

## 基于增强现实的地下管线真实感可视化方法

陈佳舟<sup>1)</sup>, 刘艳丽<sup>2)</sup>, 林奶养<sup>1)</sup>, 彭群生<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310027)

<sup>2)</sup>(四川大学计算机学院 成都 610065)

(chenjiashou@cad.zju.edu.cn)

**摘要:** 为便于城市地下管线的铺设与维护,提出一种基于增强现实的地下管线真实感可视化方法,将原本不可见的虚拟地下管线真实地呈现在视频画面中.首先将屏幕空间分割为对地下管线具有不同遮挡语义的 4 个区域;然后借鉴工程图学中的剖视图方法,采用沿地下管线走向的坑道式剖切和地表面的竖直剖切方法来展示被遮挡的地下管线;进而根据画面的遮挡语义,运用视频中地表遮挡物和地下管线的重要视觉特征,揭示地下管线与地表物体之间的正确遮挡关系;最后利用渐变融合对地下隐藏信息与真实场景视频进行合成.实验结果表明,该方法不依赖于三维场景的精确几何重建,可在 GPU 上实时实现.

**关键词:** 增强现实;可视化;X 射线视觉;真实感绘制;城市规划

**中图法分类号:** TP391

## Photorealistic Visualization of Underground Pipelines to Enhance the Reality

Chen Jiashou<sup>1)</sup>, Liu Yanli<sup>2)</sup>, Lin Naiyang<sup>1)</sup>, and Peng Qunsheng<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

<sup>2)</sup>(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract:** To facilitate the layout and maintenance of urban underground pipelines, a new approach of photorealistic visualization for underground pipelines integrated into the video of real scene is presented. We exploit section cutaways perpendicular to the ground plane and tunnel cutaways along pipelines to reveal the underground pipelines. To exhibit the correct spatial relationship of the underground pipelines with the objects overground, we segment the screen space into four regions with different depth semantics. We then retain the important visual features of both underground pipelines and the overground objects within the particular region for depth cuing and utilize gradual mask for composition. Our approach does not rely on the geometric reconstruction of the 3D environment, and its GPU implementation achieves a real-time performance.

**Key words:** augmented reality; visualization; X-Ray vision; photorealistic rendering; city planning

地下管线,如排水、燃气管道、光纤等,是城市的重要基础设施,它们的合理规划、安全运行是现代化城市高效率运转的保证.近年来,计算机地理信息系统等技术的发展为城市地下管线的科学管理提供了

强有力的技术支持.这些技术具有查询高效、更新便捷、显示直观等特点.然而,由于缺乏与真实环境的同屏显示功能,其可视化效果无法使用户直观地将实际的工作环境 with 电子显示系统中的画面对应起

收稿日期:2011-11-21;修回日期:2012-06-06. **基金项目:** 国家“九七三”重点基础研究发展计划项目(2009CB320802);国家自然科学基金(60970020,61103137). **陈佳舟**(1984—),男,博士研究生,主要研究方向为增强现实、表意式绘制; **刘艳丽**(1981—),女,博士,讲师,主要研究方向为增强现实、计算机图形学; **林奶养**(1987—),男,硕士,主要研究方向为增强现实; **彭群生**(1947—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为真实感图形学、虚拟现实、科学计算可视化等.

来,极大地降低了其应用价值。

增强现实是一种将虚拟信息与真实环境融合到同一个屏幕空间的实时显示技术.对于地下管线结构,该技术能够将虚拟地下管线与实时捕捉的视频画面叠加,产生时空一致的显示效果.然而,简单的画面叠加虽然可展示地下管线的精确分布,但给人以地下管线悬浮在地面上的错觉,易引发融合画面的深度混淆.因此,通过画面虚实融合、透视被遮挡的地下信息首先面临的挑战是如何揭示地面场景对地下管线的遮挡关系,并精确展示地下管线的深度信息.

剖切,在工程图学中又被称为剖视图,是一种通过剖切机械零件以展示其内部构造的制图方法<sup>[1]</sup>.本文提出了竖直剖切和坑道式剖切 2 种地面剖切方式.竖直剖切借鉴工程图学中的全剖视图,生成截断地下管线的竖直平面,精确地展示它们的深度信息.而坑道式剖切借鉴了工程图学中的轴向局部剖视图,揭示地下管线的整体分布及其相对于地面的空间位置关系.

