

基于仿真的表演创意智能涌现方法研究与实现

丁刚毅, 郭芸莹

(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 论文研究基于仿真的表演创意智能涌现方法。通过对艺术表演的视频数据进行分析, 研究并实现基于仿真的表演创意智能涌现, 拓展传统人工进行艺术表演创意带来的局限性。结合艺术表演领域的知识, 对视频中的各个表演创意要素进行了分类和定义, 随后使用计算机符号化理论与计算机识别的技术对不同的表演创意要素进行了计算机表达。随后使用机器学习的方法, 将表演创意进行计算机智能涌现并利用观众评估实验效果。通过实验, 该基于仿真的表演创意智能涌现方法能够生成一场简单的艺术表演, 并在合理性、逼真度、创新性、与人工创意等四个方面展示了它的可行性。

关键词: 仿真; 表演要素; 智能涌现; 计算机符号化

中图分类号: O422 **文献标识码:** A

Research and Implementation of Simulation-based Emergence of Performance Creative Intelligence

DING GANGYI, GUO YUNYING

(Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract: We study the emergence method of performance creative intelligence based on simulation. By analyzing the video of art performances, we research and realize the intelligent emergence of performance creativity based on simulation and expand the limitations brought by traditional artificial art performance creativity. Combined with the knowledge of art performance, each performance creative element in the video is classified and defined, and then the computer symbolization theory and computer recognition technology are used to express different performance creative elements in computer. Then, by using machine learning methods we achieve creative emergence of performance ideas and evaluate the experimental effect with the audience. Through experiments, the simulation-based intelligent emergence method of performance creativity can generate a simple artistic performance and demonstrate its feasibility in four aspects: rationality, fidelity, innovation, and artificial creativity.

Key words: simulation; performance elements; intelligent emergency; computer symbolization

1 引言¹

传统表演创意依赖于人脑的思维和审美。虽然人脑对艺术的理解是丰富且成熟的, 但是在现实中, 表演内容、表演环境、时间等客观条件还是会对艺

作者简介: 郭芸莹 (1995-), 女 (汉族), 云南省昆明市人, 北京理工大学硕士研究生, yunying_guo@163.com。丁刚毅

(1966-), 男 (汉族), 重庆市彭水县人, 北京理工大学教授, dgy@bit.edu.cn。

术创造造成一定的限制。综上，本文提出了一种基于仿真的表演要素智能涌现方法。通过计算机建模掌握创意规律并进行计算机自动生成创意，然后使用计算机仿真技术将创意进行三维重现和系统集成并通过实验完成表演要素集中涌现的实现过程。通过实验，验证了这种表演创意的智能涌现方法具有可行性。

2 相关工作

文艺表演的传统方式是艺术家们根据表演主题进行的艺术创作。在复杂的表演环境下，表演者的行为动作、舞美布景、叙事情节、观察视角和周围噪声的变化，都会给观众的反馈带来很大影响[1]。戏剧领域的“造型戏剧”理论强调利用诗性语言、行为、色彩、音乐以及其他非语言性的表达方式去体现抽象主题[2]。团体操领域的一级构成要素有主题与风格、队形与图案、动作与造型、艺术装饰、出入场[3]。山水实景利用“山水”的环境要素，融合哲学与当地特色，通过各种表演艺术形式展现当地文化特色和文化精神[4]。音乐剧使用戏剧、歌唱和舞蹈三大要素，以戏剧为基础，歌唱、舞蹈实现并强化戏剧功能来完成艺术表现和美学追求[5]。体育舞蹈将舞蹈元素按照一定时间、场地范围和方向路线，结合音乐的节奏旋律变化，合理地连贯起来，组成一套动作。体育舞蹈的编排要素为创新、时间、空间、动作、音乐、风格、服装色彩、场地[6]。在二十世纪的最后十年，计算机技术在现场戏剧、舞蹈和表演中起着动态且日益重要的作用。罗伯特·莱佩奇 (Robert Lepage)，建筑工人协会 (The Builders Association) 和乔治·科茨 (George Coates Performance Works) 等剧院从业人员都在他们的演员周围放映投影数字化操纵图像的屏幕。Gertrude Stein 话剧剧院和 Kunstwerk-Blend 集成了视频会议软件，将来自不同地区的表演者聚集在舞台上。Yacov Sharir 使用 Life Forms 和 Poser 软件在计算机上编排了整个舞蹈作品。默西·坎宁安 (Merce Cunningham) 通过结合动作捕捉技术和先进的动画软件在舞台上投影了虚拟舞者的图像。Troika Ranch (太空公司) 和 Marcel.líAnthúnezRoca 使用定制的运动感应软件来操纵舞台上的图像，演员，声音和灯光。数字表演就是在这样的环境下诞生的。但是这种传统的数字表演方法带来的“创新性”通常是对旧事物的回收利用，并且主要依赖于计算机作

