

人工智能代理驱动下的平行博物馆智慧管控

鲁越¹, 郭超², 倪清桦³, 李华飙⁴, 王春法⁴, 王飞跃²

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;

3. 澳门科技大学, 澳门 999078;

4. 中国国家博物馆, 北京 100006)

摘要: 博物馆负责海量文化遗产的保管、研究、传播等工作。随着人工智能技术的飞速发展, 社会对博物馆智能化水平的要求不断提高。以大语言模型和人工智能代理为代表的通用人工智能取得了里程碑式的进展, 给新时代博物馆建设提供了新技术支撑。以平行智能和平行博物馆系统为平台, 提出了人工智能代理驱动的人机混合博物馆管理架构, 从而发挥平行博物馆虚实交互与平行执行的框架作用。阐述了智能代理驱动下的平行博物馆系统架构与关键技术, 基于人工系统构建智能代理的生产工厂和运行平台, 利用计算实验进行博物馆的建模和智能代理的训练, 通过自然人、数字人和机器人构建人机混合的智能代理团队, 实现虚拟博物馆与实体博物馆的平行执行与迭代优化。最后, 介绍了智能代理驱动下的平行博物馆典型案例。

关键词: 平行博物馆; 智慧博物馆; 平行系统; 人工智能代理

中图分类号: G26

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202415

AI agent-driven intelligent management and control of parallel museums

LU Yue¹, GUO Chao², NI Qinghua³, LI Huabiao⁴, WANG Chunfa⁴, WANG Fei-Yue²

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

2. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

4. National Museum of China, Beijing 100006, China

Abstract: Museums are responsible for the preservation, research and dissemination of vast cultural heritage. With the rapid development of artificial intelligence technology, society's demand for the intelligence level of museums is increasing. General artificial intelligence represented by large language models and artificial intelligence agents has achieved milestone progress, providing new technological support for the construction of museums in the new era. The artificial intelligence agent-driven human-machine hybrid museum management architecture was proposed based on parallel intelligence and parallel museum systems, thereby further leveraging the framework of parallel interaction and parallel execution of parallel museums. The system architecture and key technologies of intelligent agent-driven parallel museums were elaborated. Parallel execution and interaction optimization between artificial museums and real museums were realized by building a production factory and operation platform for intelligent agents based on artificial systems, using computational experiments to model museums and train intelligent agents, and constructing a human-machine hybrid intelligent agent team composed of biological workers, digital workers, and robotic workers. Finally, typical cases of intelligent

收稿日期: 2024-04-10; 修回日期: 2024-05-22

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.61533019)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (No.61533019)

agent-driven parallel museums were introduced.

Key words: parallel museum, intelligent museum, parallel system, AI agent

0 引言

近年来, 大语言模型等通用人工智能方法在多轮对话、图像和视频生成方面取得了里程碑式的进展, 给原本主要由人类完成的文本写作、图片和视频设计等工作带来了巨大变革。博物馆负责海量文化遗产和艺术瑰宝的保管利用工作, 包括展览、研究、教育、传播、安全和运维保障等多种复杂业务, 亟须引进新兴技术来提升其智慧管理水平^[1-2]。虽然当前博物馆引入了大数据与智能感知等技术, 但业务的执行与运维保障仍主要依赖人工处理, 需要消耗较多的人力资源和较高的运营成本。仅由人类组成的业务团队存在协调成本大、培训效率低、管理难度高、业务负担重等问题, 制约了博物馆的智慧化与智能化发展。

随着学术界和工业界对通用人工智能的不断探索, 扩散模型^[3]、ChatGPT^[4-5]、Sora^[6-7]等方法应用相继出现, 在图像生成、多轮对话和视频生成方面取得了阶跃式的突破, 促进了人工智能代理技术的发展, 并引起了国内外研究者的广泛关注^[8]。人工智能代理利用大语言模型等工具的强大功能, 展现了类人化的感知、决策、执行工作模态, 已在视频剪辑等创作任务中展现了初步应用效果^[9]。利用人工智能代理提升现有运维系统的智能水平已成技术发展的必然趋势^[10-12]。面对博物馆运维等较为复杂的业务体系, 如何设计人工智能代理及其工作模式, 如何处理智能代理与人类员工的关系, 发挥人机混合协作的工作潜力, 有待进一步探索。

