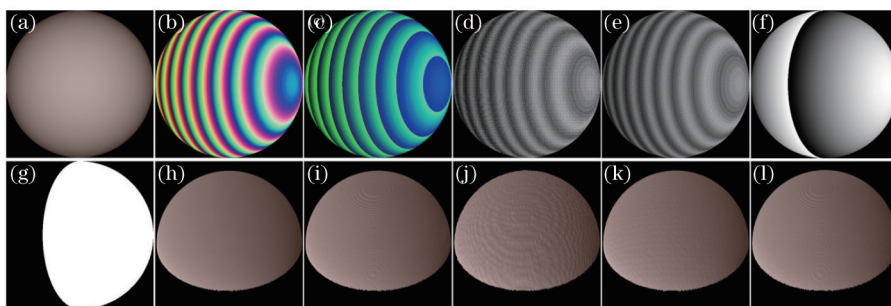


图3 不同方法下理想单位半球实验结果。(a) 原始三维轮廓数据;(b) Holoimage 结果;(c) 双通道编码方法结果;
(d) Holoimage 经过 Bayer 抖动结果;(e) Holoimage 经过 Floyd-Steinberg 抖动结果;(f) 灰度值编码方法中灰度图像结果;
(g) 灰度值编码方法中二值图像结果;(h)~(k) 为图(b)~(e) 三维重构结果;(l) 图(f)和(g)三维重构结果

Fig.3 Experimental results of different methods for an ideal unit hemisphere. (a) Original 3D range data; (b) Holoimage;
(c) two-channel; (d) Holoimage with Bayer dithering; (e) Holoimage with Floyd - Steinberg dithering; (f) gray image of gray value encoding; (g) binary image of gray value encoding; (h)~(k) 3D reconstructed results for images shown in (b)~(e); (l) 3D reconstructed result for images shown in (f) and (g)

为了测试提出方法在数据压缩、数据加载时间和显示时间方面的性能,对理想单位半球进行了实验。实验所使用的带宽为 4 MB/s ,平均下载速度约为 400 kB/s 。使用的电脑处理器为 Core i3 550,主频 3.2 GHz ,内存 3 GB ,显卡为 NVIDIA GeForce GTX 460 v2,显存 1 GB 。表1给出了不同方法下单位半球数据压缩比、数据加载时间和显示时间结果。其中,数据加载时间和显示时间由多次测量取平均值得到。需要注意的是数据加载时间与数据大小及带宽有关。在带宽一定的情况下,数据越小数据加载时间越短。由表1可见,基于

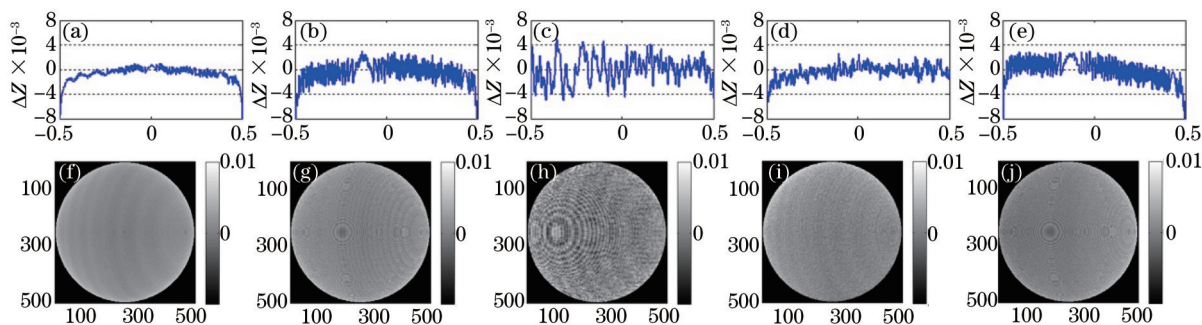


图4 不同方法三维重构结果与理想单位半球比较。(a)~(e)为图3(h)~(l)重构结果横截面与理想单位半球横截面误差;
(f)~(j)为图3(h)~(l)重构结果与理想单位半球误差图

Fig.4 Comparison between the ideal hemisphere and the recovered 3D results of different methods. (a)~(e) Error between the cross sections of the ideal shape and the ones of the recovered 3D results shown in Fig.3 (h)~(l); (f)~(j) difference maps between the ideal unit hemisphere and the recovered results shown in Fig.3 (h)~(l)

图像的方法中 Holoimage 方法的数据压缩比最低,而提出的方法数据压缩比与 PLY 格式相比数据压缩比高达 52.1:1,与 Bayer 抖动方法数据压缩比接近。而在数据加载时间方面,提出方法和 Bayer 抖动方法时间接近,约为 PLY 格式数据加载时间的 2%,极大地降低了数据加载时间。而在显示时间方面,提出方法与双通道方法、Bayer 抖动方法和 Floyd-Steinberg 抖动方法接近,约为 PLY 格式数据显示时间的 1.7%,显示时间降低十分明显。

