

录用批号	文章分类	文章编号	审稿费	稿件号	页面	收稿日期	20年月日
				CS		修回日期	

基于元宇宙的海上遇险自救演练应用研究

杨玉, 王翔, 蒋效伟, 徐子瑞

(江苏海洋大学, 计算机工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 海洋是我们生存的重要环境之一, 面对海上突发事件如何开展救助, 是每位海员都需要掌握的技能。然而, 传统的海上遇险自救演练存在着演练内容单调枯燥、形式僵化刻板等问题, 导致人们的参与度不高, 影响演练效果。元宇宙技术融合了虚拟现实技术、数字孪生技术以及人工智能技术等多种技术, 能够创建出高度沉浸式的虚拟环境。因此, 元宇宙技术的出现给海洋自救安全演练提供了一种新的途径。在讲述元宇宙技术的相关概念和海洋急救安全演练的研究现状的基础上, 利用元宇宙技术设计了一种新的海上自救演练模式, 构建了安全演练虚拟环境, 并借助物理模型辅助场景, 提升了演练的场景感与沉浸感。这种新型的演练模式在内容的丰富性和形式的多样性方面均呈现出显著优势, 有助于提升海员在遇险情况下的自救自护能力。

关键词: 元宇宙技术; 虚拟现实技术; 场景感与沉浸感; 出海遇险; 自救自护能力

中图分类号: (请作者自己填写)

文献标识码: (请作者自己填写)

分类号请参看: <http://www.jsjz.com/> 栏目

Research on the Application of Maritime Emergency Self-rescue Training Based on Metaverse

Yang Yu, Wang Xiang, Jiang Xiaowei, Xu Zirui

(School of Computer Engineering, Lianyungang 222005, China)

ABSTRACT: The ocean is one of the important environments for our survival, and how to carry out rescue in the face of maritime emergencies is a skill that every sailor needs to master. However, traditional maritime distress self-rescue drills have problems such as monotonous and rigid content, resulting in low participation and affecting the effectiveness of the drills. Metaverse Technological convergence virtual reality technology, digital twin technology, artificial intelligence technology and other technologies to create a highly immersive virtual environment. Therefore, the emergence of Metaverse technology provides a new way for marine self-rescue safety drill. On the basis of describing the relevant concepts of Metaverse technology and the research status of marine emergency safety drill, a new safety drill mode for self-rescue at sea is designed by using Metaverse technology, and a virtual environment for safety drill is constructed. With the help of physical models, the sense of scene and immersion of drill are improved. This new type of exercise mode exhibits significant advantages in terms of richness of content and diversity of forms, which helps to enhance seafarers' self-rescue and self-protection abilities in situations of distress.

KEYWORDS: Metaverse; Virtual reality; the sense of scene and immersion; the event of a maritime emergency; the self-rescue and self-protection ability

1 引言

随着海洋经济的不断发展, 海洋运输业和海洋观光旅游业也得到了蓬勃发展, 人们在开发利用海洋资源的同时也面临着海上突发事件日益增加的危险。为降低突发事件对生命财产的影响, 提高海员应对突发事件的能力特别是自救自护能力显得尤为重要。据海上搜救中心统计, 2022 年 9 月全国各级海上搜救中心共组织、协调搜救行动 152 次^[1]。这些事故发

生的原因, 既有技术生疏、操作失误等主观原因, 还有恶劣天气、不可预测的外界因素等客观因素。无论哪种原因导致的事故, 海员们必须随时准备应对, 以保障船舶和人员的安全。

为了能够提升海员在海上遇险时的自救自护能力, 海上遇险自救演练培训是行之有效的途径。目前, 海上遇险自救安全演练通常包括安全理论培训、手册培训和视频讲解培训等。然而, 传统培训由于技术和资金方面的原因, 缺乏针对特定海上遇险情况的个性化方案

批注 [翔1]: 文章标题 (中文 20 字以内, 两英文字符为一个汉字)

批注 [翔2]: 第一作者姓名, 第二作者姓名 (作者人数不能超过 4 个)

批注 [U3]: 六号, 固定行距 12 磅, 段后 12 磅, 居中, 多个单位按顺序排列。

批注 [翔4]: 稿件摘要篇幅应在 200 至 300 字 (5-6 行), 其中要包含有目的、方法、结果、结论四要素。全文篇幅为五号字体 (包括题目和文献, 此为送审模板, 请勿参照出刊书样) A4 纸张 4 页以上。

批注 [翔5]: 文 章 标 题 (英文)

批注 [翔6]: 正文, 宋体, 五号

批注 [翔7]: 1

制定, 缺少对海上遇险类型、时间地点等关键要素的设定, 形式过于僵化, 导致参与培训的海员对培训内容理解不够深刻, 参与度不高。近年来, 随着虚拟现实技术^[2-3]、人工智能技术、数字孪生技术^[4-8]、物联网^[9]、区块链技术等技术的不断发展, 海洋企业在信息化领域的投入不断加大, 海洋遇险自救演练迫切需要采用更加先进的技术手段, 以提高演练培训的效果。

元宇宙技术^[11-12]是一种融合虚拟现实、人工智能和数字孪生等技术的新技术, 能构建高度沉浸和交互的虚拟世界。元宇宙技术应用于海洋自救求生安全演练, 能构建虚拟的海洋环境和各种紧急遇险场景, 实现场景的实时交互和控制, 使参与演练的海员身临其境, 大大提高演练的真实性和效果。元宇宙技术使海上遇险自救求生演练内容更加丰富, 形式更加多样化, 有助于海员深入理解和熟练掌握自救技能, 达到提高应急响应和自我保护能力的目的, 对于海上人员安全培训意义重大。

