

DIBR 中一种基于视图判定的褶皱消除方法

刘 然^{1,2,3,4}, 谢 辉¹, 邵国钦¹, 谭迎春¹

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 计算机学院, 重庆 400044;

3. 软件理论与技术重庆市重点实验室, 重庆 400044; 4. 四川虹微技术有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为消除基于深度图像绘制(DIBR)技术生成目标图像时可能出现的“褶皱”现象,提出了一种通过视图判定来确定参考图像像素点扫描顺序的方法.首先设定极点的 z 坐标为一个无穷小量,然后由该极点的齐次坐标得出绘制左、右视图时参考图像像素点的扫描顺序.该方法只需判断目标图像是左视图还是右视图,便可确定参考图像像素点的扫描顺序.试验表明,该方法能消除褶皱现象,且复杂度比 Z -buffer算法小,适用于虚拟视点水平移动时的虚拟视图绘制.

关键词: 三维电视; 褶皱; 深度图像绘制; 三维图像变换; 扫描顺序

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

A DIBR View Judgment-based Fold-elimination Approach

LIU Ran^{1,2,3,4}, XIE Hui¹, TAI Guoqin¹, TAN Yingchun¹

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Software Theory & Technology, Chongqing 400044, China; 4. Homwee Technology Co. Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: “Folds” may appear when the depth-image-based rendering (DIBR) technique is used to generate destination image. In order to remove the folds, an approach to determine the scan order of reference image by view judgment is proposed. First, the z coordinate of epipole is set as an infinitesimal, then the scan order of reference image rendering the left or the right view is determined by the new homogeneous coordinates of epipole. Accordingly, the scan order of reference image can be determined by the destination image which is left view or right view. Experimental results show that the proposed approach can eliminate folds with less complexity in contrast to the Z -buffer algorithm, and it is adaptable to virtual view rendering when the virtual viewpoint shifts horizontally.

Key words: 3D TV; folds; depth-image-based rendering; 3D image warping; scan order

由于深度图像绘制(depth-image-based rendering, DIBR)技术是三维电视系统中的关键技术,因此引起了很多研究者的关注^[1-2]. DIBR技术的核心步骤是三维图像变换(3D image warping)^[3]. 三维图像变换能够将参考图像(reference image)中的点投影到三维空间,再将三维空间中的点重投影到目标图像(destination image)平面上,从而生成新视点视图^[3-4]. 理论上,采用三维图像变换技术可以生成任意视点的视图,但是用硬件实现该技术较复杂. 到目前为止,实际应用中仅考虑虚拟视点在水平方向移动的特殊情形(基线与参考图像及目标图像平面平行且无旋转)^[1],这一特殊情形正是目前三维电视(包括自由立体显示器)中广泛使用的情形^[1, 5].

在三维图像变换时,有可能将参考图像中的多个像素点映射到目标图像的同一点上,这就是由可见性变化所引起的“褶皱(folds)”现象^[5-6],消除褶皱才能使目标图像呈现出正确的遮挡关系. 处理褶皱的传统方法是 Z -buffer算法,该算法需要存储并比较每一个像素点的深度值,不但占用额外的内存空间,而且绘制速度慢. McMillan等提出了一种遮挡兼容算法(occlusion-compatible algorithm)^[6-7],该算法将目标图像对应的摄像机光心投影到参考图像上得到极点,通过极点来确定扫描顺序,从而得到正确的视图. 由于该算法只依赖于参考摄像机的内部参数矩阵、外部参数和目标图像对应的虚拟摄像机的光心坐标,从而处理简单. 但McMillan没有针对DIBR技术讨论基线与参考(目标)图像平面平行时的扫描顺序,并且该算法需要摄像机标定参数,而在

收稿日期: 2011-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61201347, 61071190); 重庆市自然科学基金(cstc2012jjA40011)

