

# 基于三维场景的视频融合方法

宁泽西 秦绪佳 陈佳舟

浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023

(1652754015@qq.com)



**摘要** 随着科学技术与社会发展的不断进步,城市安防监控系统也不断完善,如何充分利用海量监控视频数据已经成为一个热点问题。文中提出一种基于三维场景多路视频融合的方法,该方法将三维场景指定区域的多个视频流融合成一个完整的图像并投影至该区域,从而增强虚拟三维场景的真实性和有效性。同时针对投影纹理映射问题,文中提出了一种纹理映射算法,用于解决缺少深度信息导致的遮挡穿透问题。通过将模型顶点与纹理坐标一一对应,将视频帧当做纹理投影到三维场景模型中。实验结果表明,所提方法可实现视频与三维场景模型的有效融合。

**关键词:** 三维投影;视频融合;虚拟现实;纹理映射

**中图分类号** TP391

## Video Fusion Method Based on 3D Scene

NING Ze-xi, QIN Xu-jia and CHEN Jia-zhou

College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

**Abstract** With the continuous progress of science and technology and social development, urban security monitoring system is also constantly improved, how to make full use of the massive monitoring video data has become a hot issue. This paper proposes a method of multi-channel video fusion based on 3D scenes. In this method, multiple video streams from a specified region of a 3D scene are fused into a complete image and projected into the region, thus enhancing the authenticity and effectiveness of the virtual 3D scene. At the same time, aiming at the problem of projection texture mapping, this paper proposes a texture mapping algorithm to solve the problem of occlusion penetration caused by the lack of depth information. By establishing a one-to-one correspondence between the model vertices and the texture coordinates, video frames are projected as textures into 3D scene models. Experimental results show that the proposed method can effectively integrate video and 3D scene models.

**Keywords** 3D projection, Video fusion, Virtual-reality, Texture mapping

## 1 引言

随着数字视频技术的飞速发展<sup>[1]</sup>,大规模城市布控已经初露峥嵘,与此同时安全问题也成为社会热点问题之一。摄像头的增加与管理给大规模布控提供了有利的发展环境,监控工作人员获取的海量的视频数据可以用于实施监控报警和事后侦查。视频融合是一种将现有视频图像集成到三维虚拟场景中的技术<sup>[2]</sup>,这种将虚拟环境与真实环境集成的方式不仅减少了3D建模的工作量,而且增强了基于真实场景的视频图像的用户体验的真实性和可信度。随着视频图像的广泛应用,视频融合技术的研究和讨论引起了更多的关注。

视频融合技术的出现可以追溯到1996年,Paul Debevec等<sup>[3]</sup>提出了与视点相关的纹理混合方法。也就是说,现实的漫游效果不是从摄像机的角度来看,但其仍然存在很多困难。基于三维场景的视频融合,因其直观等特效在视频监控等相关领域有着更实际的运用。

目前关于三维场景视频融合已经有一些相关研究。美国Sarnoff公司使用纹理映射方法计算模型表面颜色,将实时视频流作为纹理投影到模型上,并提出了Video Flashlights系统<sup>[4]</sup>,这也是最早比较完善的视频融合形式。南加州大学的Hu等提出了一种基于视频图像变形(image-warping)的视频融合方法,即基于航拍影像和地面拍摄图形进行三维重建,然后使用基本纹理缓存(Base Texture Buffer)来更新建筑表面的纹理贴图<sup>[5]</sup>。Chen等实现了一个室内监控系统<sup>[6]</sup>,通过简单的室内虚拟场景虚拟模型,使用动态纹理映射技术将视频画面投影到几何表面。

本文讨论了一种三维视频融合的基本实现方法,并提出了基于三维场景的视频融合中针对平面区域以及多路视频融合优化方案,详细介绍了视频与三维场景融合处理的步骤。视频融合技术的核心即三维场景中的视频投影,以多路摄像头视频流接入、视频场景对应特征点的收集与计算作为基础,将视频图像融合到三维场景中并达到在三维场

本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61672462);浙江省自然科学基金(LY20F020025,LY18F020035)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61672462) and Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (LY20F020025,LY18F020035).

