

8-7-2020

Chinese Shadow Play Simulation Based on Volume Visualization

Shenghua Wang

1. School of Public Administration and Communication, Beijing Information Science Technology University, Beijing 100192, China;;

Tan Jian

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100194, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Chinese Shadow Play Simulation Based on Volume Visualization

Abstract

Abstract: Protection and preservation of the scene of shadow play is an urgent mission for the Chinese shadow play sustainable development. So far the visual effect is inadequate since shadow plays are always considered as two-dimensional images moving on visualization purpose, which drags down reproduction of the scene. *Therefore, intact and lifelike reproduction of 3-D visual information of shadow play is the only task in the study. After an analysis of vision generation process of shadow play, a theoretical model was proposed including screen, puppets and light source, and a corresponding GPU volume rendering method for the play visualization was developed. The improvement in visual fidelity of the simulation model was certified by means of Delphi, in which ten more experts and experienced audiences were invited.* This study will contribute to China's cultural relics protection and shadow play reproduction, improve viewing experience of audiences and promote dissemination of the Chinese shadow play as intangible cultural heritage.

Keywords

Chinese shadow play, protection and simulation, volume visualization, GPU rendering

Recommended Citation

Wang Shenghua, Tan Jian. Chinese Shadow Play Simulation Based on Volume Visualization[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2126-2134.

中国皮影体可视化仿真方法研究

王圣华¹, 谭剑²

(1. 北京信息科技大学, 北京 100192; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘要:保护和保存皮影模型是中国的皮影戏可持续发展的紧迫任务。之前的中国皮影可视化研究中将皮影视为 2 维图像, 可视化效果差, 对皮影演出场景信息的保存和再现研究不足。以完整保存和逼真再现皮影可视化信息为目标, 以体可视化为主线, 分析了可视化流程及元素, 建立了理论模型、皮影文物信息的可视化数据模型。并且开发了对应的专用 GPU 渲染方法, 通过专家打分法对模型仿真程度进行了检验。有助于中国皮影的文物性保护与场景再现, 提高观赏的沉浸感, 促进皮影非物质文化遗产的传承和传播。

关键词: 中国皮影; 逼真; 体可视化; GPU 渲染方法

中图分类号: G2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 09-2126-09

Chinese Shadow Play Simulation Based on Volume Visualization

Wang Shenghua¹, Tan Jian²

(1. School of Public Administration and Communication, Beijing Information Science Technology University, Beijing 100192, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100194, China)

Abstract: Protection and preservation of the scene of shadow play is an urgent mission for the Chinese shadow play sustainable development. So far the visual effect is inadequate since shadow plays are always considered as two-dimensional images moving on visualization purpose, which drags down reproduction of the scene. Therefore, intact and lifelike reproduction of 3-D visual information of shadow play is the only task in the study. After an analysis of vision generation process of shadow play, a theoretical model was proposed including screen, puppets and light source, and a corresponding GPU volume rendering method for the play visualization was developed. The improvement in visual fidelity of the simulation model was certified by means of Delphi, in which ten more experts and experienced audiences were invited. This study will contribute to China's cultural relics protection and shadow play reproduction, improve viewing experience of audiences and promote dissemination of the Chinese shadow play as intangible cultural heritage.

Keywords: Chinese shadow play; protection and simulation; volume visualization; GPU rendering

引言

保护和保存皮影模型是中国的皮影戏可持续发

展的紧迫任务。在这方面虚拟仿真可以成为一个基本工具。实际上, 在过去的 10 年间, 国内外已经有很多相关研究开展, 比如马来西亚和泰国皮影的数字化仿真, 建立了基本的皮影二维和三维可视化系统框架, 我国学者对皮影动画特点也进行了分析和仿真, 取得了较好的皮影动作模拟和显示效果。

但是在皮影的可视化研究中存在显著的不足,



收稿日期: 2014-09-01 修回日期: 2015-02-14;
基金项目: 国家自然科学基金项目(41201400); 北京社会科学基金项目(14ZHC018); 北京教委社科计划面上基金(SM201511232005);
作者简介: 王圣华(1984-), 女, 山东, 博士, 讲师, 研究方向为非物质文化遗产数字保护、皮影动画; 谭剑(1980-), 男, 湖北, 博士, 副研究员, 研究方向为文化遗产数字化、三维仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2126 •