考虑到地下管线可视化的真实感需求,本文在绘制虚拟物体时采用了自适应于剖切面的光照环境设置来投射阴影,并使用带有标尺线的剖切面纹理,强调了地下管线的深度感知.此外,为避免虚拟物体叠加到视频画面的相关区域可能产生的视觉混淆,本文提取并保留了虚实物体的几何轮廓信息和视觉特征.最后,利用渐变融合 alpha 图合成虚实物体,并适当增强对比度,有效地保证了合成画面的易读性和清晰度.

## 1 相关工作

在视频画面上显示不可见物体的可视化方法称为透視视觉,或者 X 射线视觉.从视觉感知理论来讲,能够揭示遮挡关系的深度线索可划分为单目与双目线索.在双目视觉中,视差起着决定性作用;而单目视觉主要包括运动提示、透明度合成、遮挡、纹理渐变和阴影等<sup>[2]</sup>.

### 1.1 透明度

全局透明度是融合真实场景画面与隐藏信息最简便的解决方法,它能提示出发生遮挡的区域<sup>[3]</sup>,但不能有效地揭示出正确的遮挡次序,并且在遮挡层次增加时容易产生视觉混淆<sup>[2]</sup>.非均匀透明度方法在前景的特征区域采用较低的透明度,视觉特征的保留不仅产生较低视觉混淆而且提示出遮挡次

序<sup>[4-9]</sup>.该方法首先在体绘制领域得到发展,诸如二次曲率<sup>[4]</sup>、内外曲面的距离<sup>[5]</sup>、梯度大小<sup>[6]</sup>等的各种表面特征被用于调整局部透明度,以同时展示体数据的内外结构.在增强现实领域中,Kalkofen 等<sup>[7]</sup>利用曲率信息提取遮挡物体的线条,Mendez 等<sup>[8]</sup>使用预定义的 alpha 图进行虚实合成,Sandor 等<sup>[9]</sup>采用计算视觉显著图来定义非均匀透明度,并通过实验证明线条往往比视觉显著度更加有效.因此,本文提取线条作为视觉特征用以揭示遮挡关系.

### 1.2 遮挡

遮挡是单目视觉中另一个重要的深度提示线索<sup>[2]</sup>.Burns 等<sup>[10]</sup>,Li 等<sup>[11]</sup>和 Birkeland 等<sup>[12]</sup>利用切割技术在遮挡表面上切割出一个虚拟的空洞.但由于这类方法依赖于遮挡物的几何信息,而从视频中实时三维重建又非常困难,因此无法将其直接用于增强现实的应用中.不依赖于遮挡物精确几何重建的虚拟空洞方法,虽然能有效地提示遮挡关系,但无法精确地展示被遮挡物体的深度,如基于上下文信息的魔术透镜<sup>[13]</sup>.Avery 等<sup>[14]</sup>在切割面上添加多个遮挡层,Chen 等<sup>[15]</sup>给地下管线添加辅助切割凹槽,这些方法定性地提示了深度,但仍缺乏准确性.本文提出的竖直剖切旨在通过展示地下管线的横截面,定量地提高了地下管线可视化的深度精确性;同时又提出坑道式剖切,沿着地下管线的走向展现其与地面的空间位置关系.

### 1.3 其他视觉线索

在 X 射线视觉中,被遮挡物体的光照往往被忽略<sup>[16]</sup>.然而地下管线在切割面上投影生成的阴影却能准确地揭示这些管线被切割面截断的位置,能有效地提示它们的深度.本文首次尝试将阴影线索应用于 X 射线视觉中;此外,在摄像机移动拍摄的情况下产生的运动提示也是重要的深度线索<sup>[2]</sup>.

## 2 区域分割与算法概述

本文方法的流程如图 1 所示,其输入为室外真实场景的视频(左)、虚拟物体(右上)和附加的辅助剖切面(右下).虚拟物体是某城市部分地下管线的三维网格模型,其位置由摄像机参数决定.本文采用定标板的方法自动计算摄像机内参,通过用户交互指定视频第一帧的摄像机外参,非第一帧的摄像机外参由基于预处理数据和特征点匹配的定标系统求得.本文提出 2 种辅助剖切方式:竖直剖切面是一个垂直于地平面的平面,它直观地展示地下管线的深

度信息,并设计了一个基于鼠标的简便交互界面,使用户能快速地指定它的位置;坑道式剖面是沿着地下管线放置的倒梯形坑道,它能够展示地下管线的整体分布及其深度信息,其位置根据地下管线的分布自动生成。