为现有材料的访问者和操纵者[7]。

随着人工智能的发展，计算机已经进入了各个传统行业，如医疗、教育、城市管理等。表演艺术因为需要人的主观创造性和对情感的理解，目前还很少尝试使用人工智能方法进行创意生成。但是对于某种类型的表演来说，经过长期的发展已经形成了一个固定的表演模式，这个模式是可以通过算法进行学习并使用计算机模型的方式进行表达。由此，计算机通过建模学习掌握表演的核心创意规律。

前人的研究已经给计算机方法研究数字表演打下了一定基础，使得传统艺术表演能够通过仿真技术焕发新生。本文使用人工智能的方法涌现表演创意是更是对传统数字表演领域的新扩展，具有一定的意义和可行性。

3 表演创意要素符号化建模方法研究

计算机符号化首先将原始属性的范围划分为有限数量的离散单元，或者对原始数据进行如连续值之间的差异范围的转换。每个离散的单元被分配为不同的符号[8]。

3.1 音乐要素的符号化建模分析与实现

音乐是一种有别于语言的、抽象而复杂的声音形式，由蕴含不同时域形式、频率分布及和声成分的多层次声音所组成[9]。基本特征的变化构成复杂特征，在复杂特征的基础上形成了音乐的整体特征：曲式结构、音乐风格和情感内涵[10]。先得到音频的基音音高，其中 f 是原始音乐信号， f_{mel} 是梅尔音阶，

$$f_{mel}=2595*\log_{10}\left(1+\frac{f}{700}\right)$$

在视频信号中，按照一秒 25 帧的频率，可以将 MFCC 信号和其余舞美、人员信号统一时间单位，使用符号 f_{mfcc} 来表示音乐。本文采用桃李杯大赛舞蹈视频进行分析，其中横轴为音乐时间，纵轴为 MFCC。

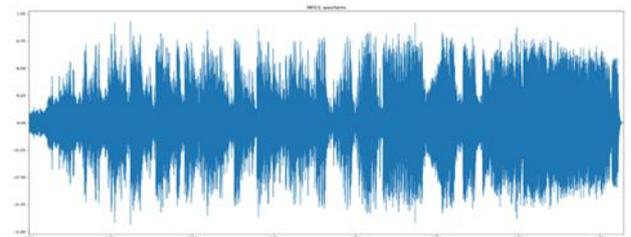


图 1 桃李杯某舞蹈片段配乐 MFCC 波形

3.2 舞美要素的符号化建模分析与实现

舞台艺术设计是舞台表演艺术中最重要的部分。舞台艺术设计取决于剧本，不同的剧本具有不同的舞台形式，舞台风景，舞台人物，舞台服装，舞台灯光，舞台道具等舞台设计。因此，舞台概念是紧密相关的[11]。使用光色、光强和灯光运动来表示舞台灯光的状态。光色和光强可以根据图像来识别，HSV 模式中的色调 H 可以用来表示光色 f_{color} ，明度 V 可以用来表示光强 $f_{intensity}$ 。 f_{move} 表示灯光的运动变化，相邻两帧变化越多说明灯光运动越快，用两帧灯光不重合的面积占灯光总面积的比重来表示。