2 基于元宇宙的虚实演练新范式

基于虚拟现实的海上遇险自救演练元宇宙, 将远程培训空间和存放安全演练环境数据的虚拟空间有机融合在一起, 形成了一个虚实融合共生的海上遇险自救演练系统。该系统的

架构如图 1 所示。

为提高海上遇险自救求生安全演练的效果, 我们采用了先进的信息技术手段, 结合元宇宙理论构建了一套数字孪生体系。通过整合船舶火灾感烟探测器数据、卫星遥感数据和多物理场传感器数据, 我们创建了一个海上险情数字孪生模型。在此基础上, 本研究还构建了一个海上险情虚拟现实场景。这个场景与海上险情数字孪生体相结合, 形成了具有真实感的灾害场景虚拟空间。受训人员可以通过穿戴 VR 设备进入元宇宙空间进行实践操作。在演练过程中, 受训人员能够借助 5G 技术进行语音交互和手势交互等实时沟通, 从而更加有效地开展海上自救安全演练。将海上遇险自救求生安全演练与元宇宙相关新技术、新应用相融合, 是提高培训效果的重要尝试。本研究将为海上遇险自救求生安全演练提供更为现实的元宇宙环境, 有助于提高受训人员在应对海上险情时的操作技能和实际应用水平。同时, 这一尝试也将为元宇宙领域的研究与发展带来新的启示, 推动相关技术在各行业的广泛应用。

- 批注 [王8]: 2-3
- 批注 [翔9]: 4-8
- 批注 [翔10]: 9
- 批注 [王11]: 1-12 的参考文献不用动

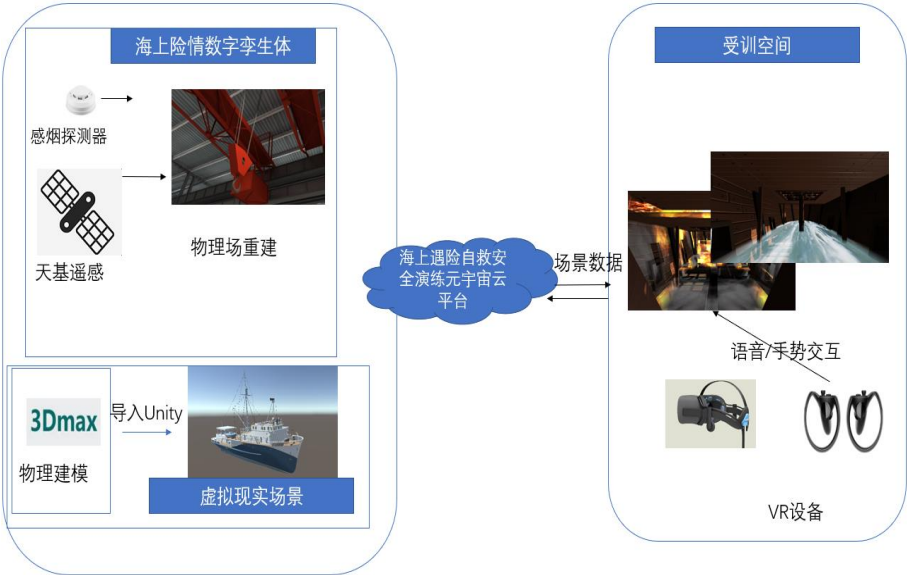


图 1 基于元宇宙的海上自救演练系统构建

2.1 数据层级

基于虚拟现实的海上遇险自救演练元宇宙含有多个数据层级，不同的数据层级之间存在着实时交互信息和灾害数据的交换。如图 2 所示：

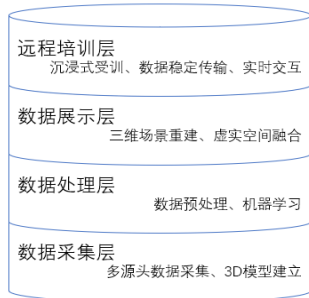


图 2 海上遇险自救演练元宇宙数据层级

数据采集层以统一数据接口的方式实现探测器数据、天基遥感数据和传感器多物理场数

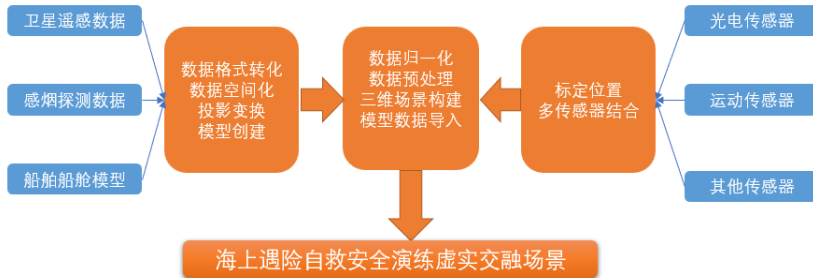


图 3 数据采集图

海上遇险自救安全演练虚实交融空间是指在元宇宙空间内，通过遥测探测模型数据和传感器数据构建出来的虚拟险情演练空间。这个空间的构建主要依赖于遥测探测数据和传感器数据。遥测探测数据包括卫星遥感数据、感烟探测器数据等，这些数据采集频率不同、结构不同，需要通过数据格式转化、数据空间化、投影转换等方法将它们整合在一起。在 3dmax 等建模软件中，可以构建船舶模型、数字人模型、船舶模型等，然后将它们导入到元宇宙空间中。传感器采集数据主要包括光电传感器、位置传感器，光电传感器主要采集不同火势大小时的火光的亮度的数据，位置传感器主要应用于虚