通信作者:秦绪佳 (qxj@zjut.edu.cn)

景中视频基于真实环境展示的效果。

## 2 三维视频融合方法

随着智慧城市、物联网等概念的提出,人们可以通过各种技术手段获取城市的各种信息,并对其进行归类、分析和检测。监控摄像头就是其中一个非常重要的部分。但是传统监控方式是基于一个大屏幕显示多个监控画面的形式来进行工作的,由于缺少空间位置等信息,工作人员需要在多个监控视频中查找自己所需的内容,这种方式效率十分低下且不直观。

对于三维视频监控方向,当前比较常见的方法是在三维场景中对各个城市各个地点的摄像头位置进行标记,如果监控工作人员希望调用某个地点的摄像头,则只需打开对应地区的标注。但是这种方法只是简单地将二维的监控视频与三维场景结合在一起,只是一个有着三维位置信息的“大屏幕”,并没有完全发挥出三维场景的直观性。

因此,本文提出了一种监控视频与三维场景紧密融合(即视频融合)的新思路。通过投影的方式将视频画面当成一张贴图覆盖到三维场景中,增加了视频空间位置信息,也增强了视频的空间直观性。

### 2.1 视频融合的基本框架

本文视频融合技术中的视频图像拼接,是将空间上真实场景与虚拟场景相重叠的区域经过特征点标定、空间变换,将视频图像通过屏幕后处理的方式投影到对应的位置。视频融合效果实现方法的处理框架如图1所示。

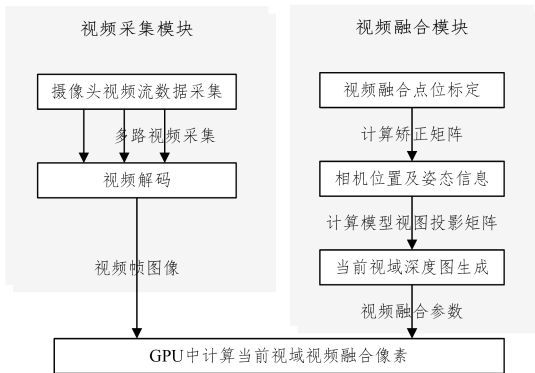


图1 视频融合效果实现处理框架

Fig. 1 Framework of the video fusion effect implementation

(1)通过多组(不低于16组时效果最佳)真实场景(即视频图像)与三维场景对应的点位标定计算视频融合矫正变换矩阵和模拟计算视频源摄像头在三维场景中的位置。

(2)利用相机位置、实际摄像头方向向量等相机位姿信息计算相机在三维空间中的模型-视图矩阵(Model-View Matrix)和投影矩阵(Projection Matrix)<sup>[7]</sup>。

(3)获取当前视域的深度图,将其用于片元着色器深度值计算。

(4)在显卡中进行片元纹理化操作<sup>[8]</sup>。用以上矩阵和深度信息将屏幕坐标转换为世界坐标,进行屏幕后处理。最终视频流图像经过光栅化操作后转换为屏幕上指定位置所见的像素。

### 2.2 视频融合实现方法及步骤

投影纹理映射是一个将一张图片中纹理空间中的纹理像素映射到屏幕空间像素的过程。其基本思路很简单,将一张纹理图片映射到一个多边形的表面,并保证这个多边形进行

矩阵变换后其表面的图片也有着正确的表现。纹理映射可以应用于点、线、面等多种图片,可以真实表现出一些材质或者特效的效果,同时在光照、阴影等许多领域发挥着不可替代的作用。因此,纹理映射在图形学的很多方面有着十分重要的角色。本文所述的视频融合,也是基于投影纹理映射思路实现的。

投影纹理映射相对于普通的纹理贴图有以下几点优势:

(1)映射中每个像素点都是与空间三维点一一对应的。程序需要将场景绘制两遍,第一遍绘制场景以获得场景信息,如深度值、颜色法向数据等,并以纹理形式分别保存,然后根据上述纹理(深度纹理等)进行二次绘制,最终输出到屏幕的结果可见融合效果。

(2)投影纹理映射相比普通屏幕投影可以避免纹理的扭曲产生。直接将一张纹理投影到两个三角面片上,虽然两个三角面片的顶点纹理坐标相同,但是可能因为两个面片的形状不同,导致三角面片内部插值计算的纹理坐标会产生差异,最终发现两个三角面片上投影的纹理出现错误。

投影纹理映射的过程主要分为如下3个步骤:

(1)模型顶点和纹理坐标建立一一对应的关系。

(2)通过GPU渲染管线的光栅化,将每个模型顶点对应的纹理坐标转化为屏幕上每个像素点对应的纹理坐标。

(3)根据每个像素对应的纹理坐标进行纹理采样,从而计算着色结果。

因此,将上述视频融合的标定过程中所获取的对应坐标点序列化,通过简单的RANSAC算法来筛选计算相应的单应矩阵<sup>[9]</sup>。这个筛选出来的单应性矩阵的最优解就是我们要计算的视频融合矫正变换矩阵 $M_c$ 。

在GPU中进行最终屏幕后处理相关的矩阵计算。从上述三维融合步骤可知,通过三维空间相机位姿信息可以计算出模型-视图矩阵 $M_{mv}$ 和投影矩阵 $M_p$ ,进行如式(1)所示的计算:

$$s = M_p \cdot M_{mv} \cdot p \quad (1)$$

其中, $p$ 为模型的表面顶点坐标, $s$ 为对应片元纹理坐标。这个过程实际上是一个三维空间坐标变换到屏幕空间坐标的计算过程。所谓屏幕后处理即在GPU中通过相机位姿信息、深度等参数,将屏幕空间坐标反算回三维空间对应的世界坐标 $\omega$ ,如式(2)所示:

$$\omega = M_{mvp}^{-1} \cdot f(s, d) \quad (2)$$

其中, $M_{mvp}^{-1}$ 是模型视图投影矩阵的逆矩阵, $s$ 为片元纹理坐标 $d$ 对应的三维空间深度。再通过计算所得的对应世界坐标和矫正变换矩阵 $M_c$ 计算出对应视频流图像的纹理坐标,根据每个像素对应的纹理坐标以及纹理采样算法计算着色结果。计算出来的纹理坐标是基于屏幕空间的,因此取值范围都为 $[0, 1]$ ,超出屏幕空间的数据都将会被裁剪掉,最终达到视频融合的效果。

图2给出了三维视频融合效果,其适用于范围较小的监控区域三维重建场景。从图2的投影结果来看,虽然一定程度上达到了我们预期的效果,但是依然存在很多优化空间。如果视点的位置和视线的位置与摄像头存在较大差异,则投影结果会有一定程度的扭曲现象。因此,在实际应用中,可以计算视点和摄像头两者的位置和方向的差异,如果超出某一确定阈值的范围,则停止投影效果的绘制。



图2 三维视频融合效果展示

Fig.2 Display of 3D video fusion effect

### 2.3 三维场景平面区域视频融合效果优化

在三维场景视频融合的过程中,用上述对应的点位标定计算的矫正变换矩阵和三维场景中的相机位姿信息对场景中一些完全平面区域进行视频融合,此时会发现视频画面畸变严重,效果很不理想。因为平面区域的遮挡关系近乎于无,且画面投影也基本上完全在一个平面上,所以为了得到更好的视频效果,我们就需要针对平面去做一个视频画面变换的优化。

因此,基于平面区域的特性可以重新设计一种计算两个平面之间的转换矩阵的方法。假设我们要计算的矩阵为  $H$ ,以及一组标定对应二维点对  $(a, b)$ ,如式(3)所示:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

二维点对  $(a, b)$  用齐次坐标表示为:

$$a = (x_1, y_1, 1)$$

$$b = (x_2, y_2, 1)$$

那么三者应存在如下关系:

$$b = Ha^T \quad (4)$$

接下来可以通过标定过程中所得的多组点位以及解线性方程组来求解我们最终的变换矩阵  $H$ ,其是一个单应性矩阵。最终达到针对平面区域的视频融合效果。

图3给出了针对平面的视频融合效果,适用于卫星地图平面模型的场景。因此,就实用性来说,三维视频融合主要对中小场景的真实环境的三维重建和视频融合后的视频相关处理有着很直观的监控作用,这也是视频融合最主要的核心应用。针对平面区域的视频融合完全可以通过摒弃大型场景3D模型的加载及优化问题,用更直观的方式,针对特定需求(如交通路况、车站、机场等高空拍摄的需求场景)并结合卫星地图面板模型进行视频融合展示<sup>[10]</sup>。