本文的虚实融合算法根据遮挡关系将屏幕画面划分为4个显示区域:首先,采用视频分割技术将真实场景画面划分为运动区域 $R_m$ 和静态区域 $R_s$ ,再基于地下管线及其辅助剖面在视频画面上的成像投影划分出主虚拟区域 $V_m$ 和次虚拟区域 $V_s$ ;其中,主虚拟区域为辅助面切割地面后可见的虚拟区域,

而次虚拟区域为辅助面切割地面后仍不可见的虚拟区域.在真实的物理世界,这4个区域的深度层次关系由近及远分别为 $R_m \leq R_s \leq V_m \leq V_s$ .如果按照这一深度层次关系融合虚实画面,地下管线及其辅助剖面会被真实物体完全遮挡.为了透视被遮挡的地下管线,本文将该深度层次关系调整为 $R_m \leq V_m \leq V_s \leq R_s$ ,即优先保留真实场景视频中的运动物体,而将静态地表面画面的深度调整到地下管线及其辅助剖面的后面.根据调整后的深度层次关系进行虚实物体的消隐,分别得到图1中间彩图红色、绿色、蓝色和黑色区域。

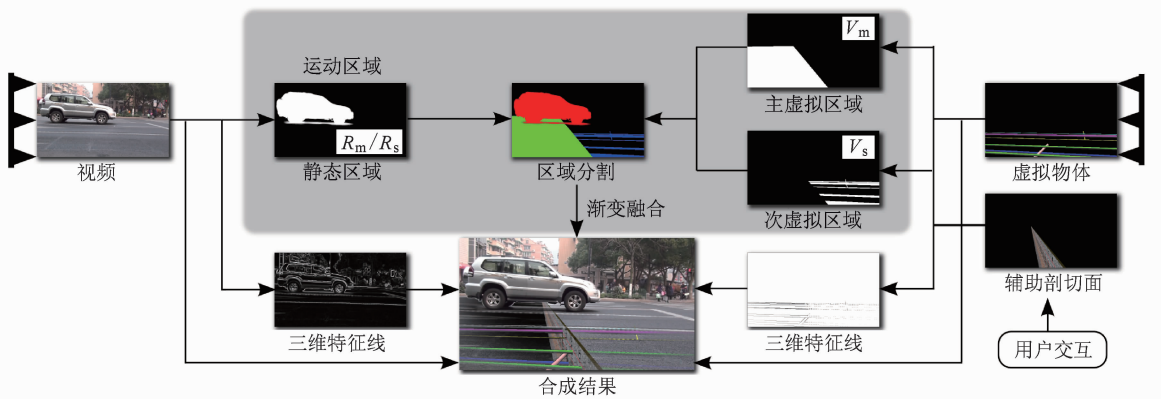


图1 本文方法流程图

### 3 本文方法实现

#### 3.1 光照设置与虚拟物体的绘制

选择合理的绘制方法对于提升虚拟物体的深度感知效果十分重要<sup>[17]</sup>.本文首先使用不同颜色来区别诸如给排水、燃气、光缆等不同用途的地下管线.然而复杂场景的地下管线往往交错在一起,仅仅通过相互遮挡难以辨别它们的深浅关系,本文通过降低较深的管线的透明度来帮助揭示该关系.对于剖面,本文使用带有水平红色标尺线的纹理,从而较精确地展示穿过剖切面的地下管线的深度信息。

与传统的增强现实系统不同,绘制隐藏的地下管线重在提供深度感知线索,无需保证其与地面场景一致的真实光照.为更加有效地揭示地下管线形状、分布及其深度,首先设置一个自上而下的方向光,以清晰展现管线的形状特征.其次,在每一个竖直剖面正上方设置一个点光源,使被其截断的管线在该剖切面上投影一个阴影,如图2b所示.该阴影的作用在于把管线牢牢地固定在剖切面相应深度的位置上.对于坑道式剖切,由于阴影投射到剖切面的底部往往是不可见的,本文通过随着深度降低光亮度的方法模拟环境遮挡的效果<sup>[18]</sup>,结果如图2d所示。