第一作者: 刘 然(1978—),男,高级工程师,工学博士,主要研究方向为3D电视技术. E-mail: ran.liu_cqu@qq.com

通讯作者: 谢 辉(1986—),女,硕士生,主要研究方向为视频图像处理、3D电视技术. E-mail: hui.xie_cqu@qq.com

目前的三维电视中,基于深度图像的三维视频只包含了参考图像及其对应的深度图像,摄像机标定参数都是未知的^[8],这就限制了遮挡兼容算法的应用。

本文针对 DIBR 在三维电视中的应用,研究了虚拟视点在水平方向移动时具有的特殊性质,给出了一种通过视图判定确定参考图像像素点扫描顺序的方法来消除褶皱。该方法的特点是通过虚拟一个接近无穷远的极点来确定极点的极性,最终只需判断目标图像是左视图还是右视图(称为视图判定),便可确定参考图像像素点的扫描顺序。

1 褶皱与扫描顺序

1.1 褶皱现象

如前所述,DIBR 存在的一个重要问题就是由可见性变化所引起的褶皱现象,即参考图像中的多个像素点映射到目标图像中同一个点的现象。图 1 说明了褶皱现象产生的原因。

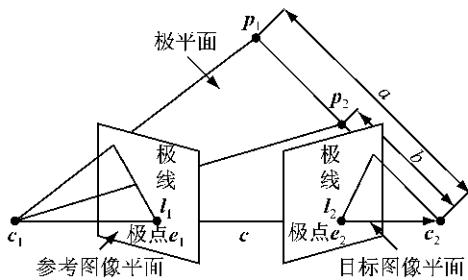


图 1 由可见性变化引起的褶皱现象示意图

Fig.1 Illustration of “folds” introduced by changes in visibility

图 1 中,由摄像机光心 c_1, c_2 和点 p_1 确定的平面称为极平面, c_1, c_2 连线称为基线(baseline),记为向量 c ,向量 c 与图像平面的交点为 e_1, e_2 。如果 e_1, e_2 在向量 c 的正方向上,则为正极点,如果 e_1, e_2 在向量 c 的负方向上则为负极点。极平面与摄像机平面的交线 l_1, l_2 称为极线。通过 DIBR 技术,极线 l_1 被映射到目标图像平面上,形成极线 l_2 。如图 1 所示,当 p_2 在直线 $p_1 c_2$ 上时,则其在目标图像平面上的投影与 p_1 的投影重合,从而产生了褶皱现象。

1.2 扫描顺序

消除褶皱现象的一种方法是确定参考图像中像素点的扫描顺序,确保被其他点遮挡的点在目标图像中总是先被绘制,通常这种方法叫做从后向前褶皱消除法,遮挡兼容算法便是一种从后向前的方法^[5,7]。本文的方法本质上也是从后向前的方法,下面介绍该方法的原理。

如图 1 所示, a, b 表示投影点 p_1, p_2 离虚拟光心 c_2 的距离,且 $a > b$ 。从图中可以看出:在参考图像上沿着极线 l_1 指向正极点 e_1 的方向来扫描参考图像中的像素点时,离虚拟摄像机光心 c_2 远的点先绘制,近的点后绘制。因此离虚拟摄像机光心 c_2 近的点 p_2 的信息将覆盖远处点 p_1 的信息,从而建立正确的可见性关系。若 e_1 为负极点,则在参考图像上沿着极线背离负极点的方向来扫描像素点。

由于所有可能产生褶皱现象的点都可以约束在极平面上,所有的极平面相交于基线,所有的极线相交于极点,因而只要确定极点就可以得到正确的参考图像像素点扫描顺序。极点的具体确定方法描述如下:

设极点 e_1 在图像像素坐标系中的齐次坐标为 $[e_x \ e_y \ e_z \ 1]^T$,在 c_1 对应的摄像机坐标系下的规范化齐次坐标为 $[e_{xx} \ e_{yc} \ e_{zc} \ 1]^T$;设向量 c 的齐次坐标($c_2 - c_1$)为 $[c_x \ c_y \ c_z \ 1]^T$ (世界坐标系),由针孔摄像机模型可得

