

核事故应急演练培训仿真系统设计与应用

吴强¹ 田书建³ 杨子辉² 孙国民² 陶桂花² 陈威虎² 王世鹏²

¹(安徽大学物质科学与信息技术研究院 合肥 230601)

²(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

³(华北水利水电大学能源与动力工程学院 郑州 450046)

摘要 为解决核事故应急演练中辐射场不可见、潜在的辐射风险、多工种参与人员众多等问题,本文提出了一种基于特征重要性的自适应光线投射三维核辐射场可视化方法。采用三维仿真引擎Unity3D研发了核事故应急演练培训仿真系统,通过ShaderLab编程实现百万网格数量级的核辐射场的三维可视化,基于有限状态机实现了多工种人员协同作业演练仿真等功能,系统帧率60帧左右,可满足实时交互需求。以放射源失控事故为案例,真实还原了核事故应急演练中的作业模式及处理流程,为保障人员辐射安全、丰富培训手段、降低培训成本提供了支持。

关键词 辐射场可视化,核应急演练,光线投射,有限状态机

中图分类号 TP391.9, TL73

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0129

Design and application of training simulation system for nuclear accident emergency drill

WU Qiang¹ TIAN Shujian³ YANG Zihui² SUN Guomin² TAO Guihua² CHEN Weihu² WANG Shipeng²

¹(Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

²(Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

³(College of Energy and Power Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

ABSTRACT In order to solve the problems of the nuclear accident emergency drill, such as invisible radiation field, potential radiation risk, and high labor costs, therefore, an adaptive ray-casting 3D nuclear radiation field visualization method based on feature importance was developed in this study. The nuclear accident emergency disposal drill training simulation system was developed based on the Unity3D simulation engine. The 3D visualization of a nuclear radiation field with millions of grids was realized using ShaderLab programming. Multi-job personnel collaborative operation exercise simulation was realized based on the finite state machine. The system frame rate was approximately 60 frames, which meets real-time interaction requirements. Considering an out-of-control radioactive source accident as a case, the operation modes and emergency disposal processes of the nuclear

基金资助:安徽省自然科学基金面上项目(2008085MA23);中国科学院合肥研究院院长基金资助(YZJJ202208-TS);2022年教育部产学合作协同育人项目(220602677082736)

第一作者:吴强,男,1999年1月出生,2020年毕业于天津工业大学。现为硕士研究生,研究方向:辐射防护与辐射场可视化仿真
通信作者:杨子辉,副研究员,E-mail: zihui.yang@inest.cas.cn

收稿日期:初稿 2022-11-22;修回 2023-01-11

Supported by the General Project of Anhui Natural Science Foundation (2008085MA23), HFIPS Director's Fund (YZJJ202208-TS), and the Ministry of Education's industry-university cooperation collaborative education project in 2022 (220602677082736)

First author: WU Qiang (male) was born in January 1999, graduated from Tiangong University in 2020. Now he is a graduate student, majoring in radiation protection and visual simulation of radiation field

Corresponding author: YANG Zihui, associate professor, E-mail: zihui.yang@inest.cas.cn

Received 22 November 2022; accepted 11 January 2023

accident emergency drill could be rebuilt by the system. The proposed solution of the simulation system could be applied to ensure personnel radiation safety, enrich training methods, and reduce training costs.

KEYWORDS Radiation field visualization, Nuclear emergency drill, Ray casting, Finite state machine

CLC TP391.9, TL73

核能作为低碳能源，是我国能源体系中的重要组成部分。根据中国核能行业协会报告^[1]，2022年全国运行核电机组累计发电量为4.178×10¹² kWh。核技术在工业、农业、医学、科研、教育等领域有着广泛的应用，据《中国的核安全》^[2]白皮书统计，截止2019年6月，中国在用放射源142 607枚，各类射线装置181 293套，但存在因自然灾害、管理不善或违规操作等因素，导致发生放射性事故的风险，对公众、环境造成放射性危害，对经济造成严重影响。

近年来，我国十分重视此类核事故应急能力的建设^[3-5]。国家、各地方政府及核设施运营单位先后组织开展了大量的不同类型、不同规模的演练。核事故^[6]应急处置包含以下几个阶段^[7]：及时调配特种装备、出动应急人员、抢救受困人员、划分警戒区域、放射源搜寻定位、破损放射源包装收储等。演习需要各个行业的专业人才参与，需要调度大量的人力及物力资源，而且存在一定的辐射风险。为提高作业人员对核辐射环境的认知，数据映射与可视化方法^[8-10]为实现核辐射场三维可视化^[11]提供了支持；为切实提升应急响应人员技术熟练度，降低培训成本，虚拟仿真^[12-14]成为培训工作人员的重要手段^[15]。袁伟等^[16]开发了某装备典型核事故仿真动态演示系统，动态反映了事故发展过程和关键技术成果；陆军军医大学军事预防医学系^[17]研发了核事故医学救援虚拟仿真训练软件，整合了核应急医学救援工作的任务和基本流程；华中科技大学郑臻华^[18]基于

Unity3D开发了核事故医学应急处理模拟系统，从核事故发生到伤员救治针对医护人员作业进行了有效的仿真模拟；Raja Shekhar等^[19]开发了核事故早期后果评价与决策支持的在线核应急系统，进行了预设事件模拟和方法学验证等。

本文按照核事故应急处理流程，基于CATIA、3DMax等建模软件及Unity3D引擎，搭建了核事故应急演练培训仿真系统，提出了一种基于特征重要性的自适应光线投射三维核辐射场可视化方法与基于有限状态机的多工种协同作业仿真方法。以某化工企业车间的放射源失控事故为案例，对整体核事故应急流程开展模拟仿真培训。

1 系统总体设计

为真实模拟核事故应急救援过程，如图1所示，采用蒙特卡罗粒子输运模拟计算方法，计算事故工况下三维辐射场空间分布情况，基于光线投射方法实现三维核辐射场可视化；对建筑、装备等按照真实尺寸三维建模，对多工种人员角色动作进行骨骼动画建模；按照应急预案设计救援仿真流程，从多个工种的角度对核辐射环境下的协同作业进行还原，从几何场景、物理信息、操作流程等方面实现构建高保真事故救援场景与人员交互式操作培训。