皮影的体积信息和 z 方向(屏幕面为 xy 平面)移动导致的视觉模糊效果一直没能得到很好地表达。原因在于, 在以往研究中, 皮影和舞台均被视为 2 维对象, 其相应的数字化建模大多采用图片, 可视化边缘清晰。但是, 实际中, 中国皮影大多采用具有厚度的驴皮制成, 不同地区皮影的厚度, 颜色和透光度均不相同^[1], 而且, 由于人工操作的不稳定性, 皮影并非紧贴幕布, 导致影人的边缘或运动部件模糊, 加上传统皮影采用油灯等带色灯光照明, 反而形成了中国皮影的朦胧美感。而现有可视化方法的显著缺陷导致已有的建模方法不能完整地保存中国皮影的视觉特征, 难以达到文物再现的目的。

因此, 在本文的研究中, 我们针对皮影逼真可视化当中边缘模糊、皮影质感等仿真难题, 试图基于体可视化技术建立逼真的皮影可视化方法体系, 包括理论算法、数据模型、采样方法和渲染算法, 在仿真技术层面, 精确地再现皮影演出样式。这一研究将实现皮影文化遗产的逼真可视化渲染, 并且为中国皮影保护提供基础保存和再现工具。

1 研究现状

最近 10 年来, 已经开展了很多皮影戏仿真工作。这些仿真可以分为 2 个阶段: 皮影动作仿真和可视化效果仿真。在本文中, 我们重点分析皮影的可视化研究方面。Zhu 基于图像处理的思路, 采用皮影图片和光线跟踪算法提出了一套中国皮影的模拟方法, 最终有效地生产出带有阴影的高分辨率皮影数码照片^[2]。Kim 提出了一个基于 OPENGL 的仿真系统框架, 在静态皮影建模方面, 仍然使用基于 2D 图像的 shadowmap 方法来模拟马来西亚传统皮影戏^[3]。Talib 进一步扩展了基于 2D 图像的马来西亚皮影仿真, 结合 Adobe Flash 软件的功能, 实现了一些特殊效果, 如光源照明方式配置和模糊效果^[4]。单超杰采用传统实体 3-D 建模方法对静态中国皮影建立模型, 其中皮影的每一个空洞都被仔细地塌陷为三角形网格, 以提供更多的几何艺术细

节, 但是美中不足的时, 纹理映射非常复杂, 而且分辨率受制于三角形网格密度^[5]。Lam 等将马来西亚皮影木偶分解为部件图片, 通过不同部位的矩形框实现纹理映射和混合, 并且利用 OpenGL 的积累缓冲区对阴影进行 blurring, 在三维环境中实时生产逼真的皮影动画^[6]。而在其以后的论文中提供了程序方面的实施细节^[7]。

皮影戏可视化研究的类别和进展主要表现为 3 个阶段:

1) 二维图片阶段, 即将皮影戏作为二维平面, 在此基础上采用图片表达皮影, 结合 GIF 和 FLASH 等技术表示动态的皮影戏。

2) 三维场景阶段, 即将皮影戏考虑为三维场景, 在此基础上利用光源位置、二维图片表达的皮影模型来表示动态的皮影戏。

3) 可视化效果仿真阶段, 即采用技术方法对皮影戏演出时特殊的可视化效果进行仿真和模拟, 比如皮影边缘的模糊效果。

皮影的材质、光源特征、幕布信息对于中国皮影戏的可视化效果都至关重要, 它们的差异也是皮影戏风格化、区域化的物质基础。但是, 至今为止, 无论从数据模型的设计到可视化渲染, 在以往的研究中都没有综合考虑这些因素, 所以中国皮影戏仿真的可视化效果存在改进的可能与必要, 这就是本研究开展的起因。

2 皮影可视化特征分析

皮影是光与影的艺术。“银灯映照千员将, 一箱容下百万兵”, 演员只要在屏幕和灯光之间抖动皮影, 皮影人物及道具在后背光照耀下投影到布幕上的影子显得瑰丽而晶莹剔透。

从可视化角度, 皮影的演出效果完美地利用了光线、皮影形体、色彩和幕布。如图 1 所示, 舞台具有明显的中心区和边界区、过渡区, 人物在明亮的光线下能清晰地展示形状和色彩, 在暗淡的光线下又能表达出阴影和层次感。



图 1 真实皮影舞台效果和人影细节

这种虚实结合的可视化效果是中国皮影戏的重要特征,在动态表演中很容易表达出皮影形象的灵气和场景的纵深,是皮影戏艺术特性的主要表达方法。而传统的仿真建模方法对此没有较好地呈现。

