引文格式：柳翠明, 夏小科, 陈可蕴, 等. 顾及深度变化的三维模型与视频融合可视化[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6): 7-11. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.06.002

顾及深度变化的三维模型与视频融合可视化

柳翠明[1, 2]，夏小科[1, 2]，陈可蕴[1, 2]，赵林峰[1, 2]
（1. 广州市城市规划勘测设计研究院，广东 广州 510060；
2. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室，广东 广州 510060）

摘　要：随着空间数据获取手段的不断丰富，新一代地理信息系统需要满足不同获取方式、不同数据格式和不同数据形式等时空数据综合可视化需求。以倾斜摄影测量为基础的城市空间三维建模，是对复杂城市物理世界实现数字化的有效解决方案。利用虚实融合技术，将真实视频数据与虚拟三维模型场景进行融合可视化，可以减少虚拟三维模型与真实物理世界时空上的差异，达到更真实的用户体验效果。动态视频数据与三维模型纹理的融合过程中，通常需要借助深度图来对相机可见性进行判断，当深度图计算精度不够高时，融合场景中会出现视频纹理断带或穿透的问题，因此，提出一种线性深度调节优化算法，该算法可以减小深度图中深度值与实际相机深度之间的误差，实现视频纹理数据与三维模型的精确融合。通过实验证明线性深度调节优化算法可以有效提高三维模型场景中视频数据动态可视化效果。

关键词：深度图；三维模型；视频；融合可视化
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0007-05

3D Model and Video Fusion Visualization Considering Depth Changes

LIU Cuiming[1,2], XIA Xiaoke[1,2], CHEN Keyun[1,2], ZHAO Linfeng[1,2]
(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China;
2. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China)

Abstract: With the continuous enrichment of spatial data acquisition methods, a new generation of geographical information systems needs to meet the needs of comprehensive visualization of spatio-temporal data such as different acquisition methods, different data formats and different data forms. The 3D modeling of urban space based on oblique photogrammetry is an effective solution to the digitalization of complex urban physical world. Using virtual and real fusion technology to visualize the real video data and virtual 3D model scenes, the difference in time and space between the virtual 3D model and the real physical world can be reduced, and a more realistic user experience effect can be achieved. In the fusion process of dynamic video data and 3D model texture, it is usually necessary to use the depth map to judge the camera visibility. When the depth map calculation accuracy is not high enough, the video texture will be broken or penetrated in the fusion scene. In this article, we proposed a linear depth adjustment optimization algorithm, which could reduce the depth value error between the depth map and the actual camera depth, and realize the accurate fusion of video texture data and 3D model. Experiments prove that the linear depth adjustment optimization algorithm can effectively improve the dynamic visualization effect of video data in the 3D model scene.

Key words: depth map, 3D model, video, fusion visualization

在三维空间场景中，可见模型深度信息通常使用深度图来进行存储，深度图为一张栅格图像，在栅格图中栅格单元存储的值为深度信息而不是RGB值[1-3]。在三维模型与视频数据融合应用中直接使用原始深度图来确定模型表面融合纹理会出现视频断带现象[4]，需要对深度值进一步精确计算，常见的方法有两种：第一类加大采样密度[5-6]，第二类采用数学方法提高深度值精度[7-8]。增加采样密度，也就是加大深度图分辨率，但是一味地增加采样密度并不能很好地解决视频断带问题（当相机距离模型足够远时）。当前深度图在阴影分析和可视分析应用中，为了让深度图中深度值与场景中模型实际深度值更接近，往往在深度图中添加一个偏置常量，但在偏置常量设置不合理时，会带来较大的深度误差。针对以上问题，本文提出一种深度图线性深度调节优化算法对深度值进行精确计算，通过精确计算模型深度值，优化了三维模型场景中视频

收稿日期：2022-05-05；修回日期：2023-03-22。
项目来源：广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金资助项目（2020B121202019）；广州市城市规划勘测设计研究院科技基金资助项目（RDI2210201142）。
第一作者简介：柳翠明（1977—），硕士，正高级工程师，研究方向为新型基础测绘理论与方法，E-mail：1669884759@qq.com。

数据融合可视化效果。

1 视频像素与渲染模型对象融合

在三维地理信息系统中，将相机拍摄的视频数据与三维模型融合，需要还原相机与虚拟模型之间的相对位置关系才能准确地将视频纹理与三维模型进行融合。首先，提取相机位置及姿态信息后，再从三维模型虚拟场景中，获取视频中拍摄到的静态地物；然后需要对相机所在的空间位置，在虚拟场景中进行可见性计算；最后再根据可见性计算结果，将场景内判断为相机可见的模型表面纹理替换为该相机视频中对应的像素纹理。