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 1 \end{bmatrix} = KR \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,

$$K = \begin{bmatrix} a_x & 0 & o_x & 0 \\ 0 & a_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: K 为摄像机的内部参数矩阵(4×4), a_x 和 a_y 分别为水平方向和垂直方向的比例因子, $[o_x \ o_y \ 1 \ 0]^T$ 为光轴与图像平面的交点坐标,矩阵 $R(4 \times 4)$ 代表从世界坐标系变换到摄像机坐标系的旋转矩阵。将 K 代入式(1)可推出

$$[e_{xx} \ e_{yc} \ e_{zc} \ 1]^T = [e_{xx} \ e_{yc} \ e_z \ 1]^T = R[c_x \ c_y \ c_z \ 1]^T = d_1 \quad (2)$$

从式(2)可以看出,当 $c_z = 0$ 时,基线与参考图像平面无交点。当 $c_z \neq 0$ 时,基线与参考图像平面不平行,必与之有交点。

设参考图像平面的单位法向量的规范化齐次坐标为 $d = [d_x \ d_y \ d_z \ 1]^T$ 。由式(2)得 $[e_{xx} \ e_{yc} \ e_z \ 1]^T$ 为向量 c 通过旋转矩阵 R 变换后生成的新向量 d_1 的坐标(d, d_1 的坐标为 c_1 对应的摄像机坐标系下的坐标),而 d 可以看成由世界坐标系 z 轴的单位向量规范化齐次坐标 $d_0 = [0 \ 0 \ 1 \ 1]^T$ 经过旋转矩阵 R 变换后生成的新向量,因此向量 d_1 和向量

d 的夹角与向量 c 和向量 d_0 的夹角相同. 若 d_1 和 d 的夹角小于 90° , 则向量 c 与参考图像平面的交点在向量 c 的正方向, 为正极点, 此时 $e_x > 0$; 若夹角大于 90° 则向量 c 与参考图像平面的交点在向量 c 的负方向, 为负极点, 此时 $e_x < 0$. 将极点 e_1 的齐次坐标归一化可得 $[e_x/e_x \ e_y/e_x \ 1]^T$, 归一化后的前两个分量便是极点在参考图像平面中的坐标值.

2 基于视图判定的褶皱消除

目前三维电视中的 DIBR 系统仅考虑虚拟视点在水平方向移动的特殊情形, 这种情形下两摄像机的坐标系是互相平行的, 如图 2 所示. 本节重点研究这种特殊情形下的消除褶皱.

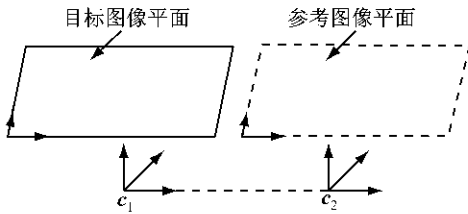


图 2 两摄像机的基线与参考图像平行的特殊情形示意图
Fig.2 Illustration of the special case when the baseline of the two cameras is parallel to the reference image

不失一般性, 设图 2 中 c_1 对应的摄像机坐标系与世界坐标系重合, 且基线与参考(目标)图像平行, c_2 为虚拟视点对应的光心坐标. 根据针孔摄像机模型有 $(c_2 - c_1) = [c_x \ c_y \ c_z \ 1]^T$, $c_z = 0$, 且 $R = E$ (单位矩阵), 由式(2)得 $e_z = 0$. 此时极点 e_1 与参考图像平面相交于无穷远处, 无法确定极点的极性.

为了确定参考图像像素点的扫描顺序, 可作如下假设: 设 $c_z = \Delta\sigma$, $\Delta\sigma \rightarrow 0$, 代入式(1)可得

$$\begin{bmatrix} e_x & e_y & e_z \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} a_x c_x + o_x \Delta\sigma & a_y c_y + o_y \Delta\sigma & \Delta\sigma \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

如果 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$, 则极点为正极点, 且落在无穷远处. 可以证明, $\Delta\sigma \rightarrow 0^-$ 时参考图像的扫描顺序与 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$ 时的顺序相同.

定理 设极点 e_1 在图像像素坐标系中的坐标为 $[e_x \ e_y \ \Delta\sigma]^T$, 则 $\Delta\sigma \rightarrow 0^-$ 时参考图像的扫描顺序与 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$ 时的顺序相同.