据的采集，在元宇宙空间内生成与灾害现场情况一致的灾害场景；数据处理层实现对灾害场景数据的预处理，并基于机器学习技术对受训时的场景开展智能分析，生成潜在危险区域、最佳逃生区域等辅助信息^[13]；数据展示层在元宇宙空间内营造出一个沉浸式“身临其境”培训空间；远程培训层基于智能人机交互技术、虚拟数字人技术^[14]、物联网技术、可靠性传输技术，为受训人员提供“面对面”的指导，协同开展数字化应急自救求生的演练。

2.2 面向海上自救的虚拟场景构建

基于虚拟现实的海上遇险自救演练元宇宙主要有以下几个关键功能：多源数据采集、三维场景重建^[15]、虚实空间融合、沉浸式灾害场景元宇宙空间构建、沉浸式受训。

2.2.1 多源数据采集

通过数据接口采集遥感数据、探测器数据、以及 3D 模型数据，构建应急自救演练元宇宙的数据基础，采集流程如图 3 所示。

拟船舶逃生。经过多种数据的采集与融合，可以构建出海上遇险自救安全演练虚实交融场景，让受训人员有身临灾害现场的经验。

2.2.2 多感官沉浸式虚拟现实体验

为了能够增强整体的灾害模拟真实性的效果，让受训人员有身临其境的感官体验，本文参考了何泽浩^[16]等人研究归纳各种交互技术以及设备在元宇宙沉浸式体验中的运用以及郭园^[17]等人提出的融合多元触觉和沉浸式视觉的可移植 VR 软件框架，构建了一套基于多感官融合的沉浸式体验^[18]系统，如图 4 所示。这一系统通过视觉、听觉、触觉、嗅觉与味觉等多感官手段，打造海上灾害场景的沉浸式虚拟环

境,实现海上灾害场景的高度还原,从而丰富了培训内容,极大提高了人员面对海上紧急情况的应急处置水平。本系统的研发不仅丰富了海上应急演练手段,也为海上救援与灾害管理提供了全新的技术支持平台。



图4 沉浸式体验系统

(1) 沉浸式视觉体验

沉浸式视觉体验依赖于VR、MR等扩展现实技术,同时又依赖于VR穿戴设备、以及全息影像设备。在海上遇险自救求生安全演练中,我们采用VR技术,参与演练的人员通过穿戴VR设备(市面上主要的几款VR设备见表1)在元宇宙中进行自救求生演练。

表1 主要VR设备

名称	公司	刷新率
Oculus Rift	Meta	90Hz
HTC Vive	HTC	90Hz
Morpheus	Sony	120Hz

船舶内船舱失火场景中,Rendering算法可以用于生成真实的三维船舱场景,并对该场景进行透视投影、光照、阴影等处理,以呈现一个逼真的船舱失火现场。在船舱失火应急自救逃生训练中,利用Rendering算法可以提高受训者的应急自救逃生能力和对船舱失火的认识和理解。使用Unity3D引擎生成一个船舱模型,并添加燃烧、烟雾等效果,以模拟船舱失火的场景。在模型的建立过程中,可以采用基于物理的材质属性来增加真实感。同时本文参考了吴波^[9]等人的Phong光照模型的渲染技术,模拟现实中的光照效果,可以使用环境光、点光源、平行光等不同类型的来源来模拟不同的光照效果。为了增加演练时的难度,将其作为演练成绩评定的指标之一,设置不同的光照强度和颜色,以呈现逼真的光照效果。光照模型的总光照强度可以用下面的公式来表示:

$$I(\vec{p}) = I_{ambient}(\vec{p}) + I_{diffuse}(\vec{p}) + I_{specular}(\vec{p}) \quad (1)$$

$I(\vec{p})$ 表示物体表面的某一点, $I_{ambient}(\vec{p})$ 、

$I_{diffuse}(\vec{p})$ 和 $I_{specular}(\vec{p})$ 分别表示环境光、漫反射光和镜面反射光在该点的光照强度。具体地,环境光的光照强度可以表示为:

$$I_{ambient}(\vec{p}) = k_a \cdot C_a \quad (2)$$

其中 K_a 表示环境光系数, C_a 表示物体表面的颜色。对于船舱内的墙壁和地面,可以采用漫反射(diffuse)光照模型来计算其光照强度。漫反射光照模型基于光源与物体表面的角度,计算物体表面各点对光的反射强度。其公式为:

$$I_{diffuse}(\vec{p}) = k_d \cdot C_d \cdot \sum_{i=1}^n (\vec{n}_i \cdot \vec{l}_i) \quad (3)$$

其中, K_d 表示漫反射系数, C_d 表示物体表面的颜色, \vec{n}_i 表示物体表面在点 \vec{p} 处的法向量, \vec{l}_i 表示从点 \vec{p} 到光源 i 的方向向量, n 表示光源的个数。

对于船舱内的火焰和灯光,我们可以采用高光specular光照模型来计算光照强度。高光光照模型基于光源和视点之间的角度,计算物体表面上镜面反射的亮度。其公式为:

$$I_{specular}(\vec{p}) = k_s \cdot C_s \cdot \sum_{i=1}^n (\vec{r}_i \cdot \vec{v})^n \quad (4)$$

(2) 沉浸式听觉体验

沉浸式听觉体验对于构建元宇宙环境至关重要。在船舱失火应急自救逃生场景中,听觉体验可以通过基于HRTF算法生成3D立体声来实现。HRTF算法是一种模拟人耳接收声音时的传递函数模型,用于产生3D立体声效果。该算法的核心在于根据人耳头部的形状和耳朵的位置,计算声波在头部的传递路径和频率响应,从而模拟出不同方向和距离的声音效果。HRTF声学模型可以用以下公式表示:

$$HRTF(\theta, \phi, f) = F(\theta, \phi, f) \cdot G(\theta, \phi, f) \quad (5)$$