1.1 深度值实时计算方法

对相机进行定位与定向后，将视频数据与三维实景空间进行融合时，需要确定相机视锥范围内，相机视线方向模型中的表面可见区域。在WebGIS中对于视频中模型表面可见区域的计算，通常采用深度图原理来进行判定。从相机的位置出发，以相机真实的视角宽度，按照光线传播原理，观察场景，计算场景中的物体到光源的距离（也就是该视角下的深度），并记录各个深度图栅格中的最小值（即距离光源最近的点的位置），从而获取深度缓冲区[9-10]。通过比较模型表面像素点到相机中心的距离与深度缓冲区中记录的最小距离，可判断三维模型像素点是否位于相机可视范围内。

深度缓冲区中深度值的计算公式为：

$$depth = (distance - near)/(far - near) \quad (1)$$

式中，depth为深度值；distance为视锥近平面延其法线到像素点的距离；near为视锥近平面到相机的法线距离；far为视锥远平面到相机的法线距离。为便于数据存储需将所有的深度值进行归一化，深度值在深度图栅格中存储为[0,1]的值。如果模型落在近平面上则深度值为0，落在远平面上则深度值为1。最终记录值为相机视线方向上距离相机最近点的深度值。深度缓冲区具体的计算步骤如下：

1）视锥范围确定。从相机的位置出发，根据相机的视角范围及视线方向，确定一个视锥体空间。

2）深度缓冲区初始化。创建一个深度缓冲区对象并初始化所有的深度缓冲区栅格数据为1。

3）深度值计算。遍历相机视锥体空间内每个模型像素点，对其深度值与其在深度缓冲区中对应区域已存的深度值进行比较，如果小于当前深度缓冲区对应的深度值，则替换目前的深度值，否则保留原深度值。

深度缓冲区的存储采用的是二维栅格图像的数据格式。为满足深度值存储精度的要求，需要对单浮点精度的深度数据进行编码，分别存储到栅格数据的RGBA四维分量中，需要时再解译。R值存的是$[0, 1/255^2]$段的值，G值存的是$[1/255^2, 1/255^4]$段的值，往后依次类推。这样保证在float类型的有效位数内满足深度值存储的精度需求。

1.2 模型表面可见性判断方法

获取深度缓冲区后，利用它进行三维空间中相机可见模型表面的判别。相机视锥范围内如果某个点在相机视角下的深度大于深度缓冲区中对应位置的深度值，则意味着它被某个地物遮挡，因此在视频中为不可见地物；反之则为可见地物。在场景中，如图1所示，相机视角下可见地物模型表面为绿色区域，面向相机但被遮挡不可见地物表面为红色区域。

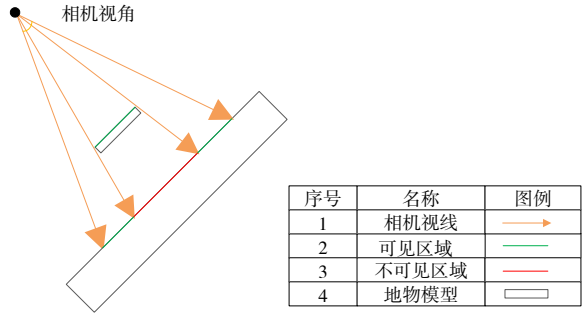


图1 相机可见性判断示意图

图1中的2个物体，沿相机视线方向，距离相机最近的模型表面为可视模型表面，同一方向一旦确定模型可视表面后，之后的模型都为不可视模型。因此判断一个点是否在相机可视区域内的关键就是，它是否为相机视线方向上距离相机最近的点。

2 深度图线性深度调节优化算法

如图2所示，图中橙色箭头为相机视线方向，黑色柱状线为深度图每个栅格中对应深度的柱状图，蓝色物体为三维模型表面。从图中可以看出，深度图是对场景中模型的深度进行离散取样，所以黑色的柱状深度图呈阶梯状的变化。在实际三维模型场景中，几乎所有的模型表面三角面片栅格化后的深度值都比深度图中记录的深度值要大（对应模型红色标记区域），直接通过对相机视锥内模型表面三角面片栅格化后像素到相机的距离与深度图中记录深度值进行比较，来判断该模型的像素点的可见性，会造成较大误