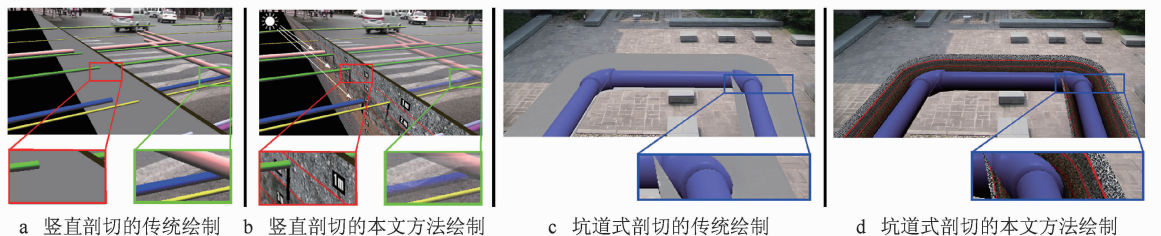


图2 光照设置与虚拟物体的绘制

#### 3.2 视频与三维物体的特征线提取

如前所述,降低静态区域的深度层次以突显地

下管线,可能导致视频的部分视觉特征被地下管线和辅助剖面所覆盖,这部分视觉信息也将随之丢

失. 这违背了清晰展示所有视觉重要特征的可视化要求, 影响用户对虚实环境的时空一致性匹配. 具有视觉显著性的特征包括纹理、颜色、形状等, 其中线条是一种几乎不占用屏幕空间就能展示物体形状信息的重要特征. 因此, 本文通过显示视频画面静态区域内景物和虚拟物体的特征线来揭示被遮挡的静态区域内物体的形状信息, 以减少深度关系调整带来的视觉信息的损失.

本文在绘制地下管线三维模型的同时保存其深

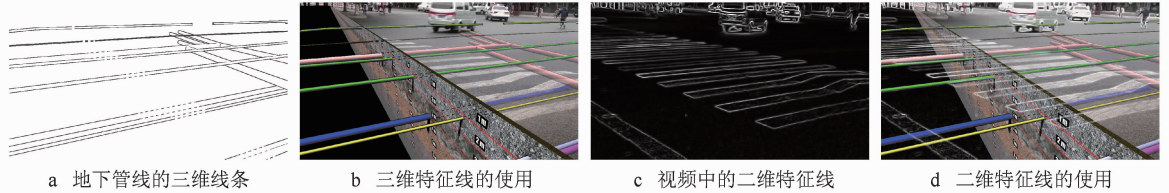


图 3 视频与三维物体的特征线提取

线条的使用带来了 2 个主要好处: 1) 它们以极低的屏幕空间占用率保留了相互遮挡的虚实物体的形状信息: 二维线条使真实环境的物体在被遮挡区域仍然清晰可辨, 三维线条则显示了地下管线的分布; 2) 特征线的使用强调了真实环境、剖切面和地下管线三者之间真实的深度次序, 即  $R_s \leq V_m \leq V_s$ : 虚线强调了被剖切面遮挡的地下管线, 而最后叠加上去的真实景物的二维线条覆盖了部分切面和虚拟管线, 因此提示地下管线及其辅助剖面均被真实环境所遮挡的事实.

### 3.3 渐变融合与对比度增强

记视频当前帧为  $I$ , 地下管线及辅助剖切面绘制的图像为  $O$ , 根据 4 个区域及其调整后的深度关系 ( $R_m \leq V_m \leq V_s \leq R_s$ ), 直接合成得到

$$\begin{cases} I, q \in R_m \\ C(q) = m(I, O, \alpha_{V_m \cup V_s}), q \in R_s \end{cases};$$

其中, 运动区域具有最高的遮挡优先级, 始终显示; 而静态区域则由该区域原视频图像和地下管线所在虚拟区域的 alpha 图  $\alpha_{V_m \cup V_s}$  合成得到, 即  $m(x, y, \alpha) = x \cdot (1 - \alpha) + y \cdot \alpha$ .  $\alpha_{V_m \cup V_s}(q) = \delta(q \in V_m) + \lambda \cdot \delta(q \in V_s)$ ,  $\delta(\cdot)$  为标准 delta 函数, 当输入条件成立

度缓存和法向量缓存, 然后对这 2 个缓存使用多通道的 Sobel 算子, 得到如图 3 a 所示三维线条  $L_{3D}$ , 它主要包含了地下管线的轮廓线和曲面法向变化较大的位置. 需要指出的是, 本文选择性地将次虚拟区域的三维线条绘制为虚线, 以强调次区域中虚拟物体被剖切面遮挡的事实. 对于输入的视频帧, 本文首先对其进行保持边缘特征的滤波以去除噪声, 如图 5 b 所示, 然后使用 Sobel 算子提取得到如图 3 c 所示二维线条  $L_{2D}$ .