基于平行智能与平行系统的思想, 研究者提出了虚拟博物馆与实体博物馆相结合的平行博物馆系统^[13-14]。该系统通过虚拟博物馆中的计算实验和虚实博物馆的平行执行来提升实体博物馆的管理及业务水平。现有研究主要使用深度学习等方法作为平行博物馆的技术支撑, 随着博物馆智能化水平的不断提升, 平行博物馆在数据学习、虚实技能迁移、复杂任务处理等方面存在技术短板^[15]。现有技术方法无法充分发挥平行博物馆的虚实互动和平行执行的架构优势, 亟须引入更高智能化水平的感知和决策技术来提升平行博物馆的运行效果。

本文针对平行博物馆在业务管理与运行上的技

术需求, 结合大模型、智能代理等新兴技术手段, 提出了智能代理团队驱动的平行博物馆技术架构, 设计了包括自然人、数字人与机器人的人机混合智能代理团队, 讨论了其目标愿景、技术架构、执行流程和关键技术。通过平行博物馆技术架构, 笔者期望进一步发挥虚实互动和平行执行方法的优势, 提高实体博物馆的运行质量与效率, 为新时代智慧博物馆建设方案提供参考。

本文组织结构如下: 第1节综述智慧博物馆、平行智能和人工智能代理的相关工作; 第2节阐述智能代理驱动的平行博物馆系统架构; 第3节介绍平行博物馆中人工系统、计算实验和平行执行中的关键技术; 第4节分析智能代理驱动的平行博物馆典型案例; 第5节总结全文。

1 相关工作

1.1 智慧博物馆

随着人工智能技术的飞速发展和人们文化需求的日益增长, 国内外研究者开始探索利用深度学习等方法来提升博物馆各项业务的运行效率, 从而加大文化遗产和艺术瑰宝的传播力度, 更好地构建和提高博物馆在征集、研究、展览、教育、安全等方面的职能水平。例如, 李华飙等^[16]探索了数字技术在博物馆中的应用现状与对策; 史雪振等^[17]研究了智慧博物馆的建设方法和评价标准; Wang等^[18-19]探索了虚拟技术在博物馆设备上和博物馆知识利用方面的作用; 周虹霞等^[20]基于大数据与微服务进行了智慧博物馆服务研究; 陈康等^[21]分析了近年智慧博物馆研究的发展趋势; Jin等^[22]利用大语言模型进行了博物馆的问答数据构建; Wang等^[23]利用 ChatGPT 辅助历史照片的生成; 李晓璐等^[24]利用元宇宙技术探索了博物馆藏品的数字资源利用模式; 郭艳艳等^[25]综述了新兴技术给智慧博物馆建设与运营工作带来的启发。上述研究利用智能技术提升了博物馆的运行效果, 引起了国内外研究者对智慧博物馆的关注。

近年来, 大语言模型和人工智能代理等技术迅速发展, 在人机对话、知识问答等应用上取得了里程碑式的进展^[26]。智慧博物馆的建设亟须利用新兴技术研究方法、软件架构等方面的更新, 不

断提升博物馆的智能化水平,适应新时代博物馆的发展需求。

1.2 平行智能

为了解决复杂系统的管理与控制问题,王飞跃^[27]提出平行系统方法,其包括人工系统(artificial systems, A)、计算实验(computational experiments, C)、平行执行(parallel execution, P)3个部分。在运行流程上,平行系统先构建与真实系统对应的虚拟系统,利用虚拟系统进行模型训练,再与真实系统进行动态交互,从而提升真实系统的性能。其中,平行系统利用真实系统中采集到的“小数据”在虚拟系统中进行计算实验和推演分析,生成大规模的虚拟“大数据”,并利用数据驱动的方法提取任务领域专用的“小知识”,提升真实系统中的运行效果。