图3 针对平面的视频融合效果展示

Fig.3 Display of video fusion effect of plane

### 2.4 视频解码优化

大部分从摄像头直接获取的监控视频都是 YUV 格式,如国内比较著名的安防厂商海康威视和大华。但是 GPU 只

能对 RGB 格式的贴图进行处理,因此我们需要将 YUV 格式的图像转换成 RGB 格式的图像。YUV 与 RGB 是两种不同的颜色解码方案。YUV 中 Y 为明亮度, U 和 V 则表示色度,用于指定像素颜色,描述图片饱和度和色彩,因此只有 Y 通道的数据同样可以完整显示图像,只不过图像是黑白的。我们可以通过公式法将 YUV 格式数据转为 RGB 格式,公式如下:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.34414 & -0.71414 \\ 1 & 1.1772 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (5)$$

这是最简单也是最直接的方法,根据 YUV 与 RGB 的上述变换公式,逐像素访问图像中的每个点,即可将 YUV 图像转换成 RGB 图像。可以看出,在上述计算过程中包含大量浮点运算,我们还通过调研发现几种成熟的解决方案,并对其进行了比较:

1) 基于 OpenCV 实现,通过使用 OpenCV 自身提供的 cvCvtColor 函数来进行 YUV 到 RGB 的颜色空间转换;

2) 基于 FFmpeg 实现,通过使用 FFmpeg 中的 swscale 函数进行 YUV 到 RGB 的转换。

本文以一段 1920×1080 分辨率的视频为例,使用上述 3 种方式进行测试,结果如表 1 所列。

表1 YUV 转 RGB 方法的效率比较

Table 1 Efficiency comparison of YUV to RGB methods

Method	Times /ms
公式法	76.3298
基于 OpenCV	23.5001
基于 FFmpeg	4.6932

由此可见,FFmpeg 的转换效率是最高的。由于 YUV 转 RGB 的解码过程是一个非常复杂的操作,在大量监控视频的实际操作中,这样的复杂计算将会占用大量的 CPU 资源。

因此,如果将转码过程放在主线程中,则可能会导致程序运行卡顿。即便运行在子线程中,可以想象从获取到视频流到转换成 RGB 贴图再传入 GPU 这个过程的效率依旧不会太高。因为现代的 CPU 虽然具有多核,但是核心数量依旧不会太多,每个核心还有较大的多级缓存和数字逻辑运算单元,并且需要辅助很多加速分支判断硬件甚至更复杂的逻辑判断硬件。

相比 CPU, GPU 的核心数量更多,每个核心的缓存更小,数字逻辑运算单元也会更少且更简单。因此,使用 GPU 进行海量数据的批处理运算更加适合,我们可以将在 CPU 上的转码过程放在 GPU 上。将 YUV 视频帧直接作为一张贴图传入到 GPU 中,在 GPU 中对 YUV 格式数据进行如上述公式法的解码运算过程,获取 RGB 3 个通道的数据。让视频帧转码过程与视频融合屏幕后处理过程相融合,将大大优化视频播放的流畅度和帧率。

### 2.5 视频融合画面优化

最终视频融合效果的呈现因实际摄像头的方向或者分辨率不同,而产生不同的效果。为了最终呈现出完美的视频融合效果,无效和瑕疵部分的画面应该被剔除。可以通过系统交互的方法,让用户圈选出需要剔除的部分以生成一张与视频分辨率相同的 Mask 贴图,并将剔除部分透明化(即 RGBA 值的 A 通道置 0,其余通道置 1),并将该贴图作为纹理传入

GPU 与视频画面贴图纹理做线性混合处理。

$$c = mix(v \cdot m) \quad (6)$$

其中,  $c$  为片元着色器最终显示的 RGBA 值,  $v$  为视频画面纹理 RGBA 值,  $m$  为 Mask 贴图纹理 RGBA 值,  $mix$  为线性混合函数。最终生成只保留有效画区域的视频画面剪裁的融合效果<sup>[11]</sup>。

这种视频画面剪裁方式可以根据用户实际需求自定义生成, 因此自由度很高, 并且对于平面区域的视频融合(下文简称平面视频融合)的效果提升有着实际意义。

图 4 给出了 Mask 前的效果, 可以看到监控视频中的远景部分会有很大程度的扭曲形变。图 5 给出了 Mask 后的效果, 视频远景部分相对于监控作用来说属于无效部分, 可以合理的通过 Mask 剔除。