$$f_{light} = \{f_{color}, f_{intensity}, f_{move}\}$$



图 2 军运会开幕式表演不同颜色灯光范围识别

截取军运会表演片段。此场景情节舒缓、音乐平和，所以灯光的只在颜色上发生了改变。使用 OpenCV 对图像进行识别，找到灯光对应的颜色范围，构建灰度图蒙版 mask，并使用 mask 和原图进行按位与操作，最终从画面中单独提取出灯光部分。灯光的运动公式如下：

$$f_{move} = \sum \frac{S_i |S_{i+1} - S_i| S_{i+1}}{S_{max}}$$

其中， S_i 是当前帧灯光面积， S_{i+1} 是下一帧灯光面积， S_{max} 是表演最大的灯光面积。 f_{move} 变化数值在 0-1 之间，越接近 1 说明灯光的运动越明显。

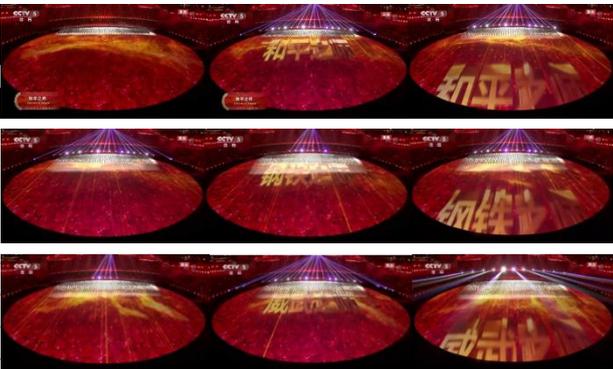


图 3 军运会开幕式表演灯光运动识别

舞台的灯光变化如上图所示。在这段表演中，音乐激愤，表现威武与坚定。灯光颜色没有变化，

而是跟随音乐节奏进行灯光的显示与消失。

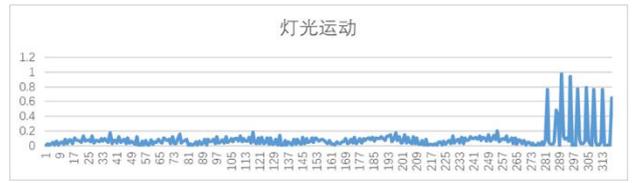


图 4 军运会开幕式表演灯光运动数据图

灯光运动的数据如上所示。其中横轴表示帧数（以 25 帧/秒计算），纵轴表示 f_{move} 的值。在这段 12.72 秒的灯光表演中，蓝紫色灯束总共完成四次由全关到全开的过程，最后是大灯束的上下扫动和开关。从数据图来看，可以看到在 280 帧之前，经历了 4 个较为相似的波形，这四个波形反映了灯束的四次完整运动。但是因为灯束能够照射的面积较小所以运动数值也较小。在 280-318 帧中，曲线有规律地形成波峰数值较大的几次上下波动，从表演来看，这是最后大灯束的上下扫动和开关。灯光运动的数值能够较好地描述灯光的运动过程。

本文使用舞台对观众开放的角度来描述一个舞台。开放角度由水平角度和垂直角度组成。

$$f_{stage} = angle_1 + angle_2$$

其中 f_{stage} 是衡量舞台的参数， $angle_1$ 是水平开放角度， $angle_2$ 是垂直开放角度。



图 5 军运会开幕式表演灯光运动数据图

舞台服装由面料、造型、颜色三个方面描述：面料从粗糙程度（0-1）和轻薄程度（0-1）描述；造型由简单到复杂描述，从 0-1；颜色由服装主色调的 HSV 值代替。其中， f_{mat} 是材质， f_{model} 是造型复杂度， f_{color} 是用 HSV 表示的服装颜色。