近年来,平行智能应用在多个领域取得了发展,包括智能交通^[28-34]、自动驾驶^[35]、智慧教育^[36]、视觉感知^[37-38]、光场建模^[39]、平行艺术^[40-42]、数字科学^[43]、机器创作^[44-45]、安全与监测^[46-47]、智能财务^[48]、医疗健康^[49]、知识工厂^[50-51]、企业管理^[52]、社会物理信息系统(cyber physical social system, CPSS)^[53-57]、区块链^[58-59]、智能制造^[60]、群体建模^[61]、平行戏剧^[62]、艺术理解^[63-64]、网络通信^[65]、经济计算^[66]等,展现了平行系统在多种真实系统中建模与运行的效果。本文基于平行智能理论,根据新时代智慧博物馆的建设需求,进行平行博物馆技术架构的研究与设计。

1.3 人工智能代理

智能代理在多个人工智能领域引起了广泛关注,例如,在强化学习语境中,智能代理是一个与环境交互并进行自主行为决策的智能体^[67]。随着大语言模型和多模态智能模型的发展,人工智能代理有了更强大的技术支撑。由于具备流畅的人机对话能力,ChatGPT等模型可以作为知识解答、写作辅助等方面的智能代理;依靠生成逼真图像的能力,Stable Diffusion模型可以作为图像和图形艺术创作的智能代理;凭借流畅的视频生成功能,Sora可以作为短片和电影创作的智能代理^[68]。

在上述智能代理的探索中,大语言模型基于强大的语言理解和输出能力,给智能代理带来了飞速发展^[69]。首先,大语言模型具有较强的上下文理解能力,使人机多轮高质量对话成为可能,提升了智能代理对人类意图的理解能力和追踪能力;然

后,大语言模型能够根据人类诉求进行思维推理,自主决策给出行动方案;最后,大语言模型能够输出准确流畅的自然语言文字,与人类进行无缝语义传输,并能够方便快速地通过文字的交互方式进行工具使用^[70]。因此,智能代理的技术水平不断提升,给智慧博物馆的构建和管理技术的发展提供了技术参考。

2 智能代理驱动的平行博物馆系统架构

2.1 平行博物馆的基本框架

基于平行系统与ACP方法,平行博物馆是一种基于CPSS的人机物混合架构体系^[13-14],由虚拟博物馆和实体博物馆构成,虚拟博物馆是根据实体博物馆利用场景工程^[71]等方法构建得到的,平行博物馆的基本框架如图1所示。平行博物馆通过实体博物馆和虚拟博物馆的平行执行来提升博物馆管理效果,提出预测与引导、实验与评估、学习与培训的实验方法并实现三者数据和模型上的交互,从而进行博物馆的系统建模、业务设计和实验计算。

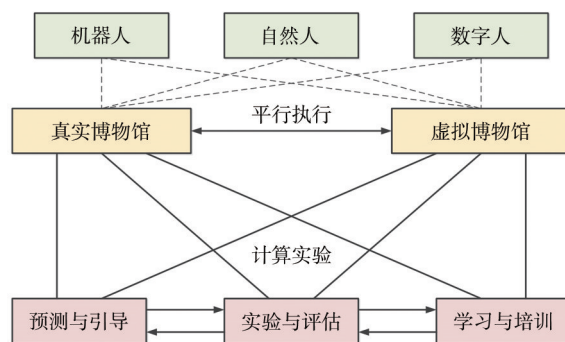


图1 平行博物馆的基本框架^[14]

平行博物馆中有机器人、自然人、数字人3种工作人员,根据机器人与数字人智能化水平的差异,3种工作人员呈现监管、辅助、协作等多种人机混合的工作模态。智能代理等技术的飞速发展,使机器人与数字人进行类人化智能操作的训练成为可能,本文据此进行智能代理驱动的平行博物馆的构建。