根据光线的发射路径,可以判定,皮影戏的可视化特征由 3 大元素构成:光源、皮影模型、幕布。我们将依次分析它们的特点和对皮影可视化效果的贡献。

1) 皮影戏的光源:

光源是光线的来源,也是可视化能量的提供者。在传统皮影中,光源一般是油灯。油灯的光强低,颜色发黄,而且光线不稳定,对皮影色彩的表达不利(如图 1)。所以现在皮影艺人多采用白炽灯。

皮影戏的光源都是点光源。这是与皮影的演出技法密切相关的,中国皮影少则一人操控,多则二三人。一个人所操作的皮影很多,需要根据演出的需要和节奏进行调换,动作少或动作完成的皮影都需要放在幕布的边缘区和过渡区,突出主角和动作,同时也降低操控的难度。如果采用荧光灯管等线状光源,则幕布的边缘区和过渡区消失,既分散了观众的注意力,又增加了操控的难度。

2) 皮影戏的模型:

实际上,通常被视为 2 维图像的皮影是 3 维的。制作皮影的材料是硬纸或兽皮。这些材质在厚度、透光度等方面的特点是不同的。准确地说,材质不但决定了皮影的工艺水平,也决定了皮影动画和可视化的特征。“比较厚的用来做‘武士’,较薄的用来做‘文人’^[1]。”不同皮质所需要的光源能量和支持

的皮影大小、动作幅度也有差异,是决定中国皮影地区分异的主要特征之一。

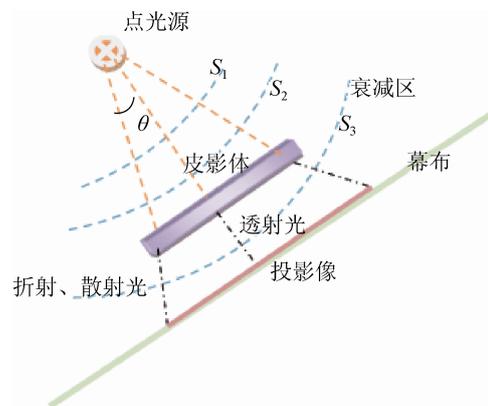


图 2 皮影戏的光路流程

3) 皮影戏的幕布:

皮影戏的幕布通常是白色的纱布或棉布,也有用白纸、油纸制作的。白色的幕布不会影响皮影模型原色的表现。孔多的纱布和油纸可以透出光线,使得皮影在不太强的光源照射下也可以进行表演。

根据皮影戏的演出设置,皮影戏可视化效果的光路过程分为 3 个阶段:

- A. 光源发出光线
- B. 光线穿过皮影模型(体)
- C. 光线穿过幕布

在此过程中,由于皮质、空气、幕布的吸收,光的亮度(光通量)减小,另一方面,光的颜色与皮影颜色、幕布颜色混合发生变化,第三,由于折射和散射,皮影在幕布上会出现不同程度的模糊。

如图 2,如果以 Y 作为最终幕布上某点的可视化效果集合(颜色 C , 亮度 L),那么:

$$Y_{\text{光学特征}} = F(\alpha, \beta, \chi) \quad (1)$$

其中: α 是光源; β 是皮影体; χ 是幕布; Y 是它们光学特性的集成表达。根据光路过程, 更进一步地, Y 处的亮度 L_Y 可以表达为:

$$L_Y = L(s, \theta) = \rho \cdot$$

$$\left(\sigma \cdot \left(L_0 \cdot e^{-\omega_{exc}s} + \frac{1}{\omega_{exc}} \cdot L_0 \cdot \omega_{sc}(\theta) \cdot (1 - e^{-\omega_{exc}s}) \right) \right) \quad (2)$$

其中: s 是 Y 处到点光源的距离; 光线夹角 θ 是 Y 处与 (幕布-点光源) 垂线夹角; ρ 是幕布的透光系数; σ 是皮影体的透光系数; L_0 是原始光源亮度; ω_{exc} 是光源衰减系数; ω_{sc} 是皮影体散射系数。 Y 处的颜色 C_Y 可以表达为:

$$C_Y = C_R \cdot \sigma \cdot \rho \cdot \left(C_0 \cdot C_M + \sum_n C_{mm} \cdot w_{mm} \right) \quad (3)$$

$$w_{mm} = \frac{e^{-\omega_{exc}s}}{\omega_{exc}} \cdot \omega_{sc}(\psi) \cdot (1 - e^{-\omega_{exc}s}) \quad (4)$$