表1 不同方法单位半球数据压缩比、数据加载时间和显示时间

Table 1 Data compression ratios, loading time and display time of the unit hemisphere with different methods

	Size /kB	Compression ratio	Data loading time /ms	Display time /ms
PLY	1521	1:1	3815	969
Holoimage	229	6.6:1	578	21
Two-channel	51.7	29.4:1	122	16
Bayer dithering	29.7	51.2:1	77	15
Floyd-Steinberg dithering	75.6	20.1:1	186	15
Proposed method	29.2	52.1:1	75	14

同时对复杂的斯坦福大学的兔子模型^[20]进行了实验,实验结果如图5所示。图5(a)为原始斯坦福兔子轮廓数据。图5(b)和(h)分别为 Holoimage 方法的存储和重构结果。图5(c)和(i)为双通道编码方法结果。由图可见, Holoimage 方法还原结果较光滑,而采用双通道方法时表面存在明显的阶梯状条纹。两种方法的均方根误差分别为 0.31% 和 0.38%。图5(d)和(j)为 Bayer 抖动方法结果,图5(e)和(k)为 Floyd-Steinberg 抖动方法结

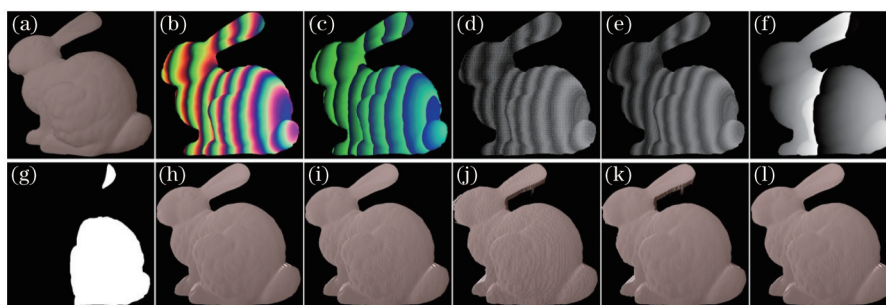


图5 不同方法下斯坦福兔子实验结果。(a) 原始三维轮廓数据; (b) Holoimage 结果; (c) 双通道编码方法结果;
(d) Holoimage 经过 Bayer 抖动结果; (e) Holoimage 经过 Floyd-Steinberg 抖动结果; (f) 灰度值编码方法中灰度图像结果;
(g) 灰度值编码方法中二值图像结果; (h)~(k) 为图(b)~(e)三维重构结果; (l) 为图(f)和(g)三维重构结果

Fig.5 Experimental results of different methods for the Stanford Bunny. (a) Original 3D range data; (b) Holoimage; (c) two-channel; (d) Holoimage with Bayer dithering; (e) Holoimage with Floyd - Steinberg dithering; (f) gray image of gray value encoding; (g) binary image of gray value encoding; (h)~(k) 3D reconstructed results for images shown in (b)~(e); (l) 3D reconstructed result for images shown in (f) and (g)

果。与单位半球的重构结果类似, Bayer抖动重构结果虽然整体上还原较好,但是模型表面存在明显的波纹起伏;虽然 Floyd-Steinberg抖动的重构结果也有误差,但是并没有 Bayer抖动结果明显。Bayer抖动方法的均方根误差为0.5%,大于 Floyd-Steinberg抖动方法的0.4%。图5(f)和(g)为采用所提出方法时的存储结果,图5(l)为重构结果,其均方根误差约为0.41%,该误差结果与双通道方法接近。

不同方法下的斯坦福兔子的数据压缩比、数据加载时间和显示时间如表2所示。由表可见, Bayer抖动方法压缩比最高,所提出方法的数据压缩比次之。与 PLY格式相比所提出方法的数据压缩比高达70.6:1。提出方法的数据加载和显示总时间约为 PLY格式数据总时间的1.4%,数据加载和显示时间降低十分明显。

表2 不同方法斯坦福兔子数据压缩比、数据加载时间和显示时间

Table 2 Data compression ratios, loading time and display time of the Stanford Bunny with different methods

	Size /kB	Compression ratio	Data loading time /ms	Display time /ms
PLY	1920	1:1	4816	1094
Holoimage	179	10.7:1	442	20
Two-channel	41.7	46:1	107	17
Bayer dithering	23	83.5:1	57	13
Floyd-Steinberg dithering	49.3	38.9:1	126	15
Proposed method	27.2	70.6:1	66	15