2.2 智能代理驱动的平行博物馆

智能代理驱动的平行博物馆基于智能理论、博物馆技术、运行系统、平行员工等多方面的支撑,形成实际与虚拟博物馆的虚实平行执行,智能代理驱动的平行博物馆技术架构如图2所示。其中,理论支撑包括算法智能、语言智能和想象智能逐级递

进的智能形式；技术支撑包括分布式科学、分布式自组织系统、自主群体感知等技术理念和技术集成；运行系统包括人类取向的操作系统（human-oriented operating systems, HOOS）^[72]和管理操作系统（management operating system, MOS）；平行员工包括自然人、数字人和机器人。

智能代理驱动的技术框架的核心方法包括智能代理生产工厂、智能代理训练工厂、人机混合决策平台。智能代理生产工厂负责生产数字人和机器人等初始化智能代理；智能代理训练工厂负责智能代理的博物馆业务技能学习；人机混合决策平台提供自然人、数字人、机器人的联合任务规划和决策媒介。

为了发挥平行博物馆的优势，本文在人工系统、计算实验、平行执行3个方面对平行博物馆的构建流程进行了设计，如图3所示。首先，构建智能代理驱动的人工系统，通过场景工程等方法实现实体博物馆的虚拟化，并利用感知、决策、行动等模块来初始化博物馆智能代理，为后续博物馆业务专用代理训练奠定基础。然后，通过实验环境与交互规则的设置来搭建计算实验平台，生成典型及未见博物馆业务案例，进行智能代理个体与团体级别的训练，并利用自动评分和专家知识来进行反馈和参数更新。最后，在实体博物馆中组建人类员工与智能代理相结合的人机混合协作团队，通过自然人、数字人、机器人之间的多模态交互与协作，利

用虚拟与实体博物馆平行执行的方式来完成实体博物馆各项业务。

本文针对博物馆多种业务完成了智能代理的创建和训练，并设计了智能代理与人类员工对博物馆业务的协同执行方法，通过人工系统、计算实验、平行执行3个步骤实现了智能代理的生成、训练与部署。基于智能代理驱动的方法，提升了平行博物馆中智慧展览、智慧教育、智慧安全、智慧运维等博物馆业务的智能化水平，实现博物馆的智能化6S发展，包括博物馆的物理世界安全（safety）、网络世界安全（security）、业务的整体发展可持续（sustainability）、信息的隐私保护（sensitivity）、展览的全面性服务（service）及博物馆的智慧管理运营（smartness）。

3 智能代理驱动平行博物馆关键技术

3.1 智能代理驱动的人工系统

为了获得博物馆业务的专用智能代理，平行博物馆采用人工系统构建的方法，提供智能代理的训练和推演环境，以提升智能代理的博物馆业务性能，智能代理驱动的人工系统构建方法如图4所示。具体地，首先利用场景工程、想象智能和具身智能等方法，根据实体博物馆特征构建虚拟博物馆；然后构建智能代理的感知、决策和行动模块，生产出大量的初始化智能代理，便于后续对智能代理进行专用业务训练。此过程构建了博物馆各项业