其中: C_R 是幕布颜色; C_0 是光源颜色; C_M 是皮影体上光线穿越点(光线夹角 θ) 的颜色; C_{mm} 是皮影体上其他光线穿越点(光线夹角 ψ) 的颜色; w_{mm} 是皮影体上其他光线穿越点颜色的权重。

这样, 我们建立了皮影戏光源、皮影模型和幕布的统一可视化综合模型。后文将阐述这一模型的实施细节。

3 体可视化仿真方法

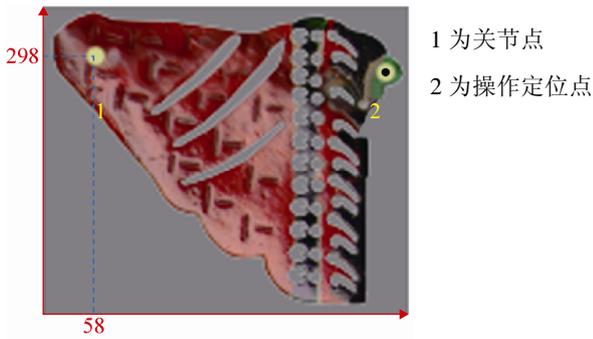
3.1 数据模型建立

根据上文提出的可视化计算模型, 基于面向对象的方法建立了对应的皮影戏数据模型。逼真可视化需要的皮影数据模型包括以下几种对象(表 1)。

表 1 面向可视化的中国皮影数据模型

类型	包含对象	属性	描述	校验
演出场景	[1].皮影人偶 [2].光源 [3].幕布	[1].原点 [2].三维坐标轴 [3].光线衰减系数	皮影戏的演出环境是一个三维场景	包含不少于 1 个光源 包含唯一 1 块幕布 包含不少于 1 个皮影人偶
光源		[1].坐标位置 [2].光强 [3].光颜色	油灯、白炽灯的三维模型,光源类型为 OPENGL 中的点光源 ^[5]	
幕布		[1].幕布中心点 [2].法向 [3].幕布宽高 [4].透光系数 [5].幕布颜色	皮影戏的“亮子”, 影子最终呈现的地方	
皮影人偶	[1].部件 [2].关节 [3].操作点	[1].文化属性: 皮影类型... [2].文物属性: 年代、制作人... [3].管理属性: 数字化者、数字化时间...	一个皮影人偶的唯一节点	1 个皮影人偶必然至少 1 个部件、3 个操作点 (作为背景的 1 个皮影物体必然有至少 1 个操作点)
部件	[1].正射图片 [2].皮质信息 [3].关节定位点 [4].操作点	部件类型: [1].头 [2].前臂 [3].上臂 [4].道具[5].身躯 [6] 大腿 [7].小腿	一个皮影人偶的基本配件	1 个部件至少有 1 个关节定位点
关节	关节定位点	关联部件: [1].关节上部件 [2].关节下部件	皮影人偶配件组装的部位	1 个关节必然有 2 个关节定位点(定位点顺序表示叠加关系, 前者叠在后者上)
操作点		图片坐标	皮影动画的受力部位	1 个部件上至多有 1 个操作点
关节定位点		图片坐标	皮影部件链接和活动的轴心	
皮质		[1].皮质种类 [2].厚度 [3].透明度 [4].颜色	皮影部件的基础材料, 对光线有透射、折射、吸收和散射效果	

文中详细讨论了皮影模型的骨骼定义和自由度范围^[8]。本研究借鉴了其骨骼定义和部件结构，同时为了简化可视化计算操作，提高数据存储效率，并不显式存储骨骼，而是通过像素坐标下的关键定位点进行骨骼的表达和动作的计算。如图 3 所示。



(a) 图片坐标的定义就是部件图片中的局部像素坐标



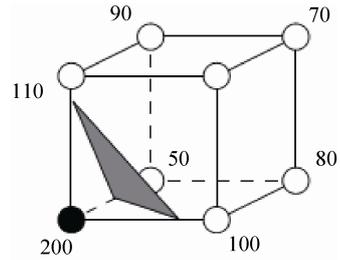
(b) 皮影组装所需的其他定位信息

图 3 皮影部件的定位与组装

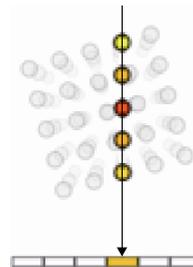
为了准确测量和记录皮影体的可视化光学参数，综合采用了扫描仪、测透明度的白度仪、侧颜色的色度仪、测厚度的螺旋测微仪对皮影模型进行了光学系数定量测量。