证明 将极点 e_1 的齐次坐标归一化为 $[e_x/\Delta\sigma \ e_y/\Delta\sigma \ 1]^T$. 根据第 1.2 节的原理, $(e_x/\Delta\sigma, e_y/\Delta\sigma)$ 便是 e_1 在参考图像平面中的坐标. 当 $\Delta\sigma \rightarrow 0$ 时, 极点 $e_1(e_x/\Delta\sigma, e_y/\Delta\sigma)$ 可以落在坐标系中任意一个象限或

坐标轴的无穷远处, 具体位置取决于 e_x 和 e_y 的符号. 如果 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$, e_1 是正极点, 根据第 1.2 节的原理, 参考图像的扫描顺序是朝向 e_1 的方向; 如果 $\Delta\sigma \rightarrow 0^-$, e_1 是负极点, 参考图像的扫描顺序是远离 e_1 的方向. 由于 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$ 时的极点坐标与 $\Delta\sigma \rightarrow 0^-$ 时的极点坐标关于原点对称, 趋向相反的方向, 如图 3 所示, 因此 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$ 和 $\Delta\sigma \rightarrow 0^-$ 时扫描顺序相同.

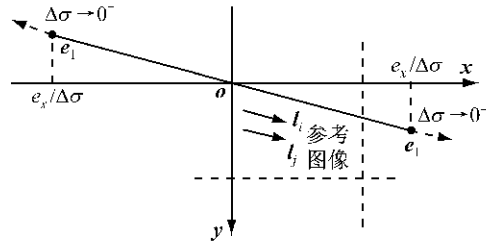


图 3 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$ 与 $\Delta\sigma \rightarrow 0^-$ 时参考图像的扫描顺序
Fig.3 Scan order of the reference image in case of $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$ and $\Delta\sigma \rightarrow 0^-$

上述定理说明了在考察参考图像的扫描顺序时, 只需要考察 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$ 与 $\Delta\sigma \rightarrow 0^-$ 中的一种. 下面仅讨论 $\Delta\sigma \rightarrow 0^+$ 即 e_1 为正极点时, e_x 和 e_y 取其他不同的符号组合参考图像的扫描顺序.

如果 $e_x > 0, e_y > 0$, 则 e_1 坐标为 $[+\infty \ +\infty \ 1]^T$. 此时, 极线 l_1 与极线 l_2 平行, 如图 3 所示. 显然, 此时应按照从左到右, 从上到下的顺序扫描参考图像, 如图 4a 所示.

若 $e_x < 0, e_y > 0$, 则 e_1 的坐标为 $[-\infty \ +\infty \ 1]^T$, 其扫描方向如图 4b 所示, 按从右到左, 从上到下的顺序扫描. 类似地, 可以得到当 $e_x > 0, e_y < 0$ 时的扫描方向(见图 4c)以及当 $e_x < 0, e_y < 0$ 时的扫描方向(见图 4d).

e_1 落在坐标轴上的情况有如下几种: 若 $e_x > 0, e_y = 0$ 则 e_1 的坐标为 $[+\infty \ 0 \ 1]^T$, 落在 x 轴正无穷远处, 极线与 x 轴平行, 因此应按从上到下的顺序扫描, 而水平方向的扫描顺序没有限制, 如图 4e 所示. 类似地, 可以得到其他情形的扫描顺序, 分别如图 4f~h 所示. 若 $e_x = 0, e_y = 0$, 又 $e_z = 0$, 代入式(1), 可得 $(c_2 - c_1) = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, 即视点没有变换, 没有形成新的视图, 因此不存在此种情况.

图 4 囊括了 e_x 和 e_y 符号组合的所有情况, 按图 4 的扫描顺序扫描参考图像像素点便可消除褶皱.