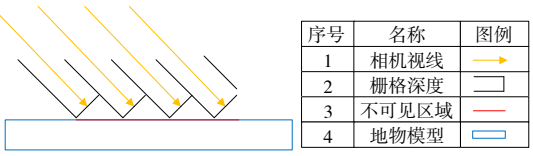


图2　原始深度图可见性判断

差（几乎全为不可见）。

2.1　传统深度值调节方法

利用深度图对三维场景进行可视分析计算时，基于原始深度图直接计算相机对象在场景中的模型可见性，会导致可见性误判[11]。传统深度值调节的方法是在原始深度值的基础上添加一个深度偏差估计值进行调整，在深度图中记录调节后的深度值 AdjustDepth 则为：

$$\text{AdjustDepth}=\text{depth}+\text{constantBias} \tag{2}$$

但是将深度偏差估计值 constantBias 设置为常量，并不能满足三维模型与视频数据融合可视化的精度需求[12]。距离偏差估计值过大或者过小都会影响视频数据的融合可视化效果。

如果偏差值过小则在模型表面会出现视频纹理断带现象。如图3所示，模型表面（绿色标记的部分）像素深度值小于该区域对应深度图中的深度值，会被判断为模型可见区域，因此该部分在视频融合中会有视频纹理像素的贴合，红色部分由于深度值大于该区域对应深度图中深度值，被判断为相机不可见模型。该情况下，物体实际深度大于深度图中采样深度，所以会出现模型表面视频融合纹理断带现象。其直接原因是 constantBias 太小，不足以消除深度图中的深度误差；其根本原因是深度图的采样分辨率不够，如果深度图的分辨率足够大，添加一个微小的距离偏差估计常量能解决上述视频断带的问题，但是在计算资源一定的条件下，不能无限的增大深度图分辨率。

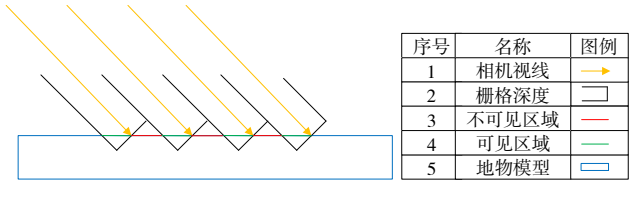


图3　距离偏差估计值过小可见性判断

如果添加的偏差估计值太大，会导致视频穿透。如图4所示，由于添加的距离偏差估计常量过大，黑色柱状线条表示深度栅格穿过背对相机的模型表面。由于被柱状深度栅格穿过的模型表面（绿色标记的部分）像素深度值小于深度图中对应的深度值，模型中面向相机的三角面片与背对相机的三角面片都会融合为视频纹理，在地物之间距离较近的情况下甚至会将视频纹理融合到被遮挡的地物表面。在三维地理信息系统场景中，此类错误融合数据会降低视频融合的精度，严重影响可视化效果。

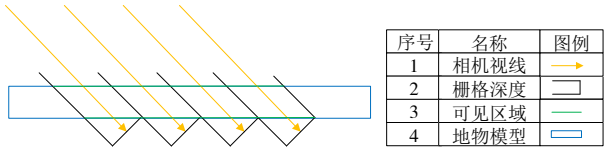


图4　距离偏差估计值过大可见性判断

2.2　线性深度调节优化算法

在传统深度值计算算法中，采用模型距离相机最近点的深度值加偏差估计值的计算方法显然存在一定的误差，偏差估计过大或太小都会导致模型表面可视判断的不准确，影响融合可视化效果。针对上述问题，本文提出一种线性深度调节优化算法。在分辨率一定的深度图中，深度值精度与多方面的因素相关。

当深度图中栅格大小一定时，地物到相机的距离越远，相同尺寸大小的栅格对应的空间范围越大，如下图6所示。由于三维地物模型到相机的距离不同，地物距离模型越远，所需要的深度调节参数越大，且深度调节参数的大小与模型表面到相机的距离线性相关。每个栅格所对应的实际模型范围为：

$$\text{GridRange}=\text{ModelDistance}\times\frac{\text{GridWidth}}{\text{GridDistance}} \tag{3}$$

式中，GridRange 为深度图中每个栅格对应的实际空间范围；ModelDistance 为深度图中栅格对应的三维模型到相机的距离；GridWidth 为原始栅格宽度；GridDistance 为深度图中栅格到相机中心的距离。当模型表面与相机视线方向存在夹角时（后面简称模型表面斜率），在深度图分辨率一定的情况下，栅格宽度为定值。调节参数应随模型表面斜率的变化而改变。