系统主要包括态势感知模块、虚拟漫游模块、实验培训模块、用户交互模块、可视化模块、数据库管理模块。系统功能模块图如图2所示。

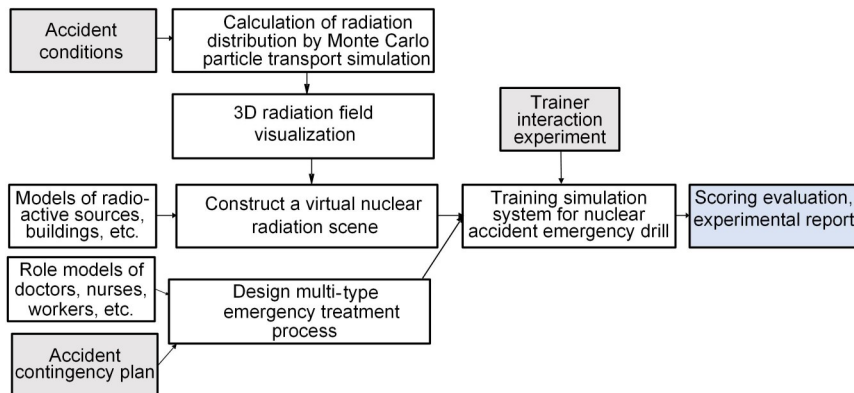


图1 系统总体框架图
Fig.1 System overall frame diagram

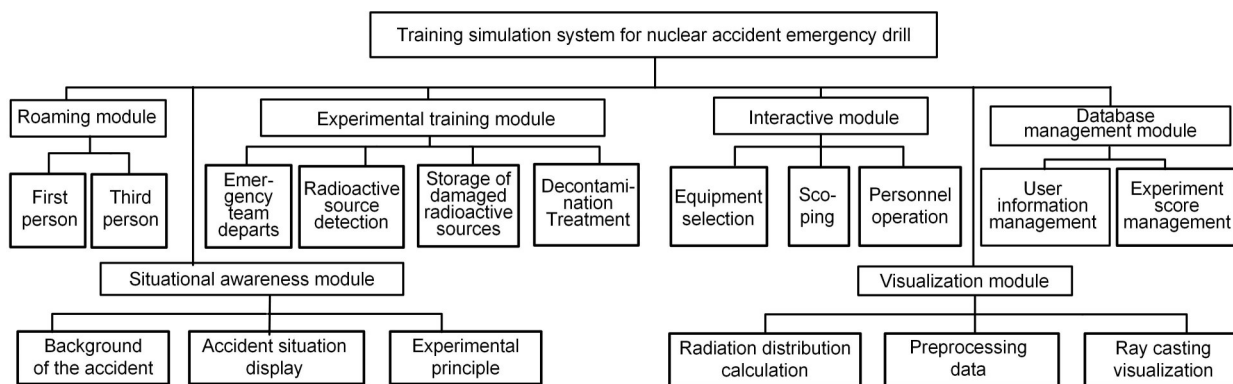


图2 系统功能模块图
Fig.2 System function module diagram

态势感知模块主要提供了事故应急处置相关的原理与进程讲解，帮助培训人员更好地了解辐射事故背景与事故演变态势；虚拟漫游模块分为第一人称和第三人称漫游，提供了视角切换与视角加速功能，以便于培训人员对场景的整体布局进行全面观察；实验培训模块主要包括了应急小组的出发准备工作、现场探测放射源、破损放射源的收储处理、现场的去污处理、综合评分等功

能；用户交互模块包含实验过程中的装备选择、人员操作、探测范围划定等用户交互操作；可视化模块主要用于实现三维核辐射场的可视化；数据库管理模块包括注册登录、成绩录入等。

系统相关软件技术架构包括用户层、展示层、核心功能层、数据层、运行环境、开发环境，具体如图3所示。

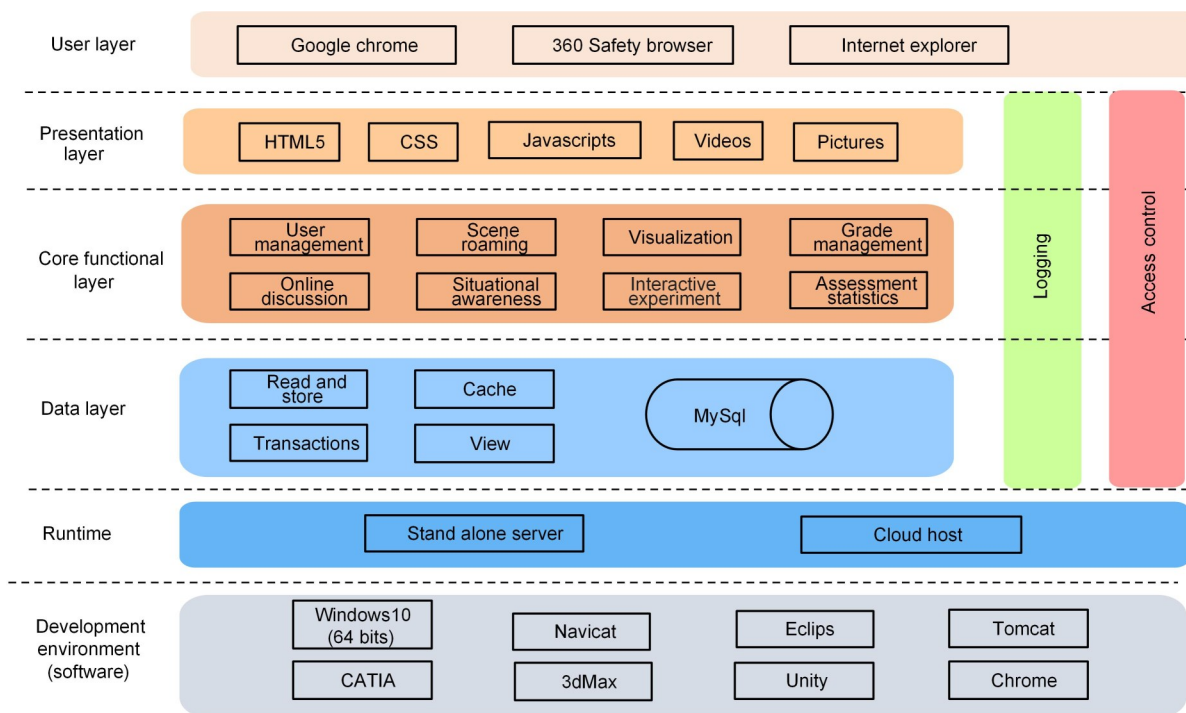


图3 软件技术架构图
Fig.3 Software technology architecture diagram

系统采用B/S架构，应用部署在云服务器上，后台采用PHP编程语言搭建，网页前端使用HTML和css构造网页基本框架，Javascript实现页面动态效果，数据存储采用MySQL数据库，实验用户可以通过Chrome、IE等浏览器访问系统服务