目前的三维电视应用中仅考虑视点在水平方向移动的特殊情形, 即 $(c_2 - c_1) = [c_x \ 0 \ 0 \ 1]^T$, 代入公式(3), 可得极点 e_1 的坐标为 $[a_x c_x \ 0 \ \Delta\sigma]^T$. 由于 a_x 为正数, 当 c_x 小于 0, 此时极点 e_1 落在 x 轴

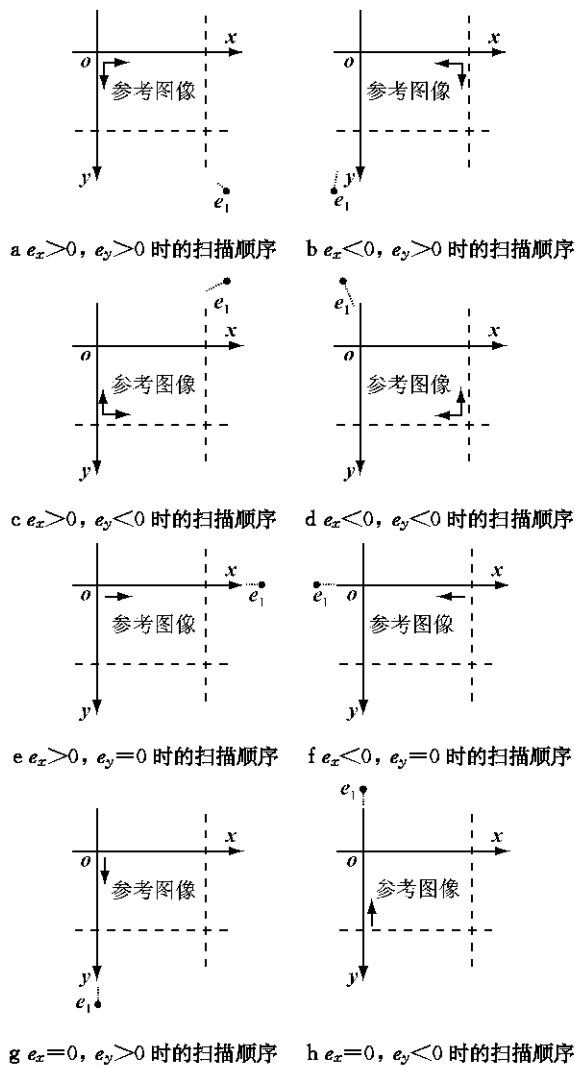


图 4 正极点 e_1 落在无穷远处时参考图像的扫描顺序
Fig.4 Scan order of the reference image when the positive epipole e_1 locates at infinity

的负方向,如图 4f;反之,极点 e_1 落在 x 轴的正方向,如图 4e 所示.从图 4f 中可知,绘制左视图时应从右到左扫描参考图像;从图 4e 可知,绘制右视图时应从左到右扫描参考图像;垂直方向的顺序没有限制.因此在三维电视应用中,可先根据需求判断需要绘制的是左视图还是右视图(视图判定),然后再根据视图确定参考图像像素点的扫描顺序,便可消除褶皱.具体算法流程如图 5 所示.

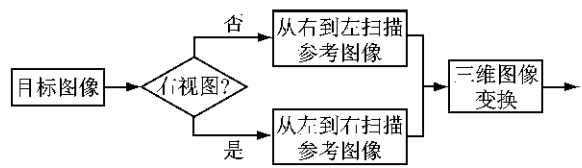


图 5 算法流程图
Fig.5 Flowchart of the algorithm

3 试验和分析

本文采用“Ballet”和“Breakdancer”序列^[9]中摄像机 4 拍摄到的图像以及“Lawn”和“Road”序列^[10]进行试验.假设以拍摄参考图像的摄像机为中心,左右两边各摆放一个与该摄像机完全相同的虚拟摄像机(相当于左眼或右眼),人眼之间的距离为 65 mm (在“Ballet”和“Breakdancer”序列参数中相当于 2.6^[11],所有试验的基线长度都采用该参数).根据本文算法确定的扫描顺序(见图 5)和三维图像变换公式^[1]完成虚拟视点的绘制后,生成的目标视图如图 6 所示.