$$f_{cloth} = \{f_{mat}, f_{model}, f_{color}\}$$

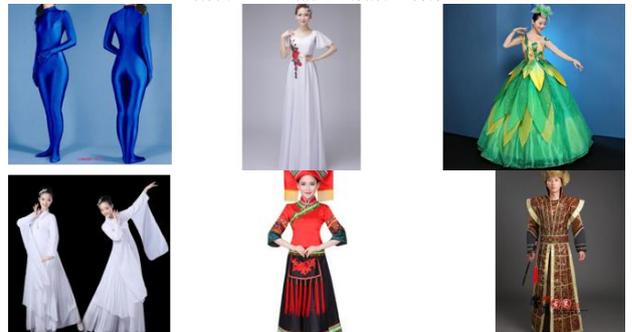


图 6 演员服装示意图

上图展示了造型由简单到复杂，材质由轻盈到厚重的转变。

3.3 人员行为的符号化建模分析与实现

表演中的人员行为是人群的规则模拟。人群的真实模拟涉及许多组件，包括群体行为，认知建模，运动合成，人群运动和渲染[12]。大多数群体仿真使用不同建模技术针对不同应用，着重于群体行为的不同方面，表演中的人群仿真可以细分为被一定准则约束的个体仿真[13]。个人动作从速度、身体部位、身体在空间中的位置和运动方向分析。经验证，这四个基本舞蹈参数对观众的感官体验有重要影响，位移较大的跳跃动作更能激发观众的审美体验[14]。

$$f_{action} = \{f_{speed}, f_{part}, f_{position}, f_{rotation}\}$$

f_{action} 是个人舞蹈动作， f_{speed} 是速度， f_{part} 是身体部位， $f_{position}$ 是身体位移， $f_{rotation}$ 是旋转角度。

$$f_{action} = \begin{cases} f_{part} = \frac{W}{H} \\ f_{speed} = \left(\frac{W}{H}\right)' \\ f_{position} = \frac{[(X, Y) - (X_{center}, Y_{center})]}{W_{stage} - H_{stage}} \\ f_{rotation} = \left(\frac{X}{Y}\right)' \end{cases}$$

其中，W 和 H 分别是人体识别框的长和高，X、Y 分别是人员的位置，Xcenter 和 Ycenter 是舞台中心坐标，Wstage 和 Hstage 是舞台的长和高。

通过视频对演员群体的运动路径进行识别和分析。队形图案分两个角度来分析：部分数（不与其他部分相连的叫一个部分），图案复杂程度（单个部分图案的复杂程度，0-1 由简单到复杂）。移动过程主要分析人群的碰撞可能性。

$$f_{path} = \{f_{pattern}, f_{collision}\}$$

其中， f_{path} 指群体表演路径， $f_{pattern}$ 是指演员队形图案， $f_{collision}$ 是指演员碰撞可能性。

演员表演的密度从两个角度考虑：一是演员平均密度，二是密度的均匀程度。

$$f_{collison} = \{f_{density}, f_{var}\}$$

密度用演员的平均距离来表示。其中， dis 是和某个演员距离最近的四个演员与其距离之和。

$$f_{density} = \frac{\sum_{i=0}^{i=3290} dis}{3290}$$

密度方差用 f_{var} 表示。其中， x_i 是某个演员的

$f_{density}$ ，M 是 3290 名演员的 $f_{density}$ 的平均值。

$$f_{var} = \frac{(x_1 - M)^2 + (x_2 - M)^2 + \dots + (x_n - M)^2}{n}$$

借助国庆联欢晚会第二篇章《我们走在大路上》的表演内容和数据，对演员队形进行分析实例。



图 7 国庆 70 周年联欢表演队形图示

下图记录了演员平均距离。横轴是表演的关键队形编号，纵轴是演员之间的平均距离。纵轴数值越小，平均密度越大。

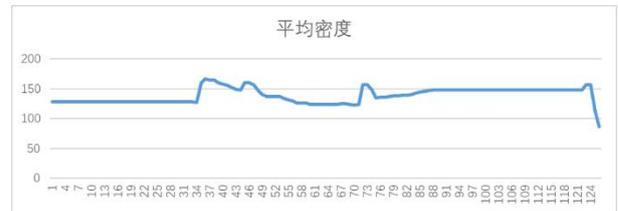


图 8 国庆 70 周年联欢表演演员平均密度

在第 34 个关键帧的时候演员之间的平均距离变大，那是因为开始从密集的“彩虹半圆”变成上下占满表演场地的“大路”。从第 47 个关键帧开始，在大路外侧的四座小山逐渐收到路中，导致演员的平均距离变大。而从第 90 个关键帧开始，演员在原地结合道具进行表演，演员之间的距离不变，所以从 90 到 124 之间呈一条平直的直线。