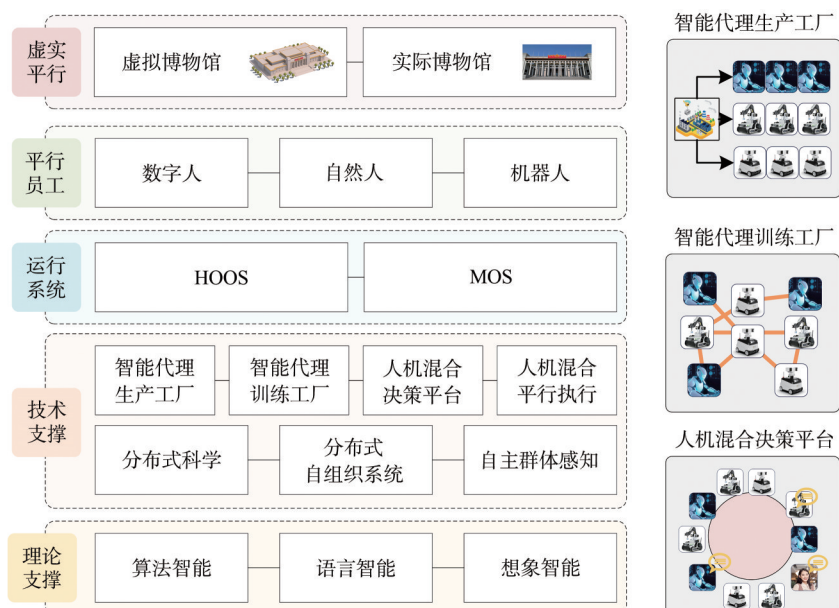


图2 智能代理驱动平行博物馆技术架构

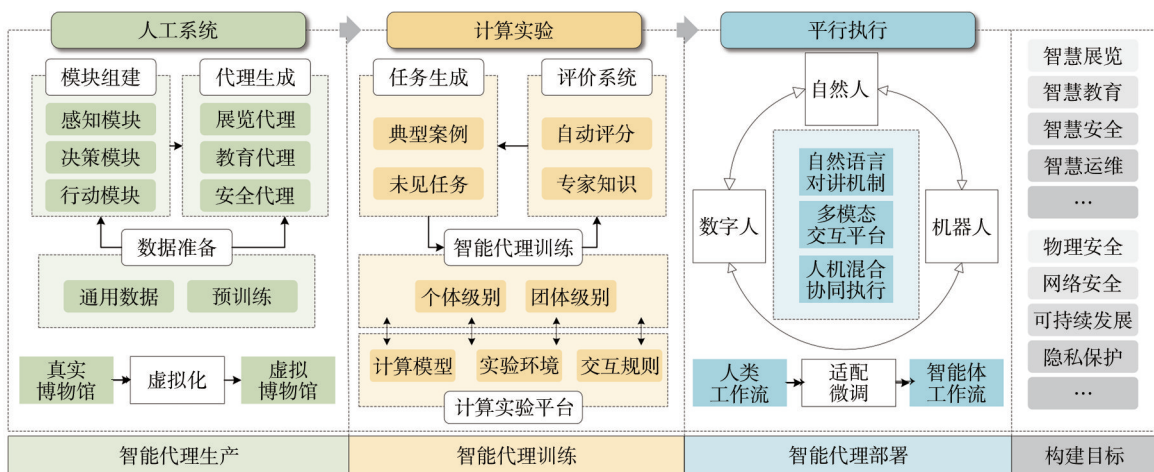


图3 智能代理驱动平行博物馆构建流程

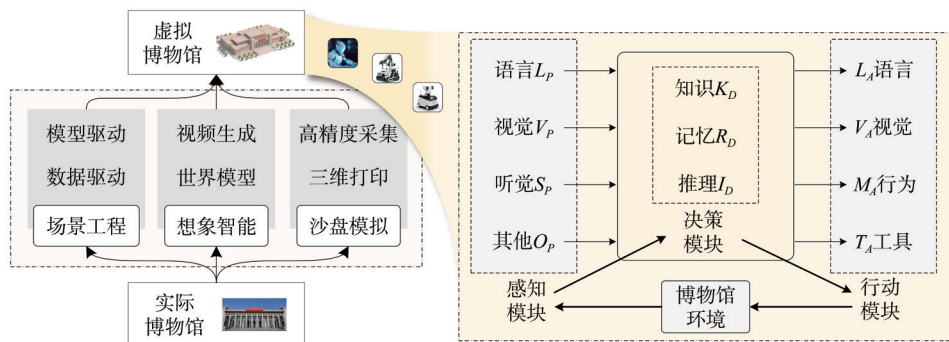


图4 智能代理驱动的人工系统构建方法

务的初始智能代理模型，使博物馆具备通用领域及博物馆专业领域的基本知识技能。

3.1.1 虚拟系统构建

平行博物馆中人工系统的重要功能是提供一个与实体博物馆相对应的虚拟博物馆，用于智能代理，进行多种博物馆业务的模拟和训练，并提供实体博物馆的数字映射，从而实现博物馆中复杂业务的便捷管理。