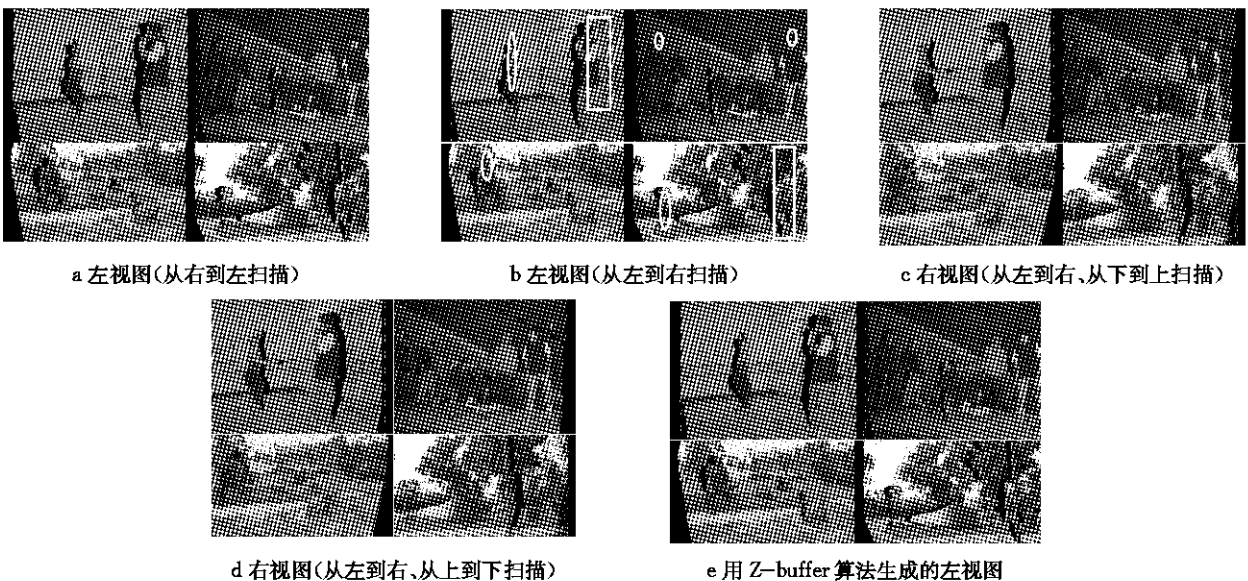


图 6 基线与参考(目标)图像平面平行时生成的左右视图

Fig.6 The generated left and right views when the baseline is parallel to the reference image

图 6a 为按照本文方法确定的扫描顺序(从右到左)扫描参考图像生成的左视图. 由于视点的改变, 在左视图中人物的左边缘和左视图左边界存在较大的空洞, 这里为方便比较不进行空洞填充. 图 6b 为按相反的顺序(从左到右)扫描参考图像生成的左视图. 由于该图中人物先绘制, 背景后绘制, 导致圈和框所示的地方背景信息覆盖了部分的人物信息, 生成了遮挡关系错误的内容.

图 6c 为按从左到右、从下到上的顺序扫描参考图像得到的右视图, 图 6d 为按从左到右、从上到下的顺序扫描参考图像得到的右视图, 两图的结果一

样. 由于基线与参考图像平行时, 极点在无穷远处, 所有的极线都平行, 当极线与水平轴平行时, 垂直方向没有分量, 因而不需考虑垂直方向的绘制顺序.

图 6e 为采用 Z-buffer 算法生成的左视图, 其结果与图 6a 一致, 但采用本文方法的仿真速度比采用 Z-buffer 的速度快. 采用其他序列重复上述试验(试验平台, Intel(R) i5 CPU, 2.81 GHz, 3.99 G 的内存), 均可以得到同样的结论. 图 7 显示了“Ballet”, “Breakdancer”, “Angkorwat”^[10], “Flower”^[10], “Lawn”, “Road”, “Stair”^[10] 以及 “Temple”^[10] 这八个序列的部分试验结果.