其中, θ 和 \varnothing 分别表示声源相对于头部的水平和垂直角度, f 表示声音的频率。 $F(\theta, \varnothing, f)$ 和 $G(\theta, \varnothing, f)$ 分别表示空间传递函数和频率响应函数。在本文中我们利用 HRTF 算法模拟演练空间船舱的等声音效果, 提高场景的真实感和身临其境感。

为了增加听觉体验的真实性我们还采用了元宇声技术,它融合了对象技术、声道技术和声场技术,实现了听觉沉浸的极致体验。该技术基于符合国际标准的全息声学技术,结合双耳声学原理,通过声源定向算法达成精准的声源方向定位。声源定向是指根据声音的到达时间和幅度等参数来确定声源的方向,以便调整声音的输出方向和强度。常用的声源定向算法包括各向差分法和时延估计法。其中,各向差分法是根据麦克风之间的差异性来计算声源方向的,各向差分法的核心在于利用麦克风阵列中的两个或多个麦克风的差分信号来计算声音的到达方向。其公式为:

$$d(\theta) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i(t) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f_c \cdot T_i(\theta)} \quad (6)$$

其中, $d(\theta)$ 表示声音信号在方向 θ 下的差分信号, w_i 表示权重系数, $s_i(t)$ 表示第 i 个麦克风的信号, f_c 表示信号的中心频率, $T_i(\theta)$ 表示到达第 i 个麦克风的时延。

综合运用以上算法,可以在船舱失火应急自救逃生场景中实现逼真的声音效果,同时也能考察受训人员是否能够准确地辨别声源的位置、大小和方向,以及是否能够根据声音特性做出正确的判断和决策。

(3) 沉浸式触觉体验

沉浸式触觉体验的目的是让用户体验虚拟环境中模拟出的物理触感。我们采用触觉反馈服来实现触觉模拟。这款服装使用导电纤维与绝缘纤维组成的柔软布料制成,可以在虚拟环境中进行供电与通信。结合头戴显示器呈现的视觉与听觉信息,通过反馈模块(振动器)产生振动反馈^[17],从而实现用户与虚拟对象之间

的接触感受。同时,为了在船舱失火应急自救逃生场景中模拟物体接触感觉,可以使用触觉反馈算法和碰撞力模型。触觉反馈算法通过 PWM 算法控制振动马达,从而产生不同频率和强度的振动信号,模拟物体接触时的感觉。碰撞力模型通过动量定理计算接触力,并将其转化为振动参数。具体地,可以使用以下公式计算振动参数:

$$V = \frac{F_n \cdot t}{m} \quad (7)$$

其中, V 为振动速度, F_n 为法向接触力, m 为物体质量, t 为时间。根据振动速度可以进一步计算振动频率和振动幅度,从而实现不同类型物体接触感觉的模拟。

利用触觉反馈算法和碰撞力模型,可以判断受训者在操作过程中是否达到了预期的力度或范围,评估他们在虚拟环境中的操作技能是否达标。

(4) 沉浸式嗅觉体验

在构建沉浸式的元宇宙环境中,嗅觉模拟是实现多感知融合与高保真模拟的关键所在。气味是我们感知与记忆世界的基础,嗅觉信息的加入有助于营造出身临其境的虚拟体验。我们采用沉浸式面罩来实现嗅觉模拟。该面罩目前内置 5 个墨盒,每个墨盒可容纳 1 种香水,可以模拟出多种气味。例如,在船舱失火灭火模拟场景中,嗅觉体验可以通过控制面罩内气味墨盒电机的转动速度和时间来实现。具体来说,可以根据不同的场景和事件,采用气味释放模型来控制气味墨盒的释放,使其释放不同的气味分子,产生不同的嗅觉刺激。具体的气味释放模型如公式(8)所示:

$$O(t) = \sum_{i=1}^n w_i C_i(t) \quad (8)$$

其中, $O(t)$ 是时间 t 时刻空气中的气味浓度, $C_i(t)$ 是第 i 种气味分子在时间 t 时刻的浓度, w_i 是第 i 种气味分子的权重, n 是气味种类数。这个模型可以根据场景与事件来调整不同气味分子的权重和释放时间,以产生不同的嗅觉体验。其中, $C_i(t)$ 的计算可以使用

以下公式:

$$C_i(t) = \frac{Q_i(t)}{V(t) \cdot V(m)} \quad (9)$$

其中, $Q_i(t)$ 是第 i 种气味分子在时间 t 时刻的释放量, $V(t)$ 是时间 t 时刻的舱室空气体积, $V(m)$ 是气味分子的摩尔体积。释放量 $Q_i(t)$ 可以根据控制气味墨盒电机转动速度及时间等因素来计算。

通过气味释放模型观察受训者在面对特定气味刺激时的行为和反应,可以评估他们在应对突发事件时的反应能力。

(5) 沉浸式味觉体验

在构建沉浸式元宇宙环境中,我们采用味觉模拟电极来模拟船舱内遇险后食物与水的味觉体验。味觉模拟电极由控制模块与口腔接口两部分组成。控制模块(如图6所示)生成味觉刺激;口腔接口将刺激信号传递给使用者。在训练中,使用者口含口腔接口。电极触及舌尖后,通过控制模块快速调节温度与电流,生成味觉刺激以模拟水的冰凉感觉,营造出船舱进水后的体验。味觉在构建虚拟现实环境中发挥重要作用。味觉体验是通过产生不同的电流和温度刺激来模拟不同的味觉感受。其中,温度控制算法^[21]采用 PID 控制电加热丝温度,可以表示为:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