时函数值  $\delta = 1$ , 否则其值为 0.  $\lambda$  为次虚拟区域的 alpha 值, 用户可根据需要对其调整. 如本文在坑道式剖切时设  $\lambda = 0.5$ , 以体现次虚拟区域中虚拟物体被剖切面遮挡的事实; 而对竖直剖切, 设  $\lambda = 0$ , 以强调地下管线穿过剖切面.

接着, 将提取得到的特征线添加到静态区域上, 得到新的  $C'(q) = m(C_{2D}, m(I, O \cdot L_{3D}, \alpha_{V_m \cup V_s}), L_{2D})$ ; 其中, 三维线条  $L_{3D}$  以黑色直接叠加到地下管线的绘制图像上, 而二维线条  $L_{2D}$  以  $C_{2D}$  的颜色叠加到整个合成画面上. 本文使用  $C_{2D}$  为白色, 以区别于三维线条的颜色. 图 3 b, 3 d 所示分别为使用了三维和二维特征线的中间结果.

通过剖切面的使用和特征线的保留, 虽能在切割区域揭示正确的遮挡关系并展示精确的深度信息, 但该深度仅对剖切面的附近的管线有效. 为在更大范围内展示由剖切面引入的深度提示信息, 本文将突出中心剖切区域, 并在剖切面附近使用渐变融合. 为此, 本文引入 2 个渐变 alpha 图来改进虚实合成方法: 中心关注 alpha 图和区域过渡 alpha 图.

本文使用现有关注度定义中最简单但又有效的关注度定义<sup>[10]</sup>来计算关注区域, 即图像的中心关注.

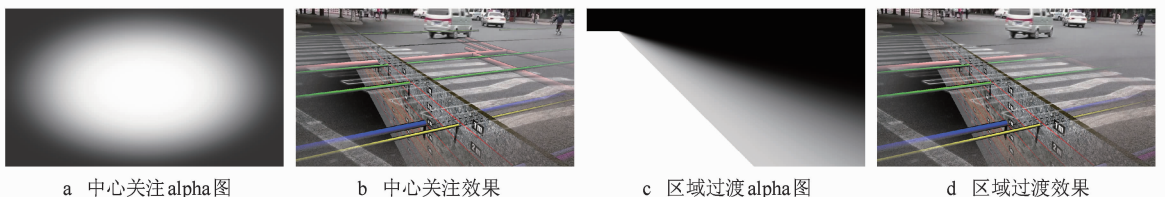


图 4 2 个渐变 alpha 图

与其对应的中心关注 alpha 图  $\alpha_f$ , 如图 4 a 所示, 通过给予处在屏幕非中心区域的虚拟物体较低的可见度, 将人眼的注意力吸引在屏幕中心区域, 如图 4 b 所示. 其次, 在静态区域采用基于剖切面位置的区域过渡 alpha 图  $\alpha_r$ , 它由剖切面和水平面的位置来计算得到, 如图 4 c 所示. 该 alpha 图在远离剖切面的区域逐渐降低物体的可见度, 缓解了该区域虚拟物体和真实环境之间遮挡关系的混淆问题, 如图 4 d 所示. 根据以上 2 个 alpha 图, 在静态区域的合成方程进一步改进为  $C''(q) = m(C_{2D}, m(I, O \cdot L_{3D}, \alpha_{V_m UV_s} \cdot \alpha_f \cdot \alpha_r), L_{2D} \cdot \alpha_f \cdot \alpha_r)$ .

需要指出的是, 2 个 alpha 图同时也对三维和二

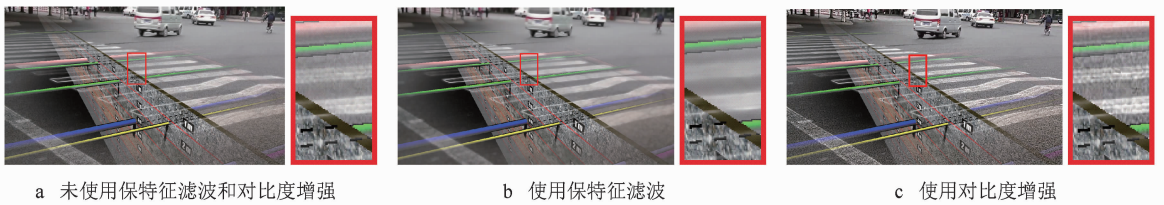


图5 保特征滤波和对比度增强

## 4 结果比较与讨论

增强现实中的 X 射线视觉的关键是在透视被遮挡物体的过程中寻找一种合理的方式, 以揭示其与遮挡物体之间真实的深度关系. 直接将被遮挡物叠加到视频上会产生地下管线悬浮于地面的视觉混淆, 如图 6 a 所示, 其分辨率为  $1024 \times 576$ . 通过图 6 b 所示在地平面挖洞来模拟的魔镜效果, 它只能提示遮挡的发生, 但不能说明遮挡的关系, 且完全损失