3.2 皮影体的光线插值

相比光路在空气中的指数衰减和穿过幕布的线性衰减。光路在皮影体内部的传输具有明显的不规则性。随着皮影的动作和相对光源的角度变化，光线穿过皮影体的厚度和进出位置并不相同，如图 4(b)图。



(a) 光线法向平面插值方法^[9-10]



(b) 根据光线通过体材质的路径采样并集成到幕布平面的过程

图 4 体可视化光路及计算方法

为了准确表达皮影体的透视效果，有必要根据光线方向对皮影体数据进行采样插值，获得近似的内部顶点颜色值。这种方法也是体积光线投射(Volume ray casting)中常用的体渲染计算方法^[9]。

在常规体数据采样插值中，我们对内部色彩无法预判的实体通常采用光线法向平面的插值方法，如图 4(a)图。虽然这种根据几何距离进行色彩混合的方法比较简单，但是并不符合皮影体的实际情况。

皮影雕刻方式上包含阴刻和阳刻 2 种。它的绘画色彩上主要使用红、黄、青、绿、黑等 5 种纯色。而且使用单面上色，如图 5，这样不但提高上色效率，而且也可以避免双面上色的透射色彩混合现象，有助于皮影色彩边界的清晰化^[1,11]。



图 5 皮影体的雕刻与绘制

所以, 可以认为皮影体内部采样顶点的颜色就是光线入射点的颜色。光路长度影响的仅仅是光线的亮度。这样, 我们可以将色彩采样公式中的 σ (皮影体的透光系数) 修正为皮影表面 m 点的函数:

$$\sigma_M = \frac{d_m \cdot \mu}{k} \quad (5)$$

其中: μ 是皮影体测量的平均透光系数; k 是皮影体平均厚度; d_m 是皮影体中实际透射光路长度。

3.3 基于GPU的渲染算法

体积光和体数据采样是一个计算量随着体数据规模几何级数增加的运算。尽管根据皮影制作的工艺流程, 可以将皮质内部视为均一单元, 降低了色彩采样的计算量。但是对于高精度皮影数据, 循环次数仍然很高, 效率低。

体数据渲染是显示层面的体数据计算, 也具有非常高的计算密度。为了提高体数据采样效率, 实现可实时交互的体数据可视化, 已经有很多的研究者提出了渲染加速算法。有基于 GPU 运算的^[10,12-13], 有利用多核 CPU 并行运算的^[14-15]。

在本文的研究中, 为了实现快速逼真的皮影效果, 参考其他研究者基于 GPU 的光线投射加速算法^[16]实现皮影的实时渲染。这种方法结合了体数据采样和渲染两部分工作。基本思路是将体数据切片作为纹理载入显存, 通过 Vertex Shader 进行几何采样, 通过 Fragment Shader 进行纹理颜色计算和渲染。下面是 Fragment Shader 中关键的皮影体内部采样函数。

```
[1]. float4 main(float2 texCoord : TEXCOORD0) : COLOR0
[2]. {
[3]. // 计算皮影着色面到点光源的光线向量
[4]. half2 deltaTexCoord = (texCoord - ScreenLightPos.xy);
[5]. // 求得实际的光路长度
[6]. deltaTexCoord *= 1.0f / NUM_SAMPLES * Density;
```

```
[7]. // 获得入射点的皮影颜色
[8]. half3 color = tex2D(frameSampler, texCoord);
[9]. // 初始化光线衰减单位系数
[10]. half illuminationDecay = u/k;
[11]. // 进行采样迭代
[12]. for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++)
[13]. {
[14]. // 光线在光路上步进
[15]. texCoord -= deltaTexCoord;
[16]. // 获得采样颜色, 均匀皮影体中此颜色不变, 可以根据条件替换为重叠的皮影体(关节处或道具接入点)的颜色
[17]. half3 sample = tex2D(frameSampler, texCoord);
[18]. // 亮度衰减
[19]. sample *= illuminationDecay * Weight;
[20]. // 颜色叠加
[21]. color += sample;
[22]. // 亮度叠加
[23]. illuminationDecay *= Decay;
[24]. }
[25]. // 与入射光颜色混合
[26]. return float4( color * Exposure, 1);
[27].}
```