端进行在线培训。

2 基于特征重要性的自适应光线投射三维核辐射场可视化方法

光线投射算法是一种基于图像空间序列的直

接绘制可视化方法。传统的算法核心思想是从视点出发向最终图像每一像素发射一条光线，在三维数据空间中根据预先设定好的步长沿着光线方向进行等距离采样，通过三线性插值获取采样点数据并转成对应的颜色信息，同时进行颜色与不透明度累加直至光线穿越整个图像序列，最后得到的值就是渲染图像的像素的颜色。

在传统光线投射算法基础上，本文提出了一

种基于特征重要性的自适应光线投射三维核辐射场可视化方法。根据三维核辐射分布数据对辐射场进行可视化并与核设施环境叠加构建虚拟场景，提高虚拟现实仿真的真实性。算法关键流程包括数据的获取与预处理、纹理生成、自适应采样频率计算、分级加速三线性插值重采样、自适应不透明度计算与颜色合成等，具体如图4所示。

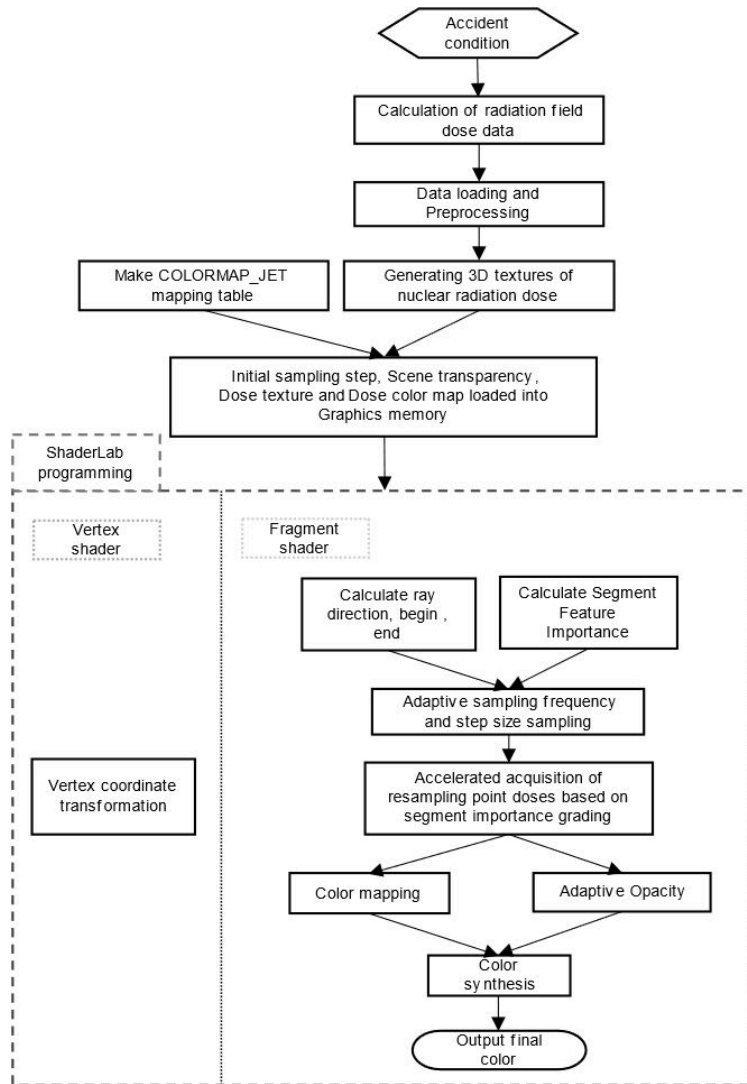


图4 基于特征重要性的自适应光线投射三维辐射场可视化方法
 Fig.4 Adaptive ray casting 3D nuclear radiation field visualization method based on feature importance

2.1 数据的获取与预处理

基于蒙特卡罗粒子输运模拟方法软件 SuperMC 计算三维辐射场分布，对放射源进行几何与物理建模、材料设置、辐射场计数网格划分，计算出模拟辐射场数据。蒙特卡罗计算结果通常为文本文件，从中提取出三维空间的辐射剂量值

及其对应的坐标位置。

对原始数据进行一些预处理，保证颜色映射的准确性。剔除离异值，防止颜色过于集中某一颜色区域导致透明度传递不明显而存在较严重的遮挡问题；对于整个数据样本使用取对数的方式压缩映射区间，防止剂量值跨度较大或者剂量值

均较小时，高剂量区域可视化效果不明显。

2.2 三维剂量纹理与配色表纹理生成

对预处理后的剂量数据进行操作，提取辐射剂量值区间，生成归一化的三维辐射场剂量纹理，用于片元着色器阶段对采样点位置的进行标准化剂量颜色映射。为了帮助实验用户清晰感知核辐射在事故场景中的分布情况，快速定位场景中的高剂量和低剂量区域，基于如下 ColorMap_Jet 颜色映射公式对辐射剂量进行颜色映射。

$$\text{clamp}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ x & 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$r(d) = \text{clamp}(1.5 - |2d - 1|) \quad (2)$$

$$g(d) = \text{clamp}(1.5 - |2d|) \quad (3)$$

$$b(d) = \text{clamp}(1.5 - |2d + 1|) \quad (4)$$

该映射公式中 $d \in (-1, 1)$ ，不满足辐射剂量纹理采样值范围。因此，根据 ColorMap_Jet 颜色映射公式生成映射精度为 0.01 的配色表纹理，得到如图 5 所示结果，随着剂量值的升高由冷色域转到暖色域的颜色映射方案。

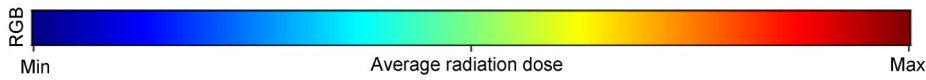


图5 颜色映射域
Fig.5 Color mapping range

将生成的三维剂量纹理、配色表纹理、传统等距离采样步长和场景不透明度载入显存中，通过 Unity 的 ShaderLab 编程来实现三维核辐射场分布可视化。

2.3 自适应采样频率计算

传统的光线投射算法中根据预设的步长进行等步长采样，忽略了人眼视觉特征的重要性的数据局部特征的重要性。因此，本文沿光线方向对数据场进行分段，根据光线深度和辐射分布来计算采样数据段的特征重要性、自适应采样频率与步长。设数据场光线入射点为 $B(x_b, y_b, z_b)$ ，射出点为 $E(x_e, y_e, z_e)$ ，数据段 i 的中点为 $si(x_{si}, y_{si}, z_{si})$ 。穿过数据场的光线长度与当前光线深度分别为 $|BE|$ 、 $|BS_i|$ ，计算见公式 (5) (6)。