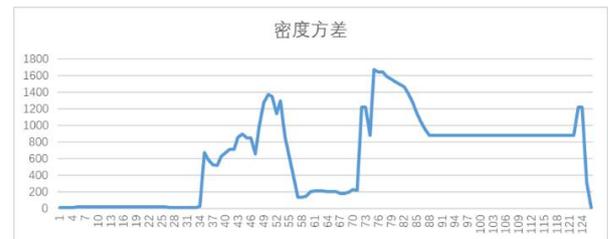


图 9 国庆 70 周年联欢表演演员平均距离密度方差

密度方差如上图所示。仅用平均密度不能完整概括队形的密度。此处还使用同一个关键队形时，

所有 3290 个演员的平均距离的方差来表示密度的均匀程度。横轴表示关键队形的编号，纵轴表示平均距离的方差。可以看到 0-34 号队形的方差为零，说明这期间演员的间距是基本相等的，而在 50-54 号关键队形时，密度方差较大，那是因为构成“鸟”和“云”的演员在“大路”的空隙中运动，导致最密集的区域密度是最疏密度的 4 倍，密度差距较大。

4 表演创意建模方法的研究与实现

4.1 模型的数据处理

模型需要掌握表演创意要素之间的相关关系，使用符号化数据作为训练数据。挑选数据集的 90% 作为训练集，其余 10% 作为测试集。对数据进行预处理。首先清洗数据；然后对多个视频素材得到的数据整合。将所有视频素材和音频素材都统一到 25 帧/秒再提取出数据。最后对数据进行规范化，使用最大最小规范化、零均值规范化和小数定标规范化等方法。

4.2 表演创意要素的符号化回归拟合分析

回归分析研究的是因变量（目标）和自变量（预测器）之间的关系。这种技术通常用于时间序列模型以及发现变量之间的因果关系，本文使用回归分析可以在表演的时间序列上研究各个创意要素之间的关系。使用回归分析不仅可以表明自变量和因变量之间的显著关系，也可以表明多个自变量对一个因变量的影响强度。

1、逐步回归

可用于处理多个表演要素，表演要素的选择在一个自动的过程中完成。首先将音乐要素 MFCC 引入模型并进行 F 检验，随后依次引入舞美变量和演员运动变量并通过 F 检验。

2、多层感知器（MLP）

MLP 是一种有监督学习，训练集被放入下列函数学习。给定一组参数 $X=\{x_1,x_2,\dots,x_m\}$ 和目标 y ，其中 X 代表表演的创意元素， y 是需要智能涌现生成的元素。输入和输出间，MLP 设置了有多个神经元的非线性层——隐含层。输入表演创意元素，计算神经元的加权线性和，并将其输入激励函数。得到的结果是最后一个隐含层的值。

3、随机森林

随机森林在抽取训练数据时，从表演创意要素的全集中有放回的随机抽取并生成多个随机树。在

每棵树的构建期间分割节点时，所选择的分割不再是所有特征中的最佳分割。相反，所选择的分割是特征的随机子集中的最佳分割。相对于单个非随机树的偏差，森林的偏差将会更大，但是由于经过平均计算使得方差减小，这在一定程度上弥补了偏差增大的问题。一个随机森林是一个元估计，适合于数据集的各种子样本上的多个分类决策树，并使用平均来提高预测精度和控制过拟合。在使用随机森林算法时，可以自行设置单个树的数目，默认为 10。