4 结果与讨论

本研究的目的是建立更完善的皮影数据模型并实现逼真的数字皮影可视化。根据上文中分析的皮影戏可视化流程、理论方程, 以及建立的皮影可视化数据模型和渲染方法, 结合其他研究中皮影骨骼的提取^[17]、场景的设置方法^[5], 我们对西游记皮影中的唐僧(陕西美术馆提供)进行了测试。基本的建模软件环境是 OpenSceneGraph 3.0, 开发工具是 Visual Studio 2010, 硬件环境为 I7 处理器, 8G 内存、Gforce 650Ti 显卡。基本场景如

图 6 所示, 设置了基本的背景布(白色)、光源(黄色)和皮影体模型。在皮影的动态演示方面, 虽然没有对真实的皮影表演动作建模, 但是我们导入了 BIP 格式的行走动作, 并与皮影模型的二维骨骼进行了绑定, 满足了三维皮影体渲染的基本动态要求。

本研究算法的局限性在于参数众多, 测定和计算复杂。一方面皮影的材质需要专业设备进行测量, 耗时长, 受设备精度限制多, 另一方面在仿真计算效率上与其他皮影戏可视化方法相比没有优势。比如单帧输出平均时间为二维皮影仿真的 10 倍, 光强线性衰减计算的 3 倍(虽然测试中也

能提供 35 帧/秒以上的渲染速度, 满足正常观看的标准)。

但是本研究结果如图 7, 重在逼真, 可以很好地表达皮质、幕布的透光效果, 反映光源的颜色属性和散射衰减特征。

为验证本研究的成果, 衡量定性的逼真程度, 我们提供了基于二维图像皮影建模^[18]和增加了光强线性衰减^[19]的两个对照渲染结果, 如图 8。并且设计了如下的调查问卷。主要考察皮影仿真场景的逼真程度, 演示的皮影循环动作片段是唐僧走路。

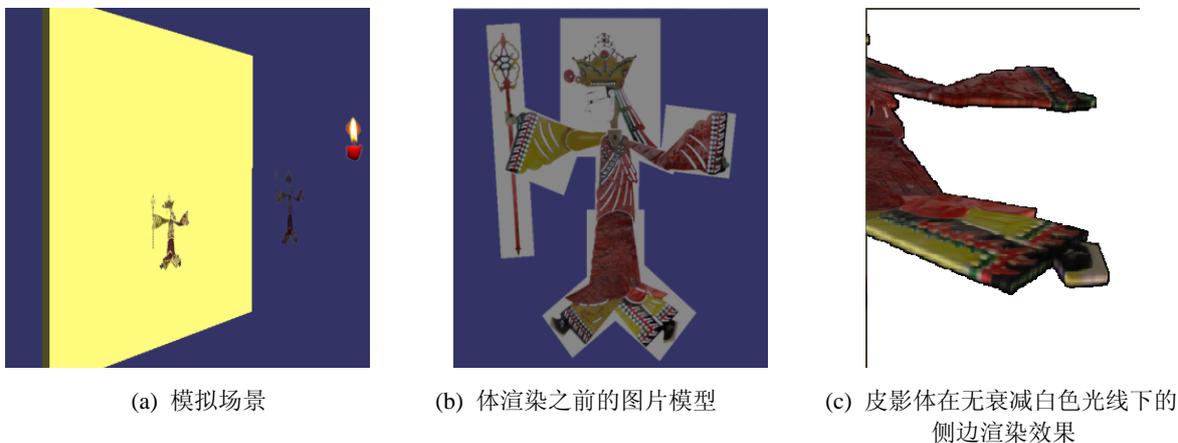
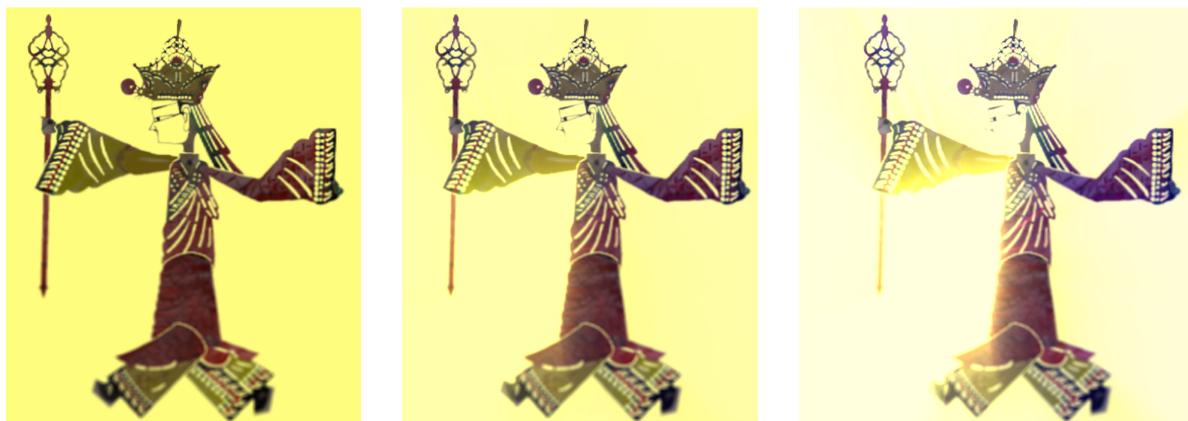
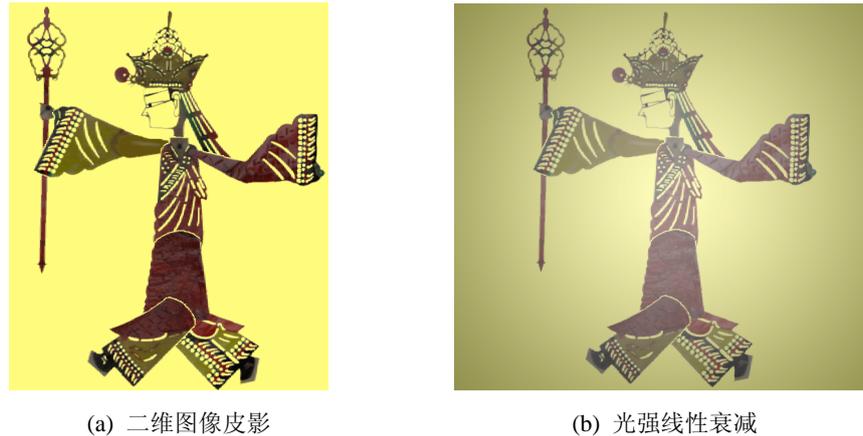