图 4 Mask 前视频融合效果图

Fig. 4 Video fusion effect picture before mask



图 5 Mask 后视频融合效果图

Fig. 5 Video fusion effect picture after mask

## 2.6 多路视频融合优化

在实际运用中, 一个三维场景可能是一个小区、一座城市, 在这样的场景中通常会接入很多摄像头。一次性将所有的监控视频融合全部绘制到三维场景中, 显然是不理想的, 因此针对多路视频融合的优化方案也是必不可少的。

视域剔除对于多路视频融合来说是一种简单且高效的方法。在三维场景的交互中, 使用者并不会总是需要全局观察场景, 更多的时候是在局部观察视频融合。那么, 将不在视域范围内的场景剔除的同时, 将该区域覆盖下的摄像头停止视频解码和视频投影, 会极大地降低带宽和 CPU 的压力。

我们可以通过逐像素遍历的方法, 精确地统计出投影占屏幕像素的数量。遍历屏幕空间的每个像素点, 并通过判断这个像素点是否是当前要显示的投影内容来进行视域剔除。若要做到这一步, 我们首先需要考虑的是如何将当前视点的屏幕空间的像素点转换到投影的屏幕空间中。

$$v_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_2 T_1^{-1} v_0 \quad (7)$$

如式(7)所示,  $v_0$  为当前屏幕空间像素点的纹理坐标及

对应的深度值, 即  $v_0(s, t, depth)$ 。当前视点的 MVP 矩阵为  $T_1$ , 令  $v_0$  乘以  $T_1$  逆矩阵可计算出该像素对应的三维点坐标  $v$ 。再令像素对应三维坐标  $v$  乘以投影空间 MVP 矩阵  $T_2$  可计算出三维点在屏幕空间中的位置  $v_1$ 。最后对  $v_1$  进行归一化计算, 并判断其是否超出屏幕空间, 如果是则需要剔除。最终可以在一个绘制批次内, 在 GPU 中进行上述计算, 并将所有视频画面全部投影到三维场景中。

虽然视域剔除对于多路视频融合是一个效果较好的优化方案, 但是对于火车站、机场等局部区域仍然存在大量摄像头的情况, 其仍然还有进一步优化的空间, 如我们还可以根据视点位置、视线方向来动态调整视频分辨率后, 再将画面进行融合等。

## 3 视频融合在大范围三维场景中的实现

大规模 3D 空间信息实时可视化的关键除了视频融合效果之外, 还减弱了场景复杂度对渲染速度和逼真度的影响。这也是特定场景简化三维视频融合的过程并采用平面视频融合的主要原因之一。

采用基于外存(out-of-core)绘制、层次多分辨率模型表现和遮挡剔除相结合的算法可以极大地提高绘制效率, 并且能够在提供简化模型的同时保持较好的视域剔除与遮挡剔除效率<sup>[12]</sup>。同时也为其他需要三维空间关系处理的行为(例如碰撞检测等)提供更好的优化。

三维视频融合到平面视频融合, 场景模型同样从三维到平面, 最终以卫星地图的形式展示在三维场景中。为了加速可视化过程, 采用基于视觉误差的 LOD(Levels of Detail)<sup>[13]</sup> 生成和控制方法, 在误差允许的范围内通过绘制该简易网格来代替绘制精细地图。

图 6 为某市整座城市卫星地图模型俯视图, 纹理分辨率较小, 局部细节并不突出。图 7 为该市局部卫星地图模型俯视图, 经过处理后细节较为清晰。



图 6 整座城市卫星地图模型俯视图

Fig. 6 Top view of whole city satellite map model



图 7 局部城市卫星地图模型俯视图

Fig. 7 Top view of partial city satellite map model

**结束语** 本文设计并实现了一种基于三维场景的视频融合方法, 实现了将视频图像数据与包含地理信息的三维模型的融合, 这是一种更直观、更自由的视频整合方式<sup>[14]</sup>, 但是随

着视频技术、图形图像技术以及硬件水平的不断发展将会有更多更优秀的解决方案被提出。同时该方法依然存在着很多不足和待优化的地方,如视频融合画面的无缝拼接、视频融合画面分辨率自适应等。这也是我们接下来需要讨论和研究的方向。