其中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数, $e(t)$ 为温度偏差, $u(t)$ 为加热丝电压控制信号。电流变化算法采用 PWM 方法调节输出电流,可以表示为:

$$D = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (11)$$

其中, D 为 PWM 占空比, T 为 PWM 周期, $f(t)$ 为 PWM 调制函数。通过改变占空比 D ,可以调节输出电流的强度,从而模拟不同的味

觉感受。

通过控制不同的温度,模拟高温或者低温环境,将观察受训者在面对温度控制算法引发的不同温度变化时的表现,间接地作为演练成绩评价指标之一。

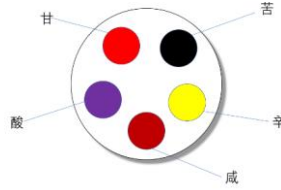


图6 味觉电极控制模块

2.3 虚实交融空间安全演练

在虚拟受训环境中,我们采用 UE4 虚拟引擎构建船舱灭火训练场景,使受训人员通过穿戴 HTC 头盔实现身临其境的交互体验。空间内的粒子系统控制火势大小,受训人员根据火势选择不同灭火器材进行灭火。在海上险情场景构建过程中,我们采用模型、动画、粒子、音效与灯光等手段,设计出真实的火焰亮度与烟雾效果,模拟船舶火灾现场。在整个演练过程中,需要设置大量设备间的互联,以展现出真实的自然灾害情况。所有设备采用 5G 技术进行连接,实现多个系统间的互动,不受空间限制,也加强对设备的管理。在 5G 技术

的支持下,我们构建的元宇宙技术场景实现了高度沉浸式的体验,满足元宇宙技术在灾害情境下的使用需求。元宇宙技术借助于虚拟现实与增强现实等前沿技术,打造出高度模拟真实的交互环境。在这样的环境中,多个系统通过高速无线通信实现联动,营造出如同真实世界的多感官体验。这需要借助虚拟引擎构建场景,采用模型、动画、粒子与光照等手法模拟真实的视觉效果;需要通过高保真的声音与触觉设备营造真实的听觉与触觉感受;需要设置复杂的设备互联与环境互动,如同现实世界那样展现灾难的全貌。

通过 UE4 虚拟引擎构建的船舱灭火训练

批注 [W用12]: 所有公式在正文中要有明确的引用,不能是如下公式所示,或如上公式所示,要明确为如公式(9)所示

场景,配合 5G 技术实现的多系统互动,达成了高度模拟真实的灾难情境。在这样的环境中进行培训,可以大大提高应急响应的效率与准确性,这也展现出元宇宙技术在高风险工作场景中的重要应用潜力。

3 系统应用

3.1 身份认证

基于元宇宙技术的海上遇险自救演练应用系统部署在云端,可以使用虚拟现实头盔随时随地接入,它的应用场景为:在开展海上遇险自救演练培训时,在培训中心通过服务器加载各种沉浸式海上险情元宇宙场景,当受训人员头戴虚拟现实头盔进入海上险情虚实交融元宇宙空间时(图 7),大屏会首先让你进行元宇宙身份认证(图 8),受训人员需要选择自己的身份,以便系统根据你的身份来制定演练的难度。



图 7 设备穿戴



图 8 身份认证

3.2 选择受训场景

当我们选择完自己的身份后,再来到受训场景元宇宙空间的选择上,受训场景主要有两个:破舱进水和船舱着火,如图 9 所示。破舱进水受训场景内部,主要仿真模拟船舶在遭遇撞击等其他突发事件后,船舱进水的情况。船舱着火受训场景内部,主要仿真模拟船舶内部失火的突发情况。



图 9 场景选择

3.3 虚拟训练

在本研究中,我们用基于数字技术的仿真模拟方法,构建船舱内部火灾场景(如图 10 所示)。参训者通过虚拟现实设备进入构建的元宇宙训练空间,计算机根据选择的船舱失火场景,生成虚拟火源的坐标。训练空间内设置有脚步传感器,用于探测参训者当前位置。此外,训练空间还设置有烟机、热风机与烤板,以模拟火灾现场的烟雾、靠近火源时的热风与烘烤效果。脚步传感器将探测到的信号传递至控制器,控制器计算参训者当前位置与虚拟火源之间的距离,并根据距离控制热风机与烤板的开关及功率,使系统模拟出更加真实的效果,提高参训者的代入感。我们采用数字技术构建的船舱内部火灾仿真场景,设置有脚步传感器、烟机、热风机与烤板,可以根据参训者位置与虚拟火源距离,产生烟雾、热风与温度变化等多种效果,模拟火灾现场。参训者通过虚拟现实设备进入该场景,进行火灾演练,这种基于数字技术的高度模拟真实的环境,可以提供沉浸式的交互体验,大大提高训练效果。

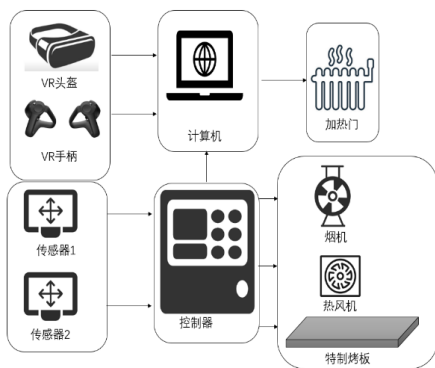


图 10 基于元宇宙的船舱失火训练系统

在受训者进入演练空间后，将使用 VR 手柄来实现交互，完成演练中的既定任务，如图 11 所示，受训者在演练空间内抓取灭火器，对船舱内进行灭火，从灭火开始到灭火结束，如图 12-13 所示。