$$|BS_i| = \sqrt{(x_{si} - x_b)^2 + (y_{si} - y_b)^2 + (z_{si} - z_b)^2} \quad (5)$$

$$|BE| = \sqrt{(x_e - x_b)^2 + (y_e - y_b)^2 + (z_e - z_b)^2} \quad (6)$$

使用公式 (7) 计算数据段 i 在中点位置 si 的辐射场梯度信息 g_{si} 用于表示辐射分布的不同剂量区域的边界信息。对梯度值进行绝对值界定，保证重要性收敛。

$$g_{si} = 0.01 \leq \max \left(\begin{matrix} |f'_x(x_{si}, y_{si}, z_{si})|, |f'_y(x_{si}, y_{si}, z_{si})|, \\ |f'_z(x_{si}, y_{si}, z_{si})| \end{matrix} \right) \leq 1 \quad (7)$$

作业人员需要对高剂量区域投入更高的关注度，使用 d_{si} 表示三维辐射场剂量纹理在点 si 处采样

得到的辐射剂量值，由此得到数据段的特征重要性计算见公式 (8)。

$$I_i = \frac{|BE| g_{si} d_{si}}{|BS_i|} \quad (8)$$

从式 (8) 可知数据段的重要性与采样频率随着光线深度和辐射场细节特征变化而变化，距离入射点越近细节信息越多的数据段采样频率越高。根据数据段的特征重要性计算自适应采样步长，具体见公式 (9)。

$$l_i = \frac{\sum_{j=0}^N I_{si} L_o}{I_{si} N} \quad (9)$$

式中： N 表示数据段数量； L_o 表示传统等距离采样步长。基于上述自适应采样频率策略进行采样，在保证整体绘制质量的前提下，兼顾了人眼观察的近大远小的深度特性和三维辐射场分布的细节特征。

2.4 基于特征重要性分级加速三线性插值重采样

光线投射过程中，视点出发的光线不一定精确的经过三维数据场中原始的网络顶点，GPU 进行剂量纹理采样时需要进行三线性插值计算采样点的值。如图 6 所示， $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ 和 A_7 表示距离采样点最近的 8 个原始网格点。

分别在 x 轴、 y 轴、 z 轴三个方向上进行插值运算，见公式 (10) ~ (13)。

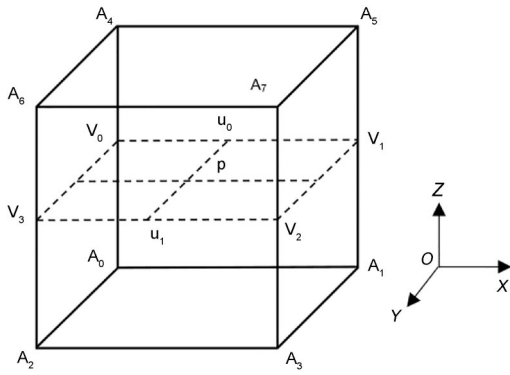


图6 三线插值算法原理图

Fig.6 Schematic diagram of trilinear interpolation algorithm

$$\begin{cases} u_0 = xv_0 + (1-x)v_1 \\ u_1 = xv_3 + (1-x)v_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$D_p = yu_0 + (1-y)u_1 \quad (11)$$

$$\begin{cases} v_0 = zA_0 + (1-z)A_4 \\ v_1 = zA_1 + (1-z)A_5 \\ v_3 = zA_2 + (1-z)A_6 \\ v_4 = zA_3 + (1-z)A_7 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} D_p = & xyzA_0 + (1-x)yzA_1 + x(1-y)zA_2 + \\ & (1-x)(1-y)zA_3 + xy(1-z)A_4 + \\ & (1-x)y(1-z)A_5 + x(1-y)(1-z)A_6 + \\ & (1-x)(1-y)(1-z)A_7 \end{aligned} \quad (13)$$

根据公式(13)可知,一次三线插值计算需要19次加法运算和24次乘法运算,占用了较多的计算资源,针对此问题,本文设计了一种基于特征重要性的分级加速三线插值方法。

根据数据段特征重要性与平均重要性的关系来选择不同的策略进行重采样。第*i*段的特征重要性 I_i 小于平均重要性 I_{avg} 时,利用三线插值计算新重采样点剂量后,迭代生成 $\lfloor \log_2 i \rfloor + 1$ 个采样点剂量。相较于传统算法,在没有减少采样点、降低图像质量的前提下,兼顾视觉重要性的同时采用较为平滑的迭代点新增曲线保证细节重要性,极大地缩减了三线性插值的运算时间。

2.5 自适应不透明度计算与图像合成

光线投射的最后一个过程是通过图像合成得到最终像素点的颜色和不透明度。将前一部分计算得到的采样点剂量 d 转换成对应的颜色和不透明度,其中颜色通过配色表纹理采样获得,采样点不透明度通过公式(14)计算而得。

$$\alpha_i = \frac{\alpha * I_j}{\sum_{j=1}^n I_j * (1 - d_i)} \quad (14)$$

式中: I_j 表示剂量点所在数据段的重要性; α 表示场景不透明度,用于控制辐射场整体可视化效果的避免对其他实验场景造成遮挡问题。根据公式得到与采样数据段重要性、采样点吸收剂量成正比的自适应不透明度。当视点光线穿过三维辐射场,需要将光线入射时的初始状态与采样点状态进行混合计算,最后得到光线射出后的颜色值与不透明度值。颜色合成算法按照顺序可以分为自前向后的合成算法和自后向前的合成算法。使用 C_{in} 、 C_{cur} 、 C_{out} 和 α_{in} 、 α_{cur} 、 α_{out} 分别表示射入点、当前采样点、射出点的颜色与不透明度。

自前向后的颜色合成算法如公式(15)所示。

$$\begin{cases} C_{out}\alpha_{out} = C_{in}\alpha_{in} + C_{cur}\alpha_{cur}(1 - \alpha_{in}) \\ \alpha_{out} = \alpha_{in} + \alpha_{cur}(1 - \alpha_{in}) \end{cases} \quad (15)$$

自后向前的颜色合成算法如公式(16)所示。

$$C_{out} = C_{in}(1 - \alpha_{cur}) + C_{cur}\alpha_{cur} \quad (16)$$

自前向后的颜色合成算法中可以得出不透明度随着采样点的累积而不断升高。因此,本文采用的是自前向后的合成算法,当不透明度趋于1时,此时当前像素接近不透明状态,其后采样点对于颜色合成的贡献度趋于0,可以提前截止光线投射采样,减少一定的计算成本,提高算法效率。