构建虚拟博物馆的常规方法是根据实体博物馆的参数进行三维建模，而随着视频生成技术的快速发展，利用可控视频生成模型进行模拟仿真^[73]是构建虚拟博物馆的新思路。同时，配备智能代理的实体机器人需要在真实工作场景进行实际交互训练，有必要搭建真实世界的机器人训练场作为虚拟博物馆的管控部分之一。因此，根据虚拟博物馆的构建需求，需要分别基于场景工程、想象智能、具身智能进行虚拟系统的构建。

• 基于场景工程的虚拟系统构建。相比常规的三维建模方法，场景工程能够提供更加多样和可解

释性更强的系统构建效果，以及提升虚拟博物馆的可靠性、安全性。博物馆的场景工程通过模型驱动和数据驱动两种方法进行博物馆场景的建模。模型驱动的方法采用物理建模、数字计算和场景渲染等技术实现对博物馆的场馆、物品、业务流程的虚拟化。数据驱动的方法通过大量的博物馆数据采集和建模，根据数据分布生成符合博物馆特征的虚拟数据。通过模型驱动和数据驱动的方法，结合实体建模和网格建模等技术实现博物馆在时间、空间、物理等多方面的信息建模。

• 基于想象智能的虚拟系统构建。根据研究者对智能方法智能形式的归纳^[5,7,74]，智能方法可以分为语言智能、算法智能、想象智能3个层级，三者的智能化水平逐层递进，代表了智能算法的发展历程。随着大语言模型体现出的语言智能的飞速发展，Sora等视频生成模型也表现出一定的想象智能水平。基于想象智能的方法，虚拟博物馆的构建无须依赖人工的物理建模过程，可以通过端到端的视频生成模型为智能代理提供虚拟博物馆的交互媒

介。其中，视频生成模型基于智能代理所处场景及其交互意图，实现基于世界模型的博物馆导航、设备操作模拟等多种博物馆任务，提供一个基于视频生成模型的虚拟博物馆系统。

- 基于具身智能的虚拟系统构建。为了执行实体博物馆业务，智能代理与实体博物馆在物理空间进行实际交互训练是不可或缺的过程，而实体博物馆中藏品珍贵、环境维护高昂，难以作为智能代理具身智能的训练环境。平行博物馆利用高精度信息采集、3D打印、场景工程等技术，根据实体博物馆的典型场景构建具身智能训练场，采用文物及设备仿制品作为机器人与环境的交互对象，降低具身智能训练风险，提升实际智能代理机器人的训练效率与运行效果。

3.1.2 智能代理生产

为了形成博物馆各项业务的专用代理，人工系统需要进行智能代理的初始化，利用多种多模态大模型构建智能代理的组成模块，形成博物馆业务的初始化元代理模型。为了完成博物馆多种业务的执行，智能代理需要具备类人化的交互能力，主要包含感知、决策、执行3个主要模块：

$$\begin{aligned} \text{Agent} &= \langle P, D, A \rangle \\ P &= \langle L_p, V_p, S_p, O_p \rangle \\ D &= \langle K_D, R_D, I_D \rangle \\ A &= \langle L_A, V_A, M_A, T_A \rangle \end{aligned} \quad (1)$$

其中，智能代理 Agent 由感知 P、决策 D 和行动 A 3 个模块组成，感知模块主要包括语言 L_p 、视觉 V_p 、听觉 S_p 和其他信息 O_p 的感知；决策模块主要包括知识 K_D 、记忆 R_D 和推理 I_D ；行动模块主要包括语言 L_A 、视觉 V_A 、行为 M_A 和工具使用 T_A 。