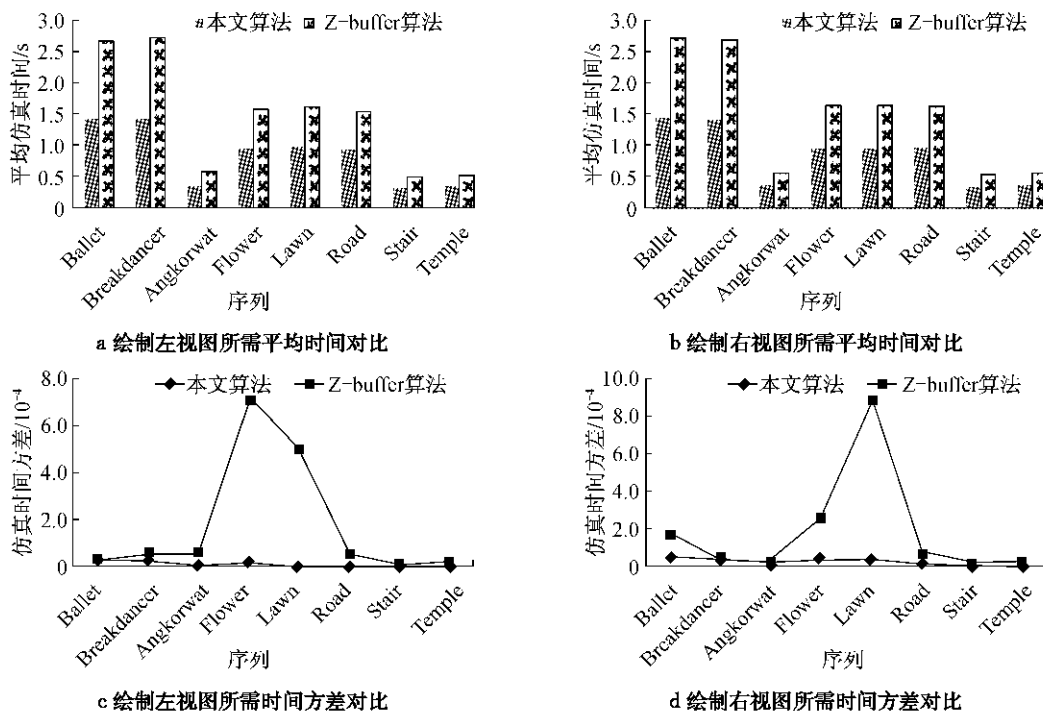


图 7 本论文算法和 Z-buffer 算法的性能比较

Fig. 7 Performance comparison of the proposed method and Z-buffer algorithm

在图 7a 和 b 中, 纵轴表示仿真时间, 图 7 的横轴表示各个序列. 用本文算法和 Z-buffer 算法测试各个序列的前 10 帧图像, 然后计算这 10 幅图像仿真时间的平均值和方差, 得到图 7. 其中图 7a 和 c 是绘制左视图时各个序列的平均仿真时间和仿真时间方差对比图, 图 7b 和 d 是绘制右视图时各个序列的平均仿真时间和仿真时间方差. 从图 7 可看出本文方法不但比 Z-buffer 算法速度快, 而且更稳定. 本文方法之所以快, 是因为 Z-buffer 算法需要计算并比较每一个像素点的深度值, 而本文的方法不需要; 本文方法之所以更稳定, 是因为 Z-buffer 算法与产生褶皱现象的像素点的数目及扫描像素点的顺序有

关, 而本文方法仅需要确定扫描顺序, 与图像内容无关.

从图 7 还可以发现, 当绘制右视图时, Z-buffer 算法的扫描顺序与本文方法的扫描顺序实际上是一致的. 由于 Z-buffer 算法需要计算并比较每一个像素点的深度值(尽管这种比较是多余的), 因而绘制速度比本文的方法慢很多. 当绘制左视图时, Z-buffer 算法的扫描顺序与本文方法是相反的. 这时 Z-buffer 算法会保证离虚拟光心近的像素点先绘制, 离虚拟光心远的像素点不被绘制, 而本文方法中每一个像素点必然要绘制一次, 因此 Z-buffer 算法与本文算法的性能差距稍有缩小.