图 6 皮影戏可视化场景和基础体渲染模型



(a) 下半身在 z 方向上偏移产生模糊效果 (b) 轻度光强的体积光渲染 (c) 中度光强的体积光渲染

图 7 本研究产生的皮影体渲染效果



(a) 二维图像皮影

(b) 光强线性衰减

图 8 本研究的对照组渲染效果

表 2 专家打分法的调查表格

调查指标	皮影边缘	光源颜色	幕布明暗	动态光影
评价分数				
说明	与您所了解或演出过的皮影效果相比, 5分: 完全吻合; 4分: 比较吻合; 3分: 一般吻合; 2分: 相似度低; 1分: 完全不像			

请陕西美术馆从事皮影表演和雕刻的 8 位专家(年龄最小 39 岁, 最大 65 岁, 从事皮影表演、制作和研究工作至少 10 年)和北京信息科技大学新媒体系有过多次皮影观看经历的 6 位大学生(主要来自山西、河北、山东中国北方地区, 有 3 次以上的地方皮影表演观看经历)进行了评判和填写, 如表 2, 最终的打分结果如图 9。

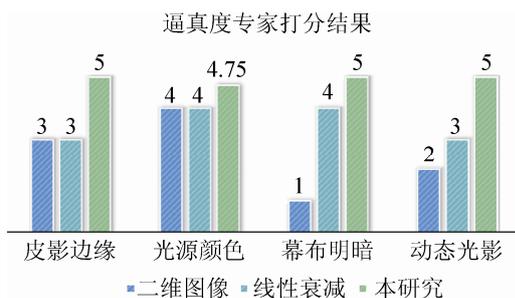


图 9 专家打分算术平均值结果

如图 9, 可见本研究系统性对皮影戏可视化效果的建模与计算取得了较好的成果, 获得了专家对逼真程度的一致性肯定, 优于以往研究。

5 结论

从文物保存和研究的角, 尽可能多, 尽可

能逼真地保留原文物的信息是虚拟仿真的首要任务。本研究针对皮影戏可视化成果中逼真度的不足, 以皮影可视化效果成因为主线, 分析建立了完整表达皮影可视化信息的数据模型和关键算法, 并且开发了对应的 GPU 渲染方法, 最后通过专家打分法对模型进行了逼真度检验, 证实取得较好的改进, 实现了逼真的中国皮影戏可视化表达。