3 基于有限状态机的多工种协同作业设计

有限状态机是一种用来进行对象行为建模的工具,其作用主要是描述对象在它的生命周期内所经历的状态序列,以及如何对来自外界的各种事件做出响应。

首先,对于不同的状态节点进行映射,将有限状态机的起始状态对应为培训仿真系统的初始化状态,将消亡状态对应为完成状态,将不同工种的作业状态映射为其余的中间状态节点。对培训仿真流程进行总体分析,设计基于有限状态机的多工种协同作业方案,部分状态机结构如图7所示。

在实验不同阶段,参与协同作业的工种主要包括:厂房工人、医护人员、消防人员、应急探测组、应急处置组。不同工种作业状态节点的转换由用户操作控制或系统的参数变量控制。部分状态转换方式如图8所示。

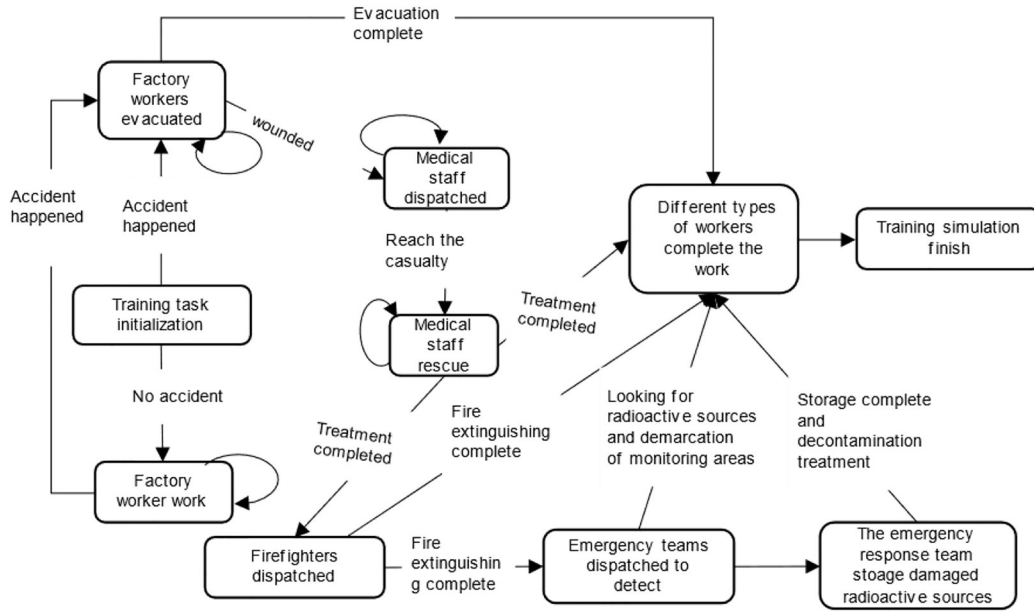


图7 有限状态机结构设计
Fig.7 Finite state machine structure design

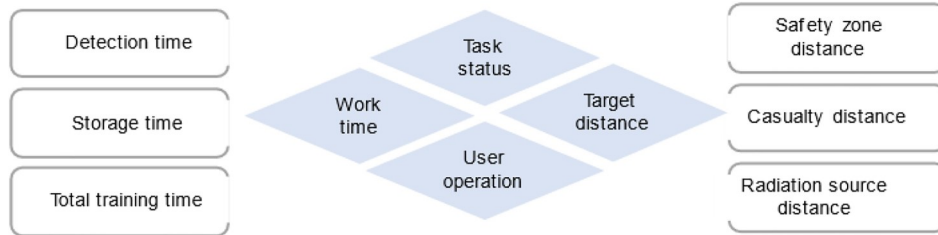


图8 状态转换方式
Fig.8 State transform method

其中目标距离主要用于判断系统人物的位置状态，使仿真效果更加真实准确。作业时间用于计算应急小组人员的所受辐射剂量的累计值，防止累积辐射剂量即将达到警戒值时，使演练更客观真实，符合实际演练情况。任务状态是针对应急处置流程中每一个阶段的任务的完成状态的判断，只有当前阶段的所有任务完成后才能开始下一阶段的任务。根据用户操作与系统交互状态，判断当前任务是否完成，由完成情况对实验进行评分。

对系统发生的多工种协同作业状态转换实现应急救援的关键流程进行举例。事故发生后，工厂人员紧急撤离，判断是否出现伤员等因素，出动医护人员进行救治。系统判定用户操作的医护人员的救援情况和消防组的灭火处理情况。消防工作完成后，为应急探测组人员选择合适的装备进入现场进行现场探测，此过程根据装备选择的正确性，判断是否允许应急小组切换至出发状态。

探测人员出发后，操作应急探测人员完成未破损放射源的收储、破损放射源的搜寻、警戒范围的划定等任务。探测组任务全部完成后，应急处置组才可以进入破损放射源收储状态。用户正确收储破损放射源后，再对现场进行一系列的去污处理操作，系统判断空气中辐射剂量是否满足要求。

4 应用案例

4.1 场景搭建

本文以核设施发生爆炸、火灾等突发事件导致放射源失控为案例。为还原事故场景，按照真实尺寸使用CATIA对工厂车间、放射源等模型进行三维建模搭建作业场景模型库，将模型导入3dMax中进行材质贴图以及格式转换，同时在3dMax中完成各工种角色的建模，将生成的FBX格式的模型文件导入Unity中进行场景搭建。场景

建模根据主要建筑分布对整个场景进行布局，根据放射源失控应急处理流程对安全区位置和医护及消防应急位置等进行布局设置，根据事故工况计算核辐射场分布，对辐射分布情况进行三维可视化。

4.2 案例设计

核事故应急演练培训仿真系统基于CPU AMD 5800、GPU NVIDIA RTX 3060、Win 11 操作系统开发，系统前端页面如图9所示。用户进入网站后，不仅可以开展相关的理论知识学习，还可以通过开始实验接口访问培训系统进行仿真培训，完成实验后可以打印生成培训考核结果，也可以进行在线讨论留言分享实验心得。

培训系统主要基于Unity3d引擎个人版开发，通过图形系统的纹理、着色器、材质、渲染管线等实现场景渲染、辐射场可视化等功能；运用物理系统进行碰撞检测等；粒子系统模拟爆炸火花等特效；动画系统用于播放人员奔跑、车辆移动等动画；使用状态机完成实验状态、实验角色转换等；主要基于Unity UI实现控制角色移动、挑选装备、使用装备等用户交互实验。Unity脚本模块可实现对整个培训系统的管理。用户进入实验系统后，系统会对整体培训作业流程进行实时跟踪，