4、最近邻回归（KNN）

当表演参数的符号是连续数据时，基于最近邻居建立模型，本地领域中每个表演参数代表的点对查询点的分类一致。在机器学习库中有类 `sklearn.neighbors`，它用来专门提供有监督或无监督的邻居学习方法。其中的方法 `KNeighborsRegressor()` 可以选择三种算法来计算最近邻居：暴力计算、KD 树、Ball 树。

5、决策树

决策树是一种非参数监督学习方法，通过从表演要素的训练集中大量提取决策规则生成树。每棵树中，待拟合的表演参数符号的均值被放置在叶子节点中，改进的算法使用回归函数代替均值。为了预测目标表演参数的值，新测试的实例使用其属性值将树从根节点跟踪到叶，以此在每个内部节点进行路由决策。

4.3 模型评估

本节借助测试集对选取的回归方法进行评估。通过定量的指标分析，得到以上五种方法最适合表演创意要素的一种。

（1）、决定系数 R^2

决定系数用以评估对曲线回归的准确度。 R^2 是表演要素自变量能够解释 y 中数据的比例大小。决定系数通常大于等于 0，越接近 1 表明准确率越高。

（2）、平均绝对误差 MAE

平均绝对误差是一个平均值，表示了预测值和真实值之间误差大小的平均。通过计算 MAE，可以得到表演数据真实值和预测误差的绝对值的期望。越接近 0 说明曲线拟合更好。

（3）、平均平方误差 MSE

平均平方误差是一个期望，它代表了真实值与预测值误差的平方的大小。在表演要素的预测问题上，MSE 值越小，代表该种机器学习方法对表演创意数据的拟合准确度越高。

5 基于仿真的表演创意可视化研究

5.1 表演创意的仿真系统分析与搭建

文艺表演从静态和动态来完成音乐、舞美和演员的艺术表现。因此，表演创意的仿真系统需要满足以下要求：

1、精准还原三类实体的效果

对舞美和演员的静态建模需要高度还原真实场景，能够支持表演创意的随时扩展。

2、支持数据驱动的创新呈现

仿真系统应留有对应驱动数据的接口，能够做到离线仿真。同时，仿真系统要能够实现驱动数据的传输和预处理功能，使其经过换算能够准确驱动仿真模型。

3、提供参数调整接口

导演可以从仿真系统的界面中对表演要素进行手动参数调整。调整后的结果也会被记录下来，作为模型改进的数据依据。

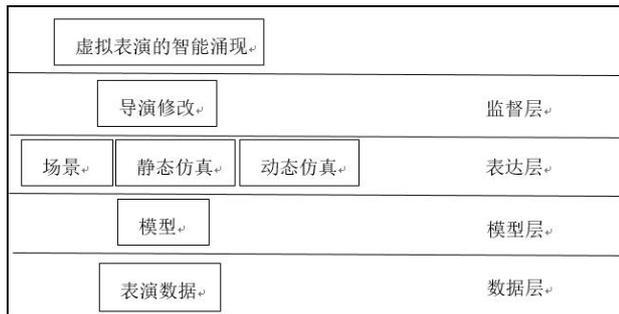


图 10 仿真系统层级图

上图是仿真系统的层级分析。数据层是仿真系统的基础层，对文艺表演的视频素材进行符号化建模。模型层是仿真系统的核心层。模型的输入是经过符号化处理的表演参数。通过对这些数据从计算机角度进行处理分析，模型层记录了表演创意规律。这个规律能够支持表演创意的智能涌现。表达层将模型层得到的智能涌现结果，从数值型转换为三维可视化结果。表达层包括对表演场地、表演区域和表演要素的静态仿真。用数据驱动静态模型改变参数特征，最终形成一场完整的动态表演。

5.2 表演创意要素的静态建模方法

场景建模主要指自然环境。针对有 CAD 等记录数据的地形，可以使用三维建模软件建模并将模型置入仿真系统。也可以使用卫星高程信息，借助专业地形制作软件完成地形搭建。静态舞美包含灯光、