如果模型表面斜率越大，就需要越大的调节参数来对深度图中的深度值进行深度调节，所以计算调节参数时，必须考虑模型表面斜率的影响，经分析可知，模型表面斜率值与深度值正相关。获取当前可视点的模型表面斜率值 Slope 后，最终调节参数的计算方式如下：

$$\text{AdjustPrameter}=\text{ModelDis tan ce}\times\text{GridWid th}\times$$

$$\frac{\text{Slope}+\text{ConstantSlope}}{\text{GridDistance}} \tag{4}$$

式中，ConstantSlope为微小常量，考虑三维模型表面在某些情况下会有一定的起伏，当模型表面与相机视线方向垂直时，模型表面斜率值Slope为零，添加微小常量ConstantSlope后，调节参数AdjustParameter依然会有调节效果，进一步确保了深度图中深度值大于实际模型，但不会远大于实际模型，保证了深度调节参数的有效性。所以最终的优化调节后的深度值AdjustDepth为：

$$\text{AdjustDepth}=\text{depth}+\text{AdjustPrameter} \tag{5}$$

3 实验与分析

为对深度图传统常量调节算法与本文线性深度调节优化算法的视频融合应用效果进行对比分析，实验首先分别采用传统深度图计算方法与本文线性深度调节优化算法进行视频融合可视化。进一步地，为量化分析原始深度图、传统常量深度调节后深度图与本文线性深度调节优化后深度图的视频融合误差，在相机到三维场景模型不同距离条件下，分别对3种情况进行融合断带误差统计实验。实验中，视频分辨率为2 720×1 530，模型是以0.05 m为最高分辨率的LOD（levels of detail）倾斜摄影测量三维模型。

3.1 实验一

为表明在相机距离三维模型较近的场景中，传统深度图计算方法与本文线性深度调节优化算法视频融合可视化效果的差异，利用无人机空中拍摄距离地面模型27 m（无人机距离地面垂直高度）的视频数据与已有三维模型进行视频融合实验。其中传统深度图中深度调节常量设置为0.01（深度归一化后值），在线性深度调节优化算法中设置模型表面斜率值微小常量ConstantSlope为0.05，实验结果如图5与图6所示。

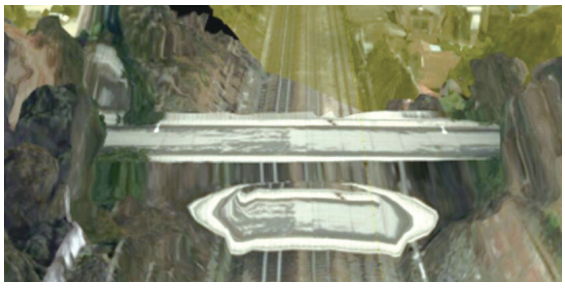


图5 近距离传统深度值计算视频融合

从以上实验结果可以观察到，在近距离摄像视频数据与三维模型融合可视化场景中（如图5），路面视频纹理穿过路面并贴合到了桥下铁轨表面，这部分属于视频纹理穿透的错误融合。而采用线性深度调节优化后的深度图对视频数据与三维模型进行融合可视化，路面视频数据没有穿透现象（如图6），融合结果准确率较高。出现视频穿透的原因是：深度调节参数过大。实际需要的深度调节参数大小与模型表面到相机的距离线性相关，当空间三维模型到相机的距离较近时，深度图中需要较小的调节参数。



图6 近距离线性深度调节优化算法视频融合

在相机距离三维模型较远的场景中，同样为表明传统深度图计算方法与本文线性深度调节优化算法视频融合可视化效果的差异，利用无人机空中拍摄距离地面模型451 m（无人机距离地面垂直高度）的视频数据与已有三维模型进行视频融合实验，其中传统深度图中深度调节常量设置为0.01（深度归一化后值），在线性深度调节优化算法中设置模型表面斜率值微小常量ConstantSlope为0.05，实验结果如图7与图8所示。