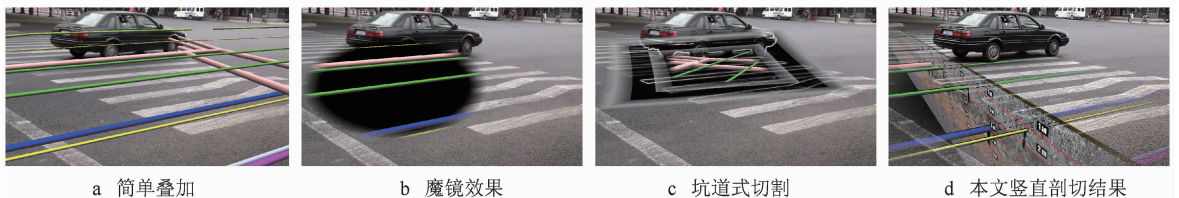


图6 本文方法与其他增强现实显示地下管线方法的结果比较

全剖视和局部剖视是工程图学的基本剖视图方法, 复杂的制图任务往往需要根据具体要求组合使用. 为此, 本文开发多剖切面模式, 图 7 所示为若干个竖直剖切面组合使用的结果, 其分辨率为  $1024 \times 576$ . 其中, 平行剖切面对于展现某一视线范围内的地下管线较为有效; 相互垂直的剖切面可以展示地下管线的整体分布和深度. 根据用户关注的地下管线的远近, 这 2 个垂直的剖切面产生的切割区域可

维特征线的合成进行了部分改进, 它们在中心和切面附近保留较多, 而在远离屏幕中心和非遮挡的区域逐渐减弱.

增强现实融合了真实场景、地下隐藏物体与虚拟剖面等多重信息, 因此最后的合成画面有时可能过于复杂, 造成观察者理解困难. 为此, 本文对视频逐帧进行如图 5 b 所示保特征滤波, 滤去图像噪声等冗余信息; 并采用 Unsharp Masking<sup>[20]</sup> 增强最后合成画面的对比度, 如图 5 c 所示. 保特征滤波、对比度增强和中心关注 alpha 图等方法的使用, 使本文方法有效地保证了增强结果的易读性和清晰度.

了遮挡区域的视频几何信息. Avery 等<sup>[14]</sup> 提出的如图 6 c 所示坑道式切割的方法通过逐渐变暗的若干个坑道矩形定性地提示隐藏物体的深度, 并通过提取图像特征线的方法保留遮挡区域的几何轮廓信息. 然而, 该方法显示的地下管线仍然缺乏较为精确的深度感. 本文则采用如图 6 d 所示竖直剖切或是沿地下管线的坑道式剖切将地表直接剖开, 以达到展示精确深度信息的目的. 并且, 区域分割使得本文方法能更好地展示真实环境与虚拟物体之间的正确遮挡关系.

以是求交(同时移除)或求并(同时保留).

图 8 所示为坑道式剖切中使用和未使用区域分割的效果比较, 其分辨率为  $960 \times 540$ . 本文采用 Zhong 等<sup>[21]</sup> 的视频分割算法, 将地面上的移动物体置于地表画面上方, 揭示了虚拟物体位于地下. 次虚拟区域有助于在揭示遮挡关系与保留该区域虚拟物体之间找到权衡, 图 8 b 由左右 2 幅图合成(以绿线隔开), 其中左图没有显示次虚拟区域内的虚拟物体

(即次虚拟区域的  $\alpha$  值参数  $\lambda=0$ ), 因此具有较强的遮挡提示, 但完全损失了地下管线的信息; 反之, 右图则完全显示了次虚拟区域的虚拟物体(即参

数  $\lambda=1$ ), 但因此丧失了遮挡关系的提示. 为此, 本文对次虚拟区域采用半透明效果, 图 8c 即为参数  $\lambda=0.5$  的结果.