舞台形制和服装。演员模型根据结构从关节、骨骼、皮肉等三个层次进行。以 hip 为父节点，其余节点由近到远形成父子关系。在骨骼上根据不同权重蒙皮。

5.3 表演创意生成结果转换为三维仿真方法研究

静态模型在搭建的时候预留好了专门的接口，这个接口的目的是接收外部传入的随时间序列而连续改变的表演要素数据。数据传入仿真系统后，随着每一帧变动变化的特征数值。显示时，每个数值的阈值代表了三维显示的范围。同时，仿真系统的操作界面支持在后台数据驱动模型同时手动调整表演效果，改变的数据能够被记录到一个单独文件中，成为后续对模型进行改进的依据。

6 实验验证

6.1 实验背景

本章通过实验，验证基于仿真的表演创意智能涌现方法的可行性和效果。基于 windows10 操作平台，利用 python2.7 版本进行数据建模，借助 sklearn 回归函数库完成回归拟合，在 Unreal Engine4 平台进行三维仿真。

6.2 系统设计

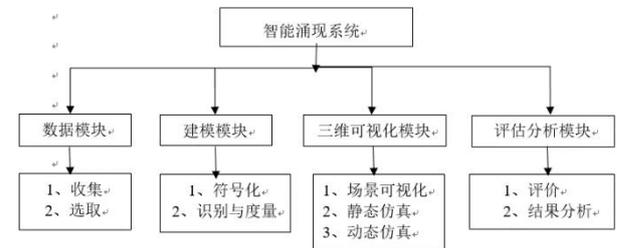


图 11 基于仿真的表演创意智能仿真系统设计

(1)、数据模块

数据收集子模块收集大量原始的表演视频素材。数据选取模块是选取同一个镜头下的连续片段进行表演要素分析。符号化模块是把视频素材通过计算机符号化建模方式进行处理。反馈收集模块是收集导演对智能涌现的仿真效果手动调整数据的模块。

(2)、建模模块

建模模块是系统的核心部分，它使用回归拟合掌握了表演创意的规律。借助 Python 和其数据挖掘的库 sklearn 进行表演要素分析。评价模块通过定量分析评估，使用 MAE、MSE 等衡量标准从多个回归拟合方法中选取一个较为适合的算法。

(3)、三维可视化模块

三维可视化模块将系统学习到的规律转换为直观的仿真场景。静态模型从物理特性对其进行建模动态仿真模块使用数据驱动静态模型，使其随着时间而改变其特性。

(4)、评估分析模块

分析模块对调查问卷进行分析，总结基于仿真的表演创意智能涌现方法是否可行，并对未来改进该方法提出了方向。

6.3 应用效果

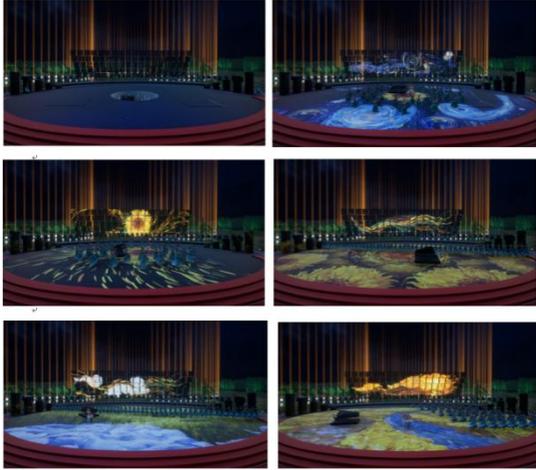


图 12 系统仿真效果图

上图展示了系统的应用效果。借助 2019 北京世园会表演场地，完成了一场创意的生成。

6.4 观众评估

为了检验被试者的观看体验，本文设置了一个调查问卷。从合理性、逼真度、创新性、与人工创意的区别四个角度提问，每个角度包含三个问题。要求受试者在观看仿真系统表演的 15 分钟内使用 7 个等级的李克特量表完成问卷。打分情况如下：