图 11 抓取灭火器



图 12 开始灭火



图 13 灭火结束

3.4 成绩评估

为了科学全面地评定受训人员的成绩，本研究结合了海上船舶故障虚拟求生演练大纲，主要从完成演练任务的时间、设备操作正确率、演练难度以及反应时间这 4 个方面对受训人员的成绩进行评定。在演练过程中，每名受训人员的专业能力以及所选择的受训场景不同，影响受训人员的成绩的因素也很复杂，所以用常规的方法很难准确合理地给出受训人员的成绩。因此，在不参照任何先验知识的情况下，依据受训人员在演练过程中的各方面表现和演练难度的数值特征，对他们进行聚类分析，由此给出的受训人员的成绩就比较合理。

模糊聚类^[22]是一种无监督学习的算法，其目标是将数据集中的样本分成若干个不同的群组或簇。相比于传统的硬聚类，模糊聚类允许一个数据点属于多个簇，而不是只能属于一个簇。

模糊聚类的原理基于模糊集合理论，其中每个样本都被看作是一个隶属度向量，表示该样本属于每个簇的概率大小。通过迭代计算每个样本对每个簇的隶属度，不断更新聚类中心，使得每个样本的隶属度更加接近实际情况，从而达到聚类的目的。

在这里，我们设某一批次的分类的受训人员的样本为 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，其中 n 为参与演练的总人数。评价每个受训人员的表现又有 m 个属性，即 $x_k=(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km})$ ，本研究将把样本划分 2 类。

本文中采用的是模糊 C 均值聚类算法 (Fuzzy C-means Clustering, FCM) 算法。FCM 算法通过最小化代价函数可将一组样本数据

分成若干个类别，其中代价函数包括样本到聚类中心的距离和样本与各个聚类中心的关系矩阵。

FCM 算法的代价函数见式 (12)：

$$\min J(U,V)=\sum_{i=1}^N\sum_{j=1}^Cu_{ij}^m\|x_i-v_j\|^2 \tag{12}$$

其中 u_{ij} 表示第 i 个样本与第 j 个聚类中心之间的关系程度， m 为模糊度参数， v_j 表示第 j 个聚类中心的位置。在 FCM 算法中，每个样本可以被分配到多个聚类中心中，因此关系程度 u_{ij} 需要满足以下条件：

$$\sum_{j=1}^Cu_{ij}=1,i=1,2,\cdots,N \tag{13}$$

同时聚类中心需要满足以下条件：

$$\sum_{i=1}^Nu_{ij}^m>0,j=1,2,\cdots,C \tag{14}$$

为了得到最优关系矩阵 U 和聚类中心矩阵 V ，FCM 算法采用迭代优化的方式。具体来说，算法首先随机初始化关系矩阵 U 和聚类中

心矩阵 V ，然后通过以下公式更新它们：

$$v_j=\frac{\sum_{i=1}^Nu_{ij}^mx_i}{\sum_{i=1}^Nu_{ij}^m} \tag{15}$$

$$u_{ij}=\frac{1}{\sum_{k=1}^C\left(\frac{\|x_i-v_j\|}{\|x_i-v_k\|}\right)^{\frac{2}{m-1}}} \tag{16}$$

其中， m 为模糊度参数，控制了聚类结果的模糊程度。当 $m=1$ 时，FCM 算法退化成硬聚类（Hard Clustering）算法。在迭代过程中，如果关系程度矩阵 U 的变化量小于某个阈值 θ ，或者达到了最大迭代次数，则停止迭代。最终得到的关系程度矩阵 U 和聚类中心矩阵 V ，可以用来对新样本进行分类。

在本次演练中，有 20 名来自不同职业的人参与了海上遇险自救演练，整个演练过程汇总每个人的表现的归一化后的属性值见表 2：

表 2 受训人员的表现

样本编号	任务时间	心理素质心率	反应时间	难度系数
x1	0.465	0.1071	0.2381	0.4543
x2	0.625	0.9429	0.7143	0.3664
x3	0.995	0.3	0.4286	0.4231
x4	0.175	0.7929	0.1429	0.5514
x5	0.155	0.6857	0.5238	0.5352
x6	0.92	0.5214	0.3333	0.5863
x7	0.695	0.35	0.4286	0.4717
x8	0.63	0.3571	0.5238	0.6897
x9	0.18	0.6786	0.7143	0.5255
x10	0.295	0.3643	0.3333	0.4149
x11	0.07	0.2214	0.7143	0.5061
x12	0.465	0.5286	0.8095	0.5978
x13	0.96	0.75	0.7143	0.3255
x14	0.195	0.8429	0.6190	0.4525

样本编号	任务时间	心理素质心率	反应时间	难度系数
x15	0.875	0.2786	0.2381	0.4954
x16	0.13	0.3571	0.9048	0.7395
x17	0.04	0.9	0.1429	0.4801
x18	0.43	0.6143	0.4286	0.8069
x19	0.245	0.1929	0.6190	0.4963
x20	0.015	0.4429	0.5238	0.4512

其中难度系数的计算公式为：

$$d = I(\bar{p}) \bullet HRTF(\theta, \varnothing, f) \bullet u(t) \bullet F_n \bullet O(t) \quad (17)$$