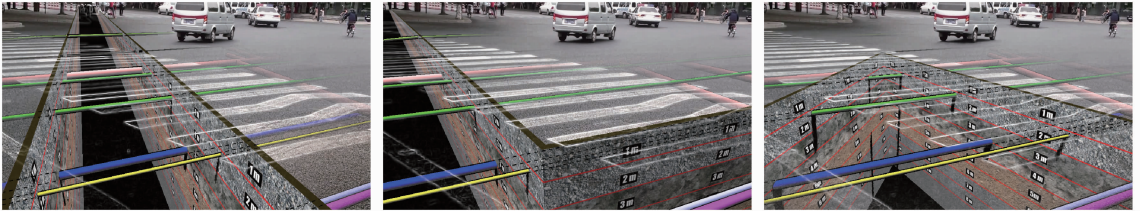
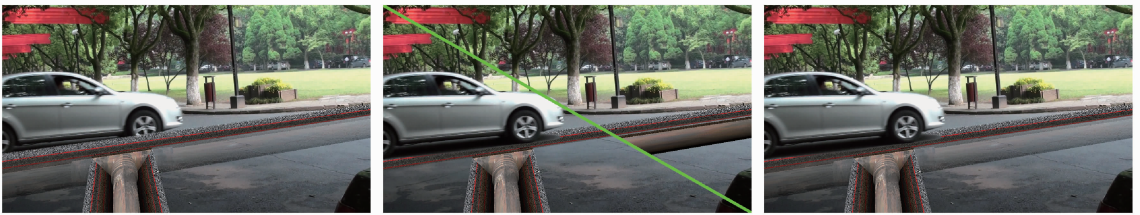


图 7 使用多个竖直剖切面以完成复杂的可视化任务



a 未使用视频分割

b 未使用次虚拟区域( $\lambda=0$ 和1)

c 本文坑道式局部剖切的最终结果

图 8 坑道式剖切中区域分割的效果比较

基于视频的实时室外场景摄像机定标是计算机视觉领域有待完全解决的问题. 利用预采集数据的方法是目前较为成熟的方法之一, 本文实现了 Zhang 等<sup>[22]</sup>的简化版本, 通过特征点匹配实时计算摄像机外参, 并通过定标板预先求得摄像机内参. 图 9 所示为由移动摄像机拍摄的室外场景视频结果,

其分辨率为  $1920 \times 1080$ , 左、中、右分别为视频中的第 1, 41 和 121 帧. 在连续播放的视频结果中, 处在不同深度的物体(包括地下管线和视频中的真实物体)呈现出不同的相对运动速度, 因此很自然地揭示出单目视觉中的运动深度线索.

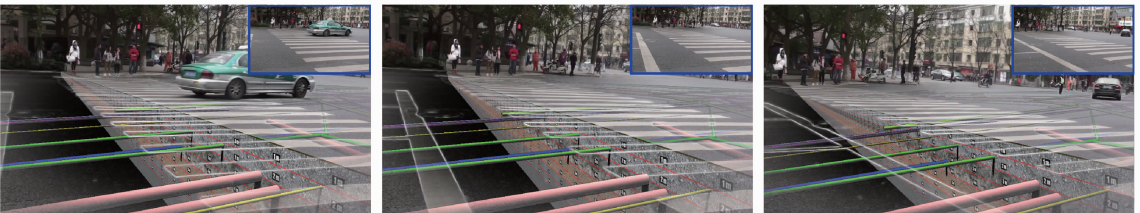


图 9 移动视点下的可视化效果

本文使用的地下管线信息源于某城市的原始地理信息数据, 采用本文方法首先解析这些原始数据, 然后根据可见性在线生成用于绘制的三维网格模型; 它在 GPU 上实现, 包括虚拟物体绘制、特征提取和图像合成等步骤; 在 Intel® Core™ 2DuoE6550@ 2.33 GHz CPU, 2 GB 内存, NVIDIA GeForce 8800GT 显卡的电脑上的运行速度根据分辨率的不同大约在 22~45 帧/s, 达到了实时绘制效果.

## 5 结 语

本文提出了一种基于增强现实的地下管线真实

感可视化方法, 将屏幕空间分割成不同深度层次的 4 个区域, 通过调整它们之间的遮挡次序解决隐藏信息的可视化问题. 本文提出了竖直剖切和坑道式剖切 2 种地面剖切方式, 结合包括阴影在内的多种视觉线索, 突出地下管线绘制的真实感和与真实环境之间的正确遮挡关系; 本文提取视频和三维物体的特征线作为遮挡区域的几何轮廓信息加以保留, 并通过渐变融合与对比度增强有效保证最后合成画面的清晰度和易读性.