设计了包含事故展示、应急小组出发、现场探测等多个模块，实验主界面如图10所示。左侧显示了整个实验的不同模块，右侧的界面用于展示不同阶段的任务及相关提示。系统虚拟漫游模块包含场景的整体漫游及各阶段的第一人称应急处理操作。在对整个场景漫游过程中实验用户可对当前事故态势进行整体把握。



图9 前端页面
Fig.9 Front page



图10 实验主界面
Fig.10 Experiment main interface

4.3 三维核辐射场分布可视化

对本文提出的基于特征重要性的自适应光线投射三维核辐射场可视化方法进行辐射场分布可视化，可视化效果如图11所示。

本文的算法通过自适应采样频率提高了对高剂量区域与剂量变化边界的关注度，相较于传统

方法细节上更加细腻。在算法的计算效率方面，基于特征重要性分级加速重采样降低了渲染成本，使用英伟达3060显卡渲染帧率约为60帧/s。本文提出的基于特征重要性的自适应光线投射三维核辐射场可视化方法在进行三维辐射场可视化时，在有效保留辐射分布细节信息的前提下，满足了系统的实时交互需求。

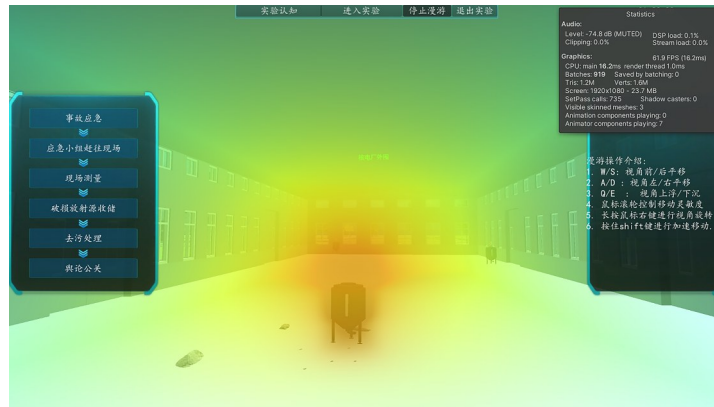


图11 基于特征重要性的自适应光线投射三维核辐射场可视化效果
Fig.11 Adaptive ray casting 3D nuclear radiation field visualization effect based on feature importance

4.4 多工种协同作业仿真

系统为应急过程中的不同工种设置了不同的交互功能，对关键交互功能进行举例如图12所示。

交互实验主要分成应急响应、应急小组准备及出发、探测准备、现场探测、破损放射源收储转移、去污处理等几个关键部分，主要交互实验功能使用流程如图13所示。

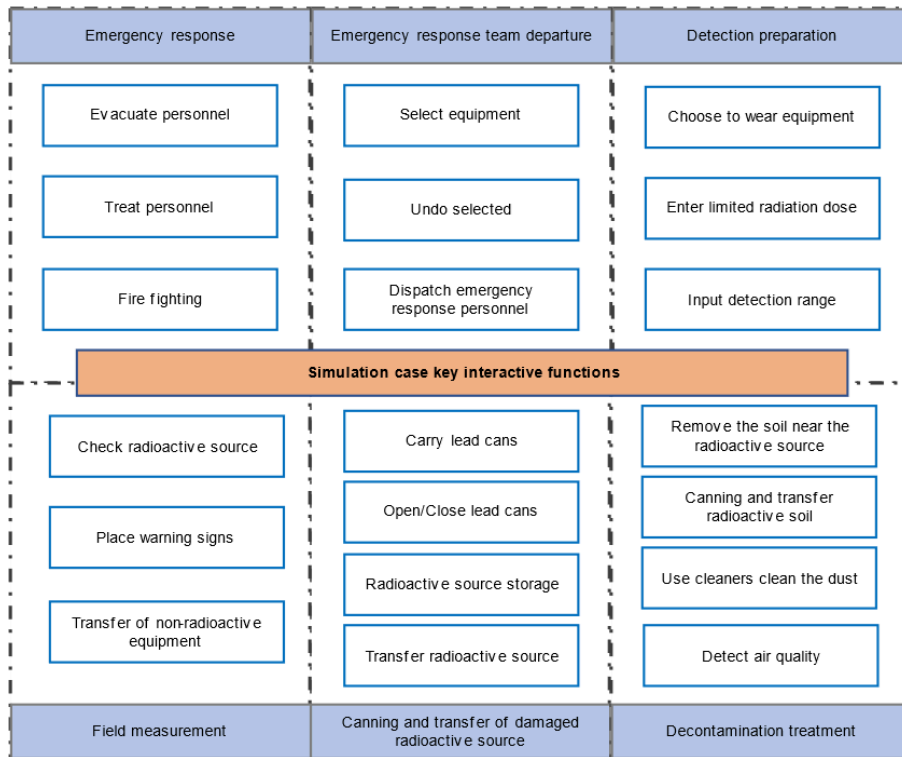


图12 关键交互功能
Fig.12 Key interactive functions

根据事故应急预案设计了对应的仿真实验培训流程，因此用户主要在系统设定的实验顺序中开展实验。同时，用户存在一定的自由度，比如可以自由选择救援和探测等作业路线、警戒标识放置位置等，但也会对其中不合理操作设置边界，装备选择次数、警戒标识数量和距离范围、受照射的辐射剂量、铅罐收储转移顺序等，对其中不

合理的操作也会进行相应的扣分处理，其中部分关键应急演练过程如图14~18所示。

系统培训结束后将会对培训人员的表现进行综合评定，对各个阶段中不符合规定的操作进行扣分处理，可以有效挖掘培训人员作业中的薄弱项，针对部分作业技能进行专项训练，提高仿真实训的效率及效果。