为了进一步说明所提出方法的有效性,对一些典型的模型进行了实验。模型的原始三维轮廓数据如图6所示。其中,图6(a)和(b)展示模型由计算机生成,图6(c)和(d)展示模型由实物扫描获得,图6(e)和(f)展示模型来源于斯坦福三维扫描库^[20]。实验模型使用不同方法进行压缩存储,存储结果所还原的三维轮廓数据的均方根误差如表3所示,不同方法存储结果的数据压缩比、数据加载时间和显示时间如表4~6所示。由表3~6可见,所提出方法的均方根误差在整体上与双通道及 Floyd-Steinberg抖动方法的均方根误差接近,而且优于 Bayer抖动方法。在数据压缩比方面,所提出的方法与 Bayer抖动方法接近,与双通道及 Floyd-Steinberg抖动方法相比数据压缩比更高。与 PLY格式数据相比,基于图像方法的数据加载时间减少了94%以上,其中所提出方法的数据加载时间减少了98%以上。在显示时间方面,基于图像方法中的 Holoimage方法的显示时间稍长,而其他基于图像方法的显示时间接近,与 PLY格式数据相比显示时间减少了98%以上。由以上结果可见,所提出的方法在保证相对较低的重构误差的同时,对三维轮廓数据实现了高压压缩存储,减少了数据加载与显示所用的时间,非常适合基于三维轮廓数据的在线数字博物馆的数据实时加载与显示。

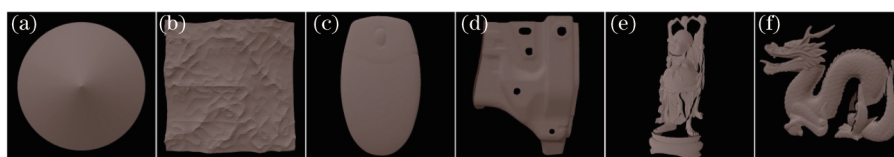


图6 实验模型的原始三维轮廓数据。(a)圆锥;(b)地形;(c)鼠标;(d)汽车部件;(e)佛像;(f)龙

Fig.6 3D range data of experimental models. (a) Cone; (b) terrain; (c) mouse; (d) auto parts; (e) buddha; (f) dragon

表3 不同模型不同方法的均方根误差

Table 3 Root-mean-square error (RMSE) of different models with different methods

	Cone	Terrain	Mouse	Auto parts	Buddha	Dragon
	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
Holoimage	0.12%	0.38%	0.42%	0.67%	0.24%	0.22%
Two-channel	0.25%	0.74%	0.65%	0.79%	0.51%	0.39%
Bayer dithering	0.37%	1.40%	1.01%	1.91%	0.92%	0.68%
Floyd-Steinberg dithering	0.20%	0.90%	0.65%	1.07%	0.45%	0.33%
Proposed method	0.28%	0.85%	0.65%	0.80%	0.49%	0.45%

表4 不同模型不同方法的数据压缩比

Table 4 Data compression ratios of different models with different methods

	Cone compression ratio	Terrain compression ratio	Mouse compression ratio	Auto parts compression ratio	Buddha compression ratio	Dragon compression ratio
PLY	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
Holoimage	32.3:1	38.4:1	44.7:1	35.2:1	19.6:1	23.8:1
Two-channel	151.7:1	190.6:1	196.4:1	160.3:1	67.7:1	90.4:1
Bayer dithering	250.7:1	289.1:1	318.6:1	236.9:1	127.9:1	154.5:1
Floyd-Steinberg dithering	96.9:1	122.8:1	119.0:1	93.7:1	67.4:1	75.0:1
Proposed method	279.9:1	289.1:1	288.4:1	243.5:1	90.7:1	129.3:1

表5 不同模型不同方法的数据加载时间

Table 5 Data loading time of different models with different methods

	Cone loading time /ms	Terrain loading time /ms	Mouse loading time /ms	Auto parts loading time /ms	Buddha loading time /ms	Dragon loading time /ms
PLY	16247	24348	11396	10894	3754	7732
Holoimage	515	633	258	315	194	319
Two-channel	108	125	57	64	58	88
Bayer dithering	67	87	36	44	27	52
Floyd-Steinberg dithering	163	195	97	118	57	105
Proposed method	56	87	42	42	41	63

表6 不同模型不同方法的显示时间

Table 6 Display time of different models with different methods

	Cone display time /ms	Terrain display time /ms	Mouse display time /ms	Auto parts display time /ms	Buddha display time /ms	Dragon display time /ms
PLY	3483	4713	2353	2410	999	1762
Holoimage	18	22	17	17	17	18
Two-channel	15	14	15	16	16	15
Bayer dithering	14	13	12	13	14	13
Floyd-Steinberg dithering	15	14	14	15	13	14
Proposed method	15	14	13	14	13	14