虽然本文使用了透明度、遮挡、运动和阴影等多种单目深度提示, 但诸如双目显示等其他视觉线索仍有待尝试. 本文的剖切方法建立在将真实环境近

似为一个水平面的假设上,该假设虽然使算法具有不依赖于几何的优势,但也在一定程度上影响了剖切的效果。实时的室外场景三维重建将有助于提高本文可视化方法的真实感效果,这将是今后研究方向。

### 参考文献 (References):

- [1] Giesecke F E, Mitchell A E, Spencer H C, *et al.* Engineering graphics [M]. 8th ed. New Jersey: Prentice Hall Press, 2003
- [2] Furmanski C, Azuma R, Daily M. Augmented-reality visualizations guided by cognition: perceptual heuristics for combining visible and obscured information [C] // Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002: 215
- [3] Livingston M A, Swan II J E, Gabbard J L, *et al.* Resolving multiple occluded layers in augmented reality [C] // Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 56
- [4] Krüger J, Schneider J, Westermann R. ClearView: an interactive context preserving hotspot visualization technique [J]. Transactions on Visualization and Computer Graphics. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2006, 12(5): 941-948
- [5] Bichlmeier C, Wimmer F, Heining S M, *et al.* Contextual anatomic mimesis hybrid in-situ visualization method for improving multi-sensory depth perception in medical augmented reality [C] // Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 1-10
- [6] Bruckner S, Grimm S, Kanitsar A, *et al.* Illustrative context-preserving exploration of volume data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006 12(6): 1559-1569
- [7] Kalkofen D, Mendez E, Schmalstieg D. Comprehensible visualization for augmented reality [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009 15(2): 193-204
- [8] Mendez E, Schmalstieg D. Importance masks for revealing occluded objects in augmented reality [C] // Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York: ACM Press, 2009: 247-248
- [9] Sandor C, Cunningham A, Dey A, *et al.* An augmented reality x-ray system based on visual saliency [C] // Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 27-36
- [10] Burns M, Finkelstein A. Adaptive cutaways for comprehensible rendering of polygonal scenes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): Article No. 154
- [11] Li W, Ritter L, Agrawala M, *et al.* Interactive cutaway illustrations of complex 3D models [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): Article No. 31
- [12] Birkeland Å, Viola I. View-dependent peel-away visualization for volumetric data [C] // Proceedings of the Spring Conference on Computer Graphics. New York: ACM Press, 2009: 121-128
- [13] Viegas J, Conway M J, Williams G, *et al.* 3D magic lenses [C] // Proceedings of the 9th annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York: ACM Press, 1996: 51-58
- [14] Benjamin A, Christian S, Bruce T H. Improving spatial perception for augmented reality X-Ray vision [C] // Proceedings of Conference on Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 79-82
- [15] Chen J Z, Granier X, Lin N Y, *et al.* On-line visualization of underground structures using context features [C] // Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York: ACM Press, 2010: 167-170
- [16] Mendez E, Kalkofen D, Schmalstieg D. Interactive context-driven visualization tools for augmented reality [C] // Proceedings of the 5th International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2006: 209-218
- [17] Šoltészová V, Patel D, Viola I. Chromatic shadows for improved perception [C] // Proceedings of International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM Press, 2011: 105-116
- [18] Ritschel T, Grosch T, Seidel H P. Approximating dynamic global illumination in image space [C] // Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York: ACM Press, 2009: 75-82
- [19] Judd T, Ehinger K, Durand F, *et al.* Learning to predict where humans look [C] // Proceedings of International Conference on Computer Vision. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 2106-2113
- [20] Badamchizadeh M A, Aghagholzadeh A. Comparative study of unsharp masking methods for image enhancement [C] // Proceedings of International Conference on Image and Graphics. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004: 27-30
- [21] Zhong F, Qin X Y, Chen J Z, *et al.* Confidence-based color modeling for online video segmentation [C] // Proceedings of the 9th Asian Conference on Computer Vision. New York: Springer-Verlag Press, 2009: 697-706
- [22] Zhang G F, Dong Z L, Jia J Y, *et al.* Efficient non-consecutive feature tracking for structure-from-motion [C] // Proceedings of the 11th European Conference on Computer vision. New York: Springer-Verlag Press, 2010: 422-435