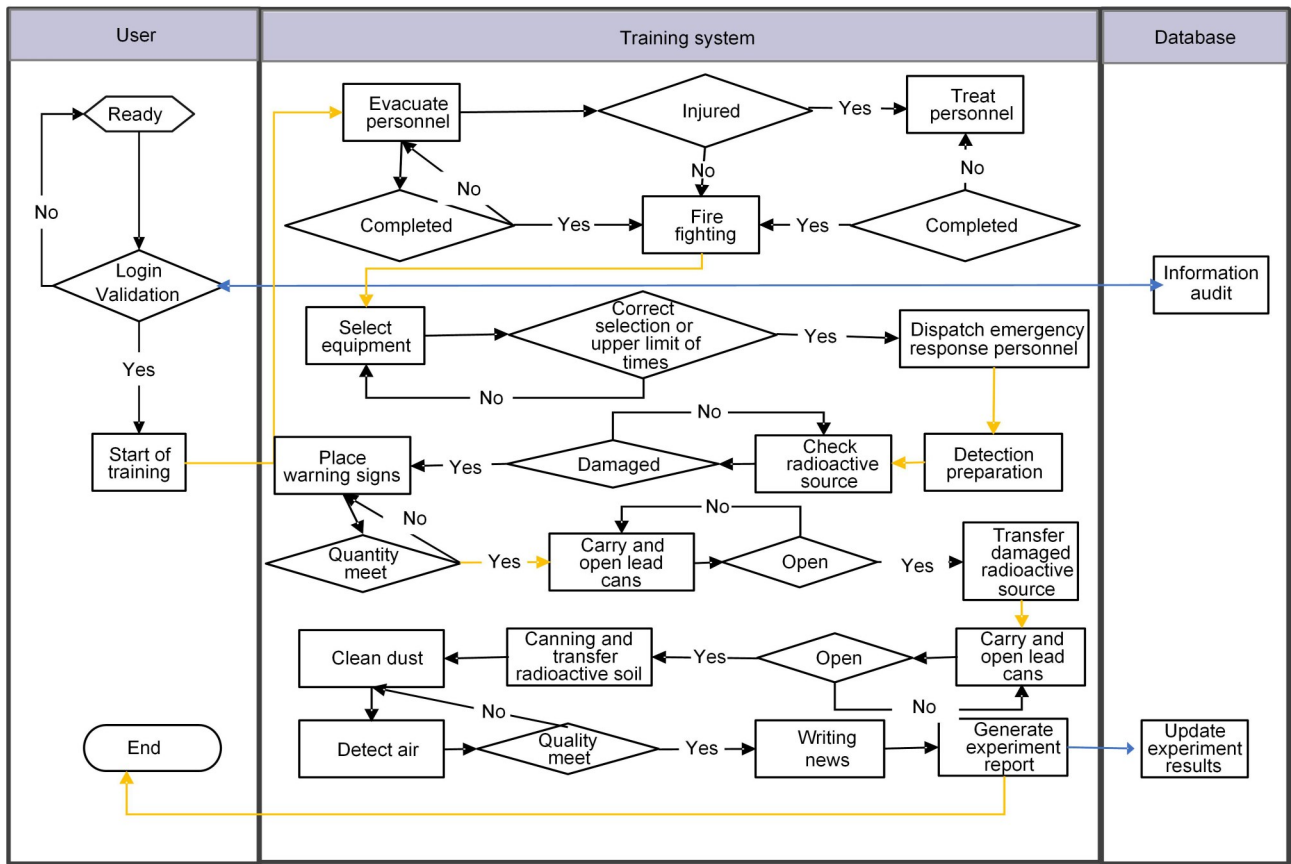


图 13 交互实验功能使用流程
 Fig.13 Interactive experiment function usage process



图 14 医护人员前往救助伤员
 Fig.14 Paramedics treating the wounded

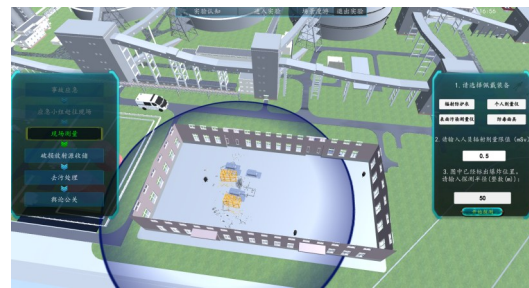


图 16 应急监测范围划定
 Fig.16 Delineation of emergency monitoring scope



图 15 应急装备选择
 Fig.15 Emergency equipment selection

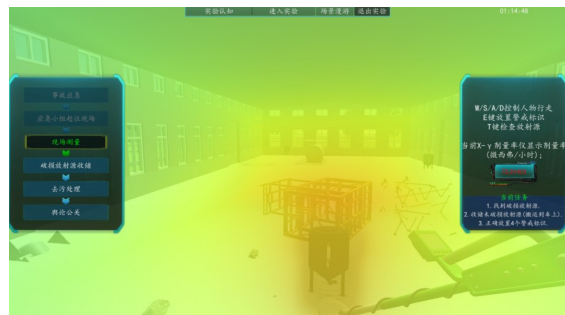


图 17 放射源探测
 Fig.17 Detecting radioactive sources

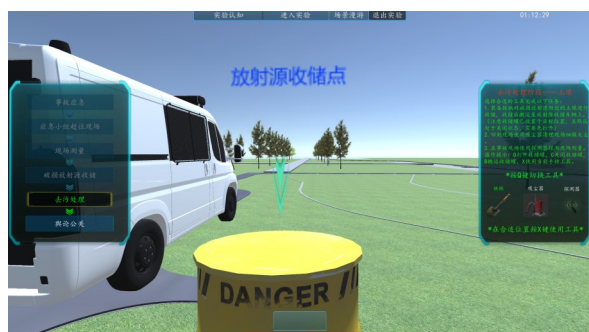


图18 去污处理
Fig.18 Decontamination treatment

5 结论与展望

本文针对核辐射事故应急救援培训，基于Unity3D引擎开发了核事故应急演练培训仿真系统，提出了一种基于特征重要性的自适应光线投射三维核辐射场可视化方法，实现了三维核辐射场可视化；基于有限状态机对多工种协同作业进行设计，从多工种角度还原了核辐射事故的应急处理流程，仿真结果真实直观，验证了本文方法的可行性。通过该系统开展人员的核事故应急救援培训，能够提高培训人员安全性，避免遭受额外的辐射危害，能够促进培训手段多样化，降低核辐射环境下人员培训成本。

后续可结合虚拟现实硬件设备，进一步提升沉浸式体验，也可以将该系统扩展应用到核电站、实验堆等核设施日常人员培训中。

作者贡献声明 吴强负责关键方法研究及系统功能开发,完成论文的撰写;田书建负责测试案例设计与实践应用;杨子辉负责技术方案与架构;孙国民负责三维辐射场计算;陶桂花负责系统的B/S架构及前端设计开发;陈威虎负责系统场景搭建和部分功能实现;王世鹏负责总体方案与论文指导。全体作者都阅读并同意最终的文本。

参考文献

- 1 中国核能行业协会. 全国核电运行情况(2022年1~12月)[EB/OL].(2023-02-02)[2023-3-2]. <https://www.china-nea.cn/site/content/42324.html>.
China Nuclear Energy Association. The operation status of nuclear power in China (2022 January-December)[EB/OL]. (2023-02-02)[2023-3-2]. <https://www.china-nea.cn/site/content/42324.html>.
- 2 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的核安全

[EB/OL]. (2019-09-03) [2023-3-2]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1663405/1663405.htm>.