本研究的可视化理论模型、基础数据模型和计算方法兼容各类皮影戏, 包括其演出场景、皮影模型的数据导入。将有助于中国皮影的文物性保护再现和可视化特征比较研究, 促进我国皮影非物质文化遗产的传承和传播。

6 致谢

本研究的调研得到了北京皮影剧团团长路宝刚、中国艺术研究院非物质文化遗产中心孔德平副研究员的大力协助, 体渲染数值算法方面得到了比萨大学(意大利科学院虚拟计算实验室)Marco Callieri 的热心指导, 皮影模型建立方面得到了中国科学院数字地球实验室郝俊生的帮助。在此一并感谢。

参考文献:

- [1] 魏力群. 中国皮影艺术史 [M]. 北京: 文物出版社, 2007.
- [2] Zhu Y, Li C, Shen I F, *et al.* A new form of traditional art: visual simulation of Chinese shadow play [C]// ACM, 2003. USA: ACM, 2003.
- [3] Kim J C M, Talib A Z. A framework for virtual storytelling using the traditional shadow play [C]// IEEE, 2006. USA: IEEE, 2006.
- [4] Talib A Z, Osman M A, Tan K L, *et al.* Design and Development of an Interactive Virtual Shadow Puppet Play [M]. USA: Arts and Technology, Springer, 2012: 118-126.
- [5] 单超杰. 皮影人物造型与三维建模技术结合的创新研究 [D]. 沈阳: 东华大学, 2013.
- [6] Lam T K, Talib A Z. Shadow image and special effects implementation techniques for virtual shadow puppet play [J]. *Methods*(S1046-2023), 2010, 10(12): 80-85.
- [7] Lam T K, Talib A Z B H, Osman A M A. Real-Time Visual Simulation and Interactive Animation of Shadow Play Puppets Using OpenGL [J]. *International Journal of Computer and Information Engineering*(S1307-6884), 2010, 1(4): 212-215.
- [8] 列夫, 蔡建平. 数字皮影戏骨骼动画技术的研究与应用 [J]. *计算机工程与设计*, 2013, 34(1): 241-246.
- [9] Kaufman A, Mueller K. Overview of volume rendering [K]// *The visualization handbook*. New York: Marcel Dekker Inc, 2005: 127-174.
- [10] Lv Z, Tek A, Da Silva F, *et al.* Game On, Science-How Video Game Technology May Help Biologists Tackle Visualization Challenges [J]. *PloS one*(S1932-6203), 2013, 8(3): 57-99.
- [11] 韦凯, 张星, 贾涛. 华县皮影雕刻艺术造型研究 [J]. *美术大观*, 2008, 1(1): 122-124.
- [12] Bentoumi H, Gautron P, Bouatouch K. GPU-based volume rendering for medical imagery [J]. *Int J Electr Electron Eng. (S0020-7217)*, 2010, 4(1): 36-39.
- [13] 储环骏, 杨新, 高艳. 使用 GPU 编程的光线投射体绘制算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(2): 257-262.
- [14] Doi A, Takahashi H, Mawatari T, *et al.* Development of a volume rendering system using 3D Texture Compression techniques on general-purpose personal computers [C]// *Proc of iCAST2011*. Boston: Houghton Mifflin Company, 2011: 461-464.
- [15] Su T, Lv Z, Gao S, *et al.* 3D seabed: 3D modeling and visualization platform for the seabed [C]// IEEE, 2014. USA: IEEE, 2014.
- [16] Hadwiger M, Kratz A, Sigg C, *et al.* GPU-accelerated deep shadow maps for direct volume rendering [C]// *Proceedings of the 21st ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS symposium on Graphics hardware ACM*, 2006. Chicago: The University of Chicago Press, 2006: 49-52.
- [17] 刘晓丹, 于婷, 孙庆杰, 等. 皮影动画角色的骨骼自动生成算法 [C]//*中国信息技术与应用学术论坛论文集*, 2006, 成都: 成都电子科大出版社, 2006.
- [18] 耿阳. 皮影元素在数字动画中的应用研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
- [19] 沈一帆. 科学计算可视化、数字皮影仿真简介 [C]// *上海市智能信息处理重点实验室论文集*, 2012, 上海: 复旦大学出版社, 2012: 54-57.