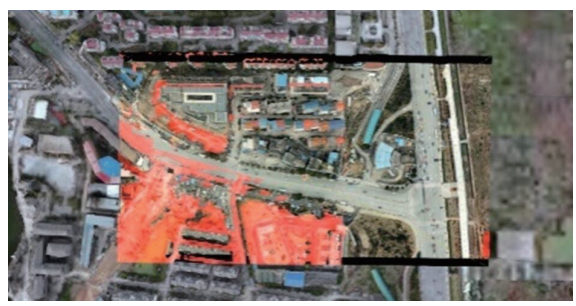


图7 远距离传统深度值计算视频融合

从以上实验结果可以观察到，在远距离摄像视频数据与三维模型融合可视化场景中，整个相机视频数据与三维模型融合表面出现面积较大的视频数据断带现象（如图7，图中红色斑块）。在局部细节放大图中（如图9），左半图为原始三维模型，右半图为视频数据与三维模型进行了融合可视化后的视频覆盖区域，从图中可以看出，中间道路部分有明显的视频断带现象。而在线性深度调节优化后的深度图对视频数据与三维模型融合过程中，消除了视频数据断带的现象（如图8），从局部细节放大图中也可以明显看出

（如图10），深度图线性调节优化后融合质量明显提高。出现视频穿透的原因是：深度调节参数太小。当空间三维模型到相机的距离较远时，受距离的影响深度图中需要较大的深度调节参数。因为深度值调节参数太小，物体实际深度大于深度图中采样深度，红色断带部分是由于该区域实际深度值大于对应深度图中深度值，被判断为相机不可见模型，导致了视频数据与三维模型纹理融合的断带误差出现。

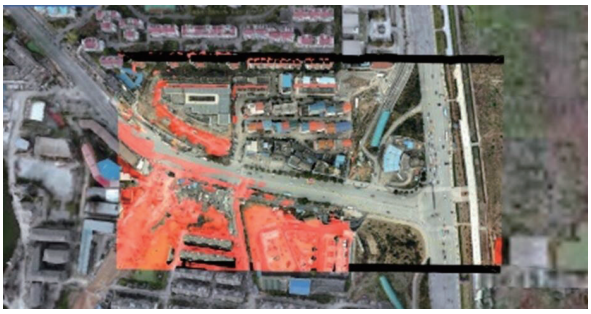


图8　远距离线性深度调节优化算法视频融合



图9　传统深度值计算视频融合局部细节放大



图10　线性深度调节优化算法视频融合局部细节放大

3.2　实验二

为充分验证本文线性深度调节优化算法在不同距离下（相机到三维模型表面的距离），皆具有优良的视频融合效果。利用高度为80 m（无人机距离地面垂直高度）的侧俯视相机视频数据，在不同距离范围内对视频融合断带误差进行统计，图9红色区域为断带误差（即相机可见模型并具有视频像素，但未融合到三维模型表面的区域），将误差像素除以视频分辨率得到断带误差百分比。对原始深度图、传统常量深度调节后深度图与本文线性深度调节优化后深度图分别进行视频融合实验，其中传统深度调节常量设置为0.01，在线性深度调节优化算法中设置模型表面斜率值微小常量ConstantSlope为0.05。

实验表明本文线性深度调节优化算法调节过后的深度图在不同距离下，都未出现视频融合断带误差。直接利用原始深度图进行视频融合可视化，当相机到三维模型表面距离为80 m时，断带误差百分比达到60%，随着距离的增大，达到了90%以上，表明直接利用原始深度图进行视频融合是不可行的。在传统常量深度调节实验中，距离180 m时，开始出现融合断带误差，随着距离的增大，融合误差也不断地增大，但是其视频融合效果相比直接利用原始深度图要好，在距离150 m以内且不考虑穿透误差的情况下，融合效果还是可观的。总而言之，本文线性深度调节优化算法在考虑距离与模型表面斜率的影响后，在三维模型与视频融合应用中具有更佳的效果。

4　结　语

本文对三维模型视频融合技术进行了总体的介绍，并对视频采集相机在模型中的可视性计算进行了具体分析。在生成栅格深度图过程中，深度值受地物到相机的距离和模型表面斜率的影响，在三维模型场景中利用传统深度值计算法进行视频数据的融合时，会出现断带或穿透现象。针对上述问题，本文提出了一种线性深度调节优化算法，对深度误差进行消除。实验结果表明，线性深度调节优化算法提高了深度图精度，有效地解决了视频断带和穿透的问题，满足了三维模型与视频数据精确融合的需求。

参考文献

[1]　Hourcade J C, Nicolas A. Algorithms for Antialiased Cast Shadows[J]. Computers & Graphics, 1985, 9(3): 259-265

[2]　Reeves W T, Salesin D H, Cook R L. Rendering Antialiased Shadows with Depth Maps[C]//Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1987: 283-291

[3]　Donnelly W, Lauritzen A. Variance Shadow Maps[C]//Proceedings of the 2006 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2006: 161-165

[4]　Lauritzen A, McCool M. Layered Variance Shadow Maps[C]// Graphics Interface, 2008

（下转第38页）