The State Council Information Office of the People's Republic of China. Nuclear Safety in China [EB/OL]. (2019-09-03) [2023-3-2]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1663405/1663405.htm>.

- 3 刘杰, 郑晓磊, 龙鹏程, 等. 核事故应急救援数据库系统设计与应用[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, 39(2): 78-85. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rj.39.020602.
LIU Jie, ZHENG Xiaolei, LONG Pengcheng, *et al.* Design and application of the fundamental database system of nuclear accident emergency rescue[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, 39(2): 78-85. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2021. rj. 39. 020602.
- 4 王瑞英, 杨端节, 李雯婷, 等. 辐射事故应急演练准备与实施的规范化[J]. 中国辐射卫生, 2022, 31(1): 79-84. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.015.
WANG Ruiying, YANG Duanjie, LI Wenting, *et al.* Standardization of preparation and implementation of radiological emergency exercises[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2022, 31(1): 79-84. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.015.
- 5 邓多成, 陈春花, 阮方, 等. 基于多属性决策的核事故应急救援方案选择优化[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, 40(3): 100-106. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0018.
DENG Duocheng, CHEN Chunhua, RUAN Fang, *et al.* Optimization of the nuclear accident emergency rescue plan selection based on a multiple-attribute decision[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, 40(3): 100-106. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0018.
- 6 招泳州, 邵建章. 辐射事故处置分析[J]. 中国公共安全: 学术版, 2013, (1): 57-60. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2396.2013.01.014.
ZHAO Yongzhou, SHAO Jianzhang. Analysis on disposition of radiation accident[J]. China Public Security : Academy Edition, 2013, (1): 57-60. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2396.2013.01.014.
- 7 黄伊林, 龚行健, 毛位新, 等. 辐射事故应急演练的新实践与建议[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29(5): 570-574. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.031.
HUANG Yilin, GONG Xingjian, MAO Weixin, *et al.* The new practice and suggestion of radiation emergency drill [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2020, 29(5):

- 570-574. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.031.
- 8 贾亚宁, 郑晓磊, 陈春花, 等. 大规模核素扩散数据可视化方法研究与应用[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2018, **36**(5): 54-60. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.050701.
- JIA Yaning, ZHENG Xiaolei, CHEN Chunhua, *et al.* Research and application of a spatiotemporal visualization method for large-scale nuclide diffusion data [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2018, **36**(5): 54-60. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.050701.
- 9 曹欢, 杨子辉, 俞盛朋, 等. 氚扩散虚拟仿真系统原型研发及其应用[J]. 计算机系统应用, 2019, **28**(9): 118-124. DOI: 10.15888/j.cnki.csa.007045.
- CAO Huan, YANG Zihui, YU Shengpeng, *et al.* Development and application of tritium diffusion simulation prototype system[J]. Computer Systems & Applications, 2019, **28**(9): 118-124. DOI: 10.15888/j.cnki.csa.007045.
- 10 王逸夫, 王瑜, 邢素霞, 等. 基于改进光线投射法的冠脉图像三维重建[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, **38**(4): 431-435. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2021.04.007.
- WANG Yifu, WANG Yu, XING Suxia, *et al.* 3D image reconstruction of coronary angiography based on improved ray-casting volume rendering algorithm[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, **38**(4): 431-435. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2021.04.007.
- 11 Zhang Y, Chen Q Y, Wang H, *et al.* The visualization of 3D nuclear radiation dose field[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, **139**: 103896. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103896.
- 12 王静, 杨子辉, 何桃, 等. 力反馈数据手套在核能虚拟仿真中的应用研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2015, **33**(2): 020601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.020601.
- WANG Jing, YANG Zihui, HE Tao, *et al.* Application of data-glove-based virtual simulation for nuclear facilities operation[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2015, **33**(2): 020601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.020601.
- 13 杨子辉. 大规模辐射场景三维实时仿真关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- YANG Zihui. Study on key technologies of three-dimensional real-time simulation for large-scale radiation scenario[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- 14 陈威虎, 杨子辉, 夏源, 等. 基于数据驱动的氚粒子扩散三维仿真系统[J]. 计算机系统应用, 2022, **31**(1): 118-123. DOI: 10.15888/j.cnki.csa.008267.
- CHEN Weihu, YANG Zihui, XIA Yuan, *et al.* Three-dimensional simulation system of tritium particle diffusion based on data drive[J]. Computer Systems & Applications, 2022, **31**(1): 118-123. DOI: 10.15888/j.cnki.csa.008267.
- 15 曹欢, 胡丽琴, 杨子辉, 等. 基于虚拟现实的核事故救援在线仿真培训关键技术研究[J]. 计算机应用与软件, 2022, **39**(7): 121-127. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2022.07.019.
- CAO Huan, HU Liqin, YANG Zihui, *et al.* Key technologies of online simulation training for nuclear accident rescue based on virtual reality[J]. Computer Applications and Software, 2022, **39**(7): 121-127. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2022.07.019.
- 16 袁伟, 李藐, 李霄, 等. 某型装备典型核事故仿真动态演示系统的开发及实现[J]. 核安全, 2021, **20**(2): 85-91. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2021.02.013.
- YUAN Wei, LI Miao, LI Xiao, *et al.* Development and implementation of dynamic demonstration system for typical nuclear accident simulation of certain equipment [J]. Nuclear Safety, 2021, **20**(2): 85-91. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2021.02.013.
- 17 王成, 陈石磊, 冉新泽, 等. 《核事故医学救援虚拟仿真训练软件》研制与应用[J]. 中国辐射卫生, 2020, **29**(5): 563-566. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.029.
- WANG Cheng, CHEN Shilei, RAN Xinze, *et al.* Development and application of a virtual simulation training software for the nuclear accident medical rescue [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2020, **29**(5): 563-566. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.029.
- 18 郑臻华. 基于Unity3D的核事故医学应急处理模拟系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- ZHENG Zhenhua. The design and implementation of nuclear accident medical emergency treatment simulation system based on Unity3D[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- 19 Raja Shekhar S S, Venkata Srinivas C, Rakesh P T, *et al.* Online nuclear emergency response system (ONERS) for consequence assessment and decision support in the early phase of nuclear accidents – Simulations for postulated events and methodology validation[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, **119**: 103177. DOI: 10.1016/j.pnucene.2019.103177.