### 参 考 文 献

- [1] TAN G T. Research on Application of Face Detection System Based on Video Image[J]. Digital Technology and Application, 2013(2):89-89.
- [2] ZHOU Z H, MENG M, ZHOU Y. Massive Video Integrated Mixed Reality Technology[J]. ZTE Communications Technology, 2017, 23(6):6-9, 36.
- [3] DEBEVEC P E, TAYLOR C J, MALIK J. Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry-and-Image-Based Approach [C] // Proceedings of the Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. USA: ACM, 1996:11-20.
- [4] SAWHNEY H S, ARPA A, KUMAR R, et al. Video flashlights: real time rendering of multiple videos for immersive model visualization [C] // Eurographics Workshop on Rendering. Switzerland. ACM Press, 2002:157-168.
- [5] HU J H. Doctor Degree Dissertation: Intergrating Complementary Information For Photorealistic Representation[D]. Los Angeles: University of Southern California, 2009.
- [6] CHEN S L, CHANG S K, SUN K M, et al. Development of a Multisensor Embedded Intelligent Home Environment Monitoring System Based on Digital Signal Processor and Wi-Fi[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 171365:1-11.
- [7] ZHOU Y, MENG M, WU W, et al. Virtual-reality Video Fusion System Based on Video Model[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7):2550-2557.
- [8] NIE D K, L W M, ZH J N. Fusion Implementation of Video Mosaic in Three-dimensional Space[J]. Computer Programming Skills and Maintenance, 2017(12):78-79, 87.
- [9] YU Y H, TAN C H, ZHOU Z H, et al. Real-time Video Web-GIS with Virtual-reality Fusion[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7):2568-2575.
- [10] MA Y Y, ZHAO G, HE B. Design and Implementation of a Fused System with 3D GIS and Multiple-Videos[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(6):109-112, 117.
- [11] ABRAMS A, FRIDRICH N, JACOBS N. Participatory integration of live webcams into GIS [C] // Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Computing for Geospatial Research & Application. ACM, 2010:1-8.
- [12] LV Z, LI X, ZHANG B, et al. Managing Big City Information Based on WebVRGIS[J]. IEEE Access, 2016, 4(1):407-415.
- [13] CHEN S C, LEE C Y, LIN C W, et al. 2D and 3D Visualization with Dual-Resolution for Surveillance[C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. USA: IEEE, 2012:23-30.
- [14] HANSEN C, WIEFERICH J, RITTER F, et al. Illustrative Visualization of 3D Planning Models for Augmented Reality in Liver Surgery[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2010, 5(2):133-141.
- [10] XIE X, FENG J. Volumetric shape contexts for mesh co-segmentation[J]. Computer Aided Geometric Design, 2016, 43:159-171.
- [11] SHU Z, QI C, XIN S, et al. Unsupervised 3D shape segmentation and co-segmentation via deep learning[J]. Computer Aided Geometric Design, 2016, 43(C):39-52.
- [12] ZHENG Y, TAI C L, AU O K C. Dot scissor: a single-click interface for mesh segmentation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(8):1304-1312.
- [13] ZHENG Y, TAI C L. Mesh Decomposition with Cross-Boundary Brushes[C] // Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd. 2010, 29(2):527-535.
- [14] FAN L B, LIU L G, LIU K. Paint Mesh Cutting[J]. Comput Graph Forum, 2011, 30(2):603-612.
- [15] KALOGERAKIS E, HERTZMANN A, SINGH K. Learning 3D mesh segmentation and labeling [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2010, 29(4):102:1-102:12.
- [16] MARRAS S, BRONSTEIN M M, KAI H, et al. Motion-based mesh segmentation using augmented silhouettes[J]. Graphical Models, 2012, 74(4):164-172.
- [17] KAICK O V, FISH N, KLEIMAN Y, et al. Shape Segmentation by Approximate Convexity Analysis[J]. Acm Transactions on Graphics, 2014, 34(1):1-11.
- [18] CHEN X, GOLOVINSKIY A, FUNKHOUSER T A. A Benchmark for 3D Mesh Segmentation [J]. Acm Transactions on Graphics, 2009, 28(3):341-352.



**NING Ze-xi**, born in 1995, M. S. candidate. His main research interests include computer graphics and so on.



**QIN Xu-jia**, born in 1968, Ph.D, professor, Ph. D candidate supervisor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include computer graphics, image processing and data visualization.



**ZHENG Lei**, born in 1976, senior engineer. His main research interests include system planning and design, technology all media TV station design and integration of broadcasting technology and information.



**WU Jun-wei**, born in 1995, is a member of China Computer Federation. His main research interests include computer graphics and geometric processing.

(上接第 275 页)