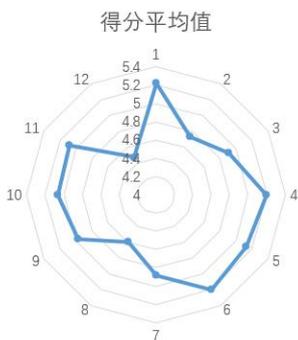


图 13 针对仿真效果的观众评估

图中的编号 1、2……12 代表问卷的题目编号。邀请 100 位观众，对智能仿真系统得出的结果视频进行观看，并在结束后的 15 分钟内完成调查问卷。对 100 位观众的调研结果求平均值，得到上图结果。

可以看出观众们觉得表演基本符合艺术审美习惯，借助三维可视化的仿真方法得到的表演场景清晰逼真，对观众理解表演思想起到了积极作用。但是计算机智能涌现的结果和人工创意的结果对比起来，在艺术表现力和创造性上还有所欠缺，导致大家对计算机进驻表演创意领域的信心不足。在后续的研究中可以强化模型的智能性，逐步改善基于仿真的智能涌现表演创意效果。

7 结论

面对传统人工进行表演创意带来的时间长、场地受限、套路模式化等瓶颈，本文尝试使用一种计算机智能生成的方法提供全新解决思路。首先根据表演特性对主要的表演创意要素进行了定义分类，并使用计算机方法对其进行识别和度量。根据符号化理论，将其转变为计算机可以理解的数据。随后使用回归拟合的方法，对表演创意进行建模，并进行智能涌现。最后通过实验验证了仿真的效果，邀请观众进行评估，从合理性、逼真度、创新性、与人工创意的区别四个方面验证了本文提出的基于仿真的表演创意智能涌现方法具有一定可行性。

此外，由于研究程度有限。该方法还可以拓展其应用的普适性。而且在搭建模型的算法选取上，可以借助生成对抗网络等进行不断尝试。

参考文献

- [1] Enhancing Audience Engagement in Performing Arts Through an Adaptive Virtual Environment with a Brain-Computer Interface [C], in the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces, 2016.
- [2] 杨述伊. 造型戏剧——论《欲望号街车》中的舞台表演要素(英文)[J]. 西南民族大学学报:人文社科版, 2005.
- [3] 王伟娜. 我国全运会开幕式团体操表演构成要素及表现形式分析[D].
- [4] 黎学锐. 山水实景演出的概念界定[J]. 歌海(1):48-51.
- [5] 罗颖. 浅论音乐剧中不同表演要素的整合表现[J]. 艺术科技, 2014(04):45+73.
- [6] 李翠. 对体育舞蹈表演舞的创编要素调查分析[J]. 当代体育科技, 2014, 004(002):7,20.
- [7] Dixon, Steve. Digital Performance[J]. new media, 2007.
- [8] Brida J G , Punzo L F . Symbolic time series analysis and

- dynamic regimes[J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2003, 14(2):159-183.
- [9] 平利川, 原猛, 冯海泓. 频域分辨率和时域包络周期性对音乐音高分辨的影响[J]. *声学学报*, 2012(03):102-107.
- [10] 刘丹, 张乃尧, 朱汉城. 音乐特征识别的研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2002, 038(024):74-77.
- [11] Fu, Wenlong, Wang, Yaguang, Sui, Aina, 等. Research and implementation of knowledge base system for stage art design.[C]// *IEEE/ACIS International Conference on Computer & Information Science*. IEEE, 2016.
- [12] 郭妍. 大型广场文艺表演虚拟编队系统的设计与实现[D]. 2015.
- [13] Thalmann D . Crowd Simulation[M]// *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2007.
- [14] B. Calvo-Merino a,*, C. Jola a,b, D.E. Glaser a,c, P. Haggard a, 等 . Towards a sensorimotor aesthetics of performing art.[J]// *Consciousness and Cognition* 17 (2008) 911 - 922.
- [15] Hossain M A , Memon S , Gregory M A . A novel approach for MFCC feature extraction[C]// *Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2010 4th International Conference on. IEEE, 2011.
- [16] 王洪建. 基于 HSV 颜色空间的一种车牌定位和分割方法[C]// *中国仪器仪表学会青年学术会议*. 2005.