4 结语

在 DIBR 实际应用中,很多情况下是将参考图像当成左(右)视图来生成右(左)视图,并且要求虚拟视图的视点只在水平方向移动.本文研究了这种特殊情形下参考图像像素点的扫描顺序,提出了一种通过视图判定来消除褶皱的方法.该方法只需判断目标图像是左视图还是右视图,便可确定参考图像像素点的扫描顺序以消除褶皱.由于本文方法无需比较每个像素点的深度值,也不需要摄像机标定参数,且与图像的具体内容无关,因而计算简单、处理速度快、稳定性好.此外,该方法不需要另辟内存空间来存储每个点的深度值,有利于降低硬件实现的成本,简化 DIBR 系统的硬件实现.大量试验表明,本文的方法能够得到正确的扫描顺序,性能优于传统的 Z-buffer 算法.

本文方法适用于只有一幅参考图像的情况,下一步研究如何将该方法推广到有多幅参考图像的情况.

参考文献:

- [1] LIU Ran, XIE Hui, TAI Guoqin, et al. Depth adjustment for depth-image-based rendering in 3D TV system[J]. Journal of Information and Computational Science, 2011, 8(16): 4233.
- [2] ZHANG Ling, TAI Guoqin, LIU Ran, et al. Correction algorithm of matching error for DIBR[J]. Journal of South China University of Technology, Natural Science, 2011, 39(12): 51.
- [3] 刘然, 巫英坚, 许小艳, 等. 一种用于 DIBR 的去隔行算法[J]. 计算机应用研究, 2011(4): 1563.
- LIU Ran, WU Yingjian, XU Xiaoyan, et al. De-interlacing algorithm for DIBR[J]. Application Research of Computers, 2011(4): 1563.
- [4] LEE P-J, Effendi. Nongeometric distortion smoothing approach for depth map preprocessing [J]. Multimedia, IEEE Transactions on, 2011, 13(2): 246.
- [5] 冯雅美. 自然三维电视系统中虚拟视点绘制技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- FENG Yamei. Virtual view generation research for natural 3D TV systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [6] LIU Zhanwei, AN Ping, LIU Suxing, et al. Arbitrary view generation based on DIBR[C]// Intelligent Signal Processing and Communications Systems 2007. Xiamen: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2008: 168-171.
- [7] McMillan L, Jr. An image-based approach to three-dimensional computer graphic [D]. Chapel Hill: University of North Carolina, 1997.
- [8] HDMI Licensing LLC. High-definition multimedia interface specification version 1.4a [EB/OL]. [2012-10-15]. <http://www.docin.com/p-113296854.html>. 2011.
- [9] Zitnick C L, Kang S B, Uyttendaele M, et al. High-quality video view interpolation using a layered representation[C]// ACM SIGGRAPH and ACM Transactions on Graphics. Los Angeles: Association for Computing Machinery, 2004: 600-608.
- [10] ZHANG Guofeng, JIA Jiaya, Wong T, et al. 3D video download [EB/OL]. [2012-10-15]. <http://www.cad.zju.edu.cn/home/gfzhang/projects/videodepth/data/>. 2011.
- [11] 郁理. 基于深度图像绘制的自由视点视频关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2010.
- YU Li. Key technology research on free-view video based on depth-image based rendering[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [2] 钱劲松. 新老路基不协调变形及控制技术研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院, 2003.
- QIAN Jinsong. Research on the uneven deformation of widening and existing subgrade treatment [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2003.
- [3] 郑悦锋, 徐飞龙, 谢经保, 等. 基于不协调变形控制的道路工程河浜处理设计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 466.
- ZHENG Yuefeng, XU Feilong, XIE Jingbao, et al. Design of river and creek treatment based on control of uncoordinated deformation in road engineering [J]. Journal of Tongji University, Natural Science, 2005, 33(4): 466.
- [4] 谢康和, 周健. 岩土工程有限元分析理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- XIE Kanghe, ZHOU Jian. Finite element analysis theory and application in geotechnical engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [5] Kutara K, Miki H, Mashita Y, et al. Settlement and countermeasures of the road with low embankment on soft ground [J]. Technical Reports of Civil Engineering, 1980, 22(8): 12.
- [6] 中华人民共和国交通部. JTG D30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Ministry of Transport of P R China. JTG D30—2004 Specifications for design of highway subgrades [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [7] 中华人民共和国交通部. JTG D60—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- Ministry of Transport of P R China. TG D60—2006 Specifications for design of highway asphalt pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.

(上接第 88 页)