难度系数的数值特征是将五大感官效果难度的数值的归一化后的数值的乘积，

$I(\bar{p})$, $HRTF(\theta, \varnothing, f)$, $u(t)$, F_n , $O(t)$ 分别是式(1), 式(5), 式(7), 式(8), 式(10)线性归一化后的值。

我们将使用 FCM 算法对这 20 个受训人员进行聚类分析，得出最优分类矩阵 U^* 和 V^* 如下：

$$U^* = \begin{pmatrix} 0.65700291 & 0.34299709 \\ 0.48299098 & 0.51700902 \\ 0.88128033 & 0.11871967 \\ 0.29286173 & 0.70713827 \\ 0.03779049 & 0.96220951 \\ 0.89310787 & 0.10689213 \\ 0.97836909 & 0.02163091 \\ 0.82603385 & 0.17396615 \\ 0.0775548 & 0.9224452 \\ 0.35903207 & 0.64096793 \\ 0.24263009 & 0.75736991 \\ 0.37949325 & 0.62050675 \\ 0.70285456 & 0.29714544 \\ 0.13962844 & 0.86037156 \\ 0.88426956 & 0.11573044 \\ 0.26368858 & 0.73631142 \\ 0.28025328 & 0.71974672 \\ 0.40568479 & 0.59431521 \\ 0.3319218 & 0.6680782 \\ 0.10980198 & 0.89019802 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$V^* = \begin{pmatrix} 0.7202475 & 0.41944022 & 0.43502257 & 0.50704862 \\ 0.21043235 & 0.57805086 & 0.55386659 & 0.5247585 \end{pmatrix} \quad (19)$$

式中： u_{ik}^* 为第 k 个受训人员隶属于第 i 个聚类中心的隶属度，是根据式 16 来计算， $i=1,2, \dots, k=1,2, \dots, 20$; V_{im}^* 为第 m 个表现的第 i 个聚类中心，根据式 15 计算， $i=1,2, m=1,2,3,4$ 。如果我们将聚类中心分为一类，则总体的聚类中心为：

$$V = [0.428 \ 0.511435 \ 0.5047619 \ 0.51849] \quad (20)$$

由式(19)和式(20)可以看出：第 2 类受训人员的聚类中心与总体的聚类中心相比较，后 3 个表现的值高于聚类中心，而第 1 类是 2 个表现的值高于总体的聚类中心的值，因此我们把第 2 类的人员归为合格类型。

为了能够更直观地看出数据样本的分布，我们这里给出了 FCM 算法的 20 个样本的聚类效果，如图 14 所示。

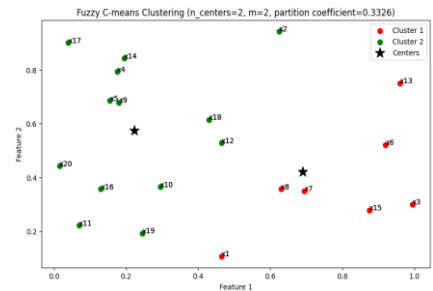


图 14 模糊 C 均值聚类效果图

从图 14 中，我们可以看出有两个聚类中心，依据最大隶属度原则给出各受训人员的表现评估。经分析后得出各受训人员的表现评估见表 3。

表 3 受训人员的表现评估

表现	受训人员编号
合格	x2 x4 x5 x9 x10 x11 x12 x14 x16 x17 x18 x19 x20
不合格	x1 x3 x6 x7 x8 x13 x15

4 结束语

本研究着重探讨了元宇宙技术与海上遇险自救演练相结合的创新性途径。在此基础上,通过采用先进的数字技术和虚拟现实手段,我们成功地实现了虚实场景的融合,从而创建一个高度模拟真实的三维交互培训环境。这种沉浸式的培训体验突破了传统培训方法的局限,为海上安全事故的预防与应对提供了有力支持。在理论与实践层面,这一研究具有重要价值,为决策与演练培训等高风险环境提供了全新途径。

面向未来,随着元宇宙技术及相关领域的持续成熟与发展,我们有理由相信该技术将在更广泛的高风险工作领域发挥重要作用,推动培训手段迈向革命性进步。尤其是在当前全球范围内关注度日益提升的海洋安全问题背景下,作为新一代培训手段的元宇宙技术有望引领培训方法的革命性变革与进步,为高风险工作环境中的决策和演练培训等提供更加真实、有效的支持。因此,本研究在理论和实践方面具有重大意义,值得我们继续深入探究和发展。

参考文献:

- [1] 中国海上搜救中心. 2022 年 9 月份全国海上搜救情况[EB/OL]. <https://xxgk.mot.gov.cn>.
- [2] 范丽亚, 于文江, 韦骞, 缪相林. 2021 年扩展现实(XR)热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(01): 184-195.
- [3] 许世健, 赵丹, 苏毓宇等. 面向流场可视化的沉浸式虚拟现实交互系统研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(05): 1160-1172.
- [4] 陆涵, 张霖, 王昆玉等. 装备数字孪生可信评估框架研究[J/OL]. 系统仿真学报: 1-14[2023-04-29]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0057>.
- [5] 齐波, 张鹏, 张书琦, 赵林杰, 王红斌, 黄猛, 唐志国, 冀茂, 李成榕. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(05): 1522-1538.
- [6] 张艳丰, 欧志梅. 数字孪生技术驱动下智慧图书馆场景化服务模式研究[J]. 情报理论与实践, 2022, 45(08): 47-53.
- [7] 孙滔, 周铖, 段晓东, 陆璐, 陈丹阳, 杨红伟, 朱艳宏, 刘超, 李琴, 王晓, 沈震, 瞿逢重, 蒋怀光, 王飞跃. 数字孪生网络(DTN): 概念、架构及关键技术[J]. 自动化学报, 2021, 47(03): 569-582.
- [8] Shen Nanyan, Wu Yang, Li Jing, He Tianqiang, Lu Yushun, Xu Yingjie. Research on procedure optimisation for composite grinding based on Digital Twin technology[J]. International Journal of Production Research, 2023; 61(6): 1736-1754.
- [9] 李伯虎, 柴旭东, 张霖等. 面向智慧物联网的新型嵌入式仿真技术研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(03): 419-441.
- [10] 王美丹, 王晓丽, 曹磊, 王亮, 裴佑, 刘智. 区块链技术在电力基建工资支付领域的应用探索[J]. 建筑经济, 2022, 43(S2): 444-449.
- [11] 王文喜, 周芳, 万月亮, 宁焕生. 元宇宙技术综述[J]. 工程科学学报, 2022, 44(04): 744-756.
- [12] 杨健, 张安山, 庞博, 张凯, 鲍朱杰, 李佳潼, 王斐亮. 元宇宙技术发展综述及其在建筑领域的应用展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-14.
- [13] 姚艳霞, 苗双喜, 黄旭, 张波. 耦合 Rothermel 模型与粒子系统的林火蔓延模拟方法[J]. 测绘通报, 2022(08): 75-80.
- [14] 郭嘉. 虚拟数字人在图书出版领域的多元身份构建研究[J]. 科技与出版, 2022(08): 56-63.
- [15] 陈义飞, 郭胜, 潘文安, 陆彦辉. 基于多源传感器数据融合的三维场景重建[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(02): 80-86.
- [16] 何泽浩, 曹良才. 面向沉浸式元宇宙的显示、交互和应用[J]. 科技导报, 2023, 41(05): 6-14.
- [17] 郭园, 童倩倩, 郑宇铠等. 融合多元触觉和沉浸式视觉的可移植 VR 软件框架[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(07): 1385-1392.
- [18] 彭兰. 元宇宙之路的近虑与远忧——基于用户视

角的需求-行为分析[J]. 探索与争鸣, 2022 (07) : 78-85+178.

[19] 吴波, 陈春晓, 徐劲力. 汽车主减速器虚拟装配中的关键技术研究[J]. 机械设计与制造, 2021 (09) : 274-278+282.

[20] Wei Chen, Xiaochen Wang, Ruimin Hu, Gang Li, Weiping Tu. Interpolation Method of Head-Related Transfer Functions Based on Common-Pole/Zero Modeling[J]. 中国通信, 2020, 17 (10) : 170-182.

[21] 雷翔霄, 唐春霞. 基于自适应模糊 PID 算法的镀液温度控制[J]. 电镀与精饰, 2021, 43 (08) : 35-38.

[22] 魏文军, 李政, 武晓春, 高利民. 基于模糊聚类算法

的 S700K 型电动转辙机运行状态评估[J]. 铁道学报, 2022, 44 (04) : 74-81.

作者简介:

第一作者姓名 (1982-), 女 (满族), 山东省青岛市人, 硕士研究生, 主要研究领域为 XXXXXX。

第二作者姓名 (1964-), 男 (汉族), 山东省青岛市人, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为 XXXXXXXX。

联系方式: (表格不要截断)

第一作者	其他作者	题 目	详细通信地址	邮编	手机、电子邮箱
			省市区路号		

注意事项: 此模板为送审排版格式, 非印刷排版, 请尽量此排版要求实在不会排版双栏, 单栏也可, 建议您直接将内容复制于此文档中。其他要求见下:

【中英文】

文章的题目、作者姓名、作者单位、摘要和关键词都要有英译文, 缺一不可, 而且一定要中英文对应。

例如: 作者姓名英译文格式: ZHANG Ying (张 英) WANG Xi-lian (王希连) ZHUGE Hua (诸葛华)。

【正 文】

文章的章节号规定如下。文章的第一部分应命名为“引言”, 也要编章节号, 而且应为“1”, 以后的章节要顺序往后编写。

【篇 幅】

文章全文的长度应在 5000 至 6000 字左右 (A4 纸五号字五页左右)。

【三线表】

文中的表格一律改成“三线表”, 即所有的竖线全部去掉, 横线只留三条即表头的两条线和表格最下面的一条线。若内容不适合做成三线表请做成图, 注意更改图编号。

【图 形】

文中图形格式: JPG、BMP 或 TIF, 分辨率选择要保证图形清晰, 特别是屏幕打印图形 (确保全文不超过 2M)。绘制图形的颜色使用黑白, 避开黄色或其它浅色 (特别是曲线图)。

【参考文献】

凡是互联网上的资料、单位内部文件和资料、没有书刊号的论文集、没有正式发表的学位论文、随机的用户指南和使用说明 (手册), 这些都不能做参考文献。

书写格式和内容如下:

作者 (个人或单位). 文献题目[文献类型]. 文献出处 (专著为出版单位; 期刊为期刊名称; 论文集集中的文章为论文集名称; 学位论文为学校名称; 报告为所出单位; 标准为制定单位; 专利为申请或批准单位), 文献出版年月 (其中期刊要包括年份、卷号、期号); 页码。

文章题目后面的为参考文献类型:

具体如下: 专著—M、论文集—C、报纸文章—N、期刊文章—J、学位论文—D、报告—R、

12

标准—S、专利—P，未说明类型的文献—Z。

【作者简介】

文中**所有的作者**都要有简介，且均要符合以下格式。并置于文章的参考文献后。

例如：姓名（出生年月—），性别（民族），籍贯，学位，职务，职称，主要研究方向，主要科研成果（此项可略）。