4 结 论

提出了一种基于灰度值编码的三维轮廓数据表示方法。根据虚拟照相机水平方向分辨率,将一定范围内的灰度值编码存储为单幅8位的灰度图像或者单幅8位的灰度图像结合单幅或多幅1位的二值图像,并将其作为投影条纹进行投影。通过虚拟照相机拍摄物体上发生形变的条纹图像实现将三维轮廓数据保存为二维图像。由于使用较少的图像位数存储编码信息,并且编码图像变化简单,因此降低了用于存储三维轮廓数据的图像大小。实验结果表明,与PLY格式数据相比提出的方法有效地提高了数据压缩比、减少了数据加载和显示时间,非常适合基于三维轮廓数据的在线数字博物馆数据的实时加载与显示。后续的工作将研究如何进一步降低所传输的三维轮廓数据的大小。

致谢 感谢斯坦福三维扫描库提供的模型数据。

参 考 文 献

- 1 Lin Haixin, Wu Qingyang, Huang Jinhui, *et al.*. Binary spatiotemporal encoded method for structured light projection of three-dimensional

- measurement[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1108002.
- 林海新, 吴庆阳, 黄锦辉, 等. 应用于结构光投影三维测量的二值时空编码方法[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1108002.
- 2 He Dong, Liu Xiaoli, Yin Yongkai, *et al.*. Three-dimensional imaging based on combination fringe and pseudorandom pattern projection [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209021.
- 何 懂, 刘晓利, 殷永凯, 等. 结合条纹和伪随机结构光投影的三维成像[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209021.
- 3 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
- 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- 4 3D Petrie Museum. The Virtual Lives of Things[OL]. <http://www.ucl.ac.uk/3dpetriemuseum/>. [2015-09-27]
- 5 University of Michigan. UMORP/ University of Michigan Online Repository of Fossils[OL]. <https://umorf.ummp.lsa.umich.edu/wp/>. [2015-09-27].
- 6 Smithsonian. Smithsonian X 3D[OL]. <http://3d.si.edu/>. [2015-09-27].
- 7 Gobbetti E, Marton F. Layered point clouds: a simple and efficient multiresolution structure for distributing and rendering gigantic point-sampled models[J]. Computers & Graphics, 2004, 28(6): 815-826.
- 8 Rodriguez M B, Gobbetti E, Marton F, *et al.*. Interactive exploration of gigantic point clouds on mobile devices[C]. The 14th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, 2012: 57-64.
- 9 Goswami P, Erol F, Mukhi R, *et al.*. An efficient multi-resolution framework for high quality interactive rendering of massive point clouds using multi-way kd-trees[J]. The Visual Computer, 2013, 29(1): 69-83.
- 10 Gu X, Gortler S J, Hoppe H. Geometry images[C]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 355-361.
- 11 Gumhold S, Kami Z, Isenburg M, *et al.*. Predictive point-cloud compression[C]. ACM SIGGRAPH 2005 Sketches, 2005: 137.
- 12 Gu X, Zhang S, Huang P, *et al.*. Holoimages[C]. Proceedings of the 2006 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling, 2006: 129-138.
- 13 Huang Y, Peng J, Kuo C C J, *et al.*. A generic scheme for progressive point cloud coding[J]. IEEE Trans Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(2): 440-453.
- 14 Cai K, Jiang W, Ma T, *et al.*. Probability model-adaptive coding of point clouds with octree decomposition[C]. SIGGRAPH Asia 2011 Posters, 2011: 33.
- 15 Karpinsky N, Zhang S. Composite phase-shifting algorithm for three-dimensional shape compression[J]. Opt Eng, 2010, 49(6): 063604.
- 16 Hou Z, Su X, Zhang Q. Virtual structured-light coding for three-dimensional shape data compression[J]. Opt & Lasers in Eng, 2012, 50(6): 844-849.
- 17 Karpinsky N, Wang Y, Zhang S. Three-bit representation of three-dimensional range data[J]. Appl Opt, 2013, 52(11): 2286-2293.
- 18 Karpinsky N, Zhang S. Hologram: real-time 3D range video encoding and decoding on GPU[J]. Opt & Lasers in Eng, 2012, 50(2): 280-286.
- 19 Karpinsky N, Zhang S. 3D range geometry video compression with the H.264 codec[J]. Opt & Lasers in Eng, 2013, 51(5): 620-625.
- 20 Stanford. The Stanford 3D Scanning Repository[OL]. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>. [2015-09-27].

栏目编辑: 何卓铭