对智能代理感知、决策、行动3个主要模块的构建方法如下。

(1) 智能代理感知模块

感知模块为智能代理提供数据，是智能代理训练、学习和执行的信息来源。为了应对博物馆任务中复杂的数据表现形式，感知模块需要具备多模态信息感知能力，包括文本、视觉、听觉及其他信息等多种感知单元。

- 语言感知单元。作为人类沟通的主要媒介和文化遗产的重要载体，语言是文化发展过程衍生的一种重要的结构化信息表征形式，是一种较为便捷和高效的信息传递与表达方法。语言感知单元的构

建旨在为智能代理提供人机交互、代理间交互、遗产内容感知等信息分析能力，使其具备人类指令感知、设备手册查询、古文内容分析等功能。

- 视觉感知单元。博物馆的业务管理和设备运维等工作离不开视觉信息的采集与感知，为智能代理分析和人类员工管控提供大量信息。在视觉感知单元成像方面，基于成本低廉、维护简便的可见光视觉感知信息，智能代理具有仓库巡逻、异常检测、视觉导航等多项博物馆的运维功能。同时，红外成像、激光雷达、高频射线等多模态视觉信息增强了智能代理在文物探伤、环境建模等高精度文博业务方面的执行能力。

- 听觉感知单元。听觉信息是人类沟通与环境感知的重要信息来源，蕴含博物馆管理所需的重要信息。听觉感知单元具备对语音、语调、乐曲、环境音的声音感知，有利于智能代理完成文化信息理解、设备状态检测、人类情绪感知等任务。

- 其他信息感知单元。人类具有相对有限的信息感知模态，而智能代理的感知形式不局限于视听和语言。借助专用领域的信息分析接口，智能代理具备在设备数据流、文物专有数据格式、管理系统后台信息等方面的信息感知能力，这为设备异常监控和文物研究等博物馆业务提供更直接的参考。

(2) 智能代理决策模块

决策模块是智能代理智能化水平的集中体现，对感知模块信息进行分析、整合、推理，得出执行方案，并通过行动模块与外界环境交互。决策模块主要包括知识单元、记忆单元、推理单元3个部分。

- 知识单元。在大规模的通用多模态数据和博物馆领域专用数据上进行预训练，智能代理将具有通用领域及博物馆专业领域的知识。同时，利用博物馆中各项业务的服务记录、设备手册、操作规程等信息，训练智能代理熟悉博物馆各设备的使用方法及业务操作规范。此外，利用外部显式知识库作为知识单元的补充，将模型内部表征缺失的知识通过外部知识库查询等方式进行补全。

- 记忆单元。利用大语言模型的长序列建模能力，使智能代理能够记忆任务分工、历史操作、知识获取等的特征。同时，不同于人类记忆方式，智能代理能够通过记忆快照等显式存储方法实现对样本便捷和精确的数据记忆。随着大语言模型上下文长度的增加以及显式存储容量的增大，智能代理处理的记忆长度与任务复杂度也将不断增加。

• 推理单元。推理能力是智能代理执行博物馆复杂任务的核心功能,通过思维链等推理增强方法,智能代理能够针对给定任务制定精细化的执行方案,实现博物馆各项业务的问题解决、决策制定、任务分析等。随着智能代理训练数据的增加和文博领域知识的积累,智能代理的推理能力逐步提升,逐渐胜任博物馆各项复杂的管理任务。

(3) 智能代理行动模块

行动模块提供了智能代理与外界的交互媒介,是执行智能代理决策并对博物馆运行进行干预的重要方式,主要包括语言输出、视觉输出、行动输出、工具使用4种运行单元。

• 语言输出单元。在博物馆多智能代理业务的合作中,语言输出为智能代理提供了便捷的信息传递渠道。以语言输出为沟通方式,能够以人类可见可控的形式实现多智能代理任务的分发、协作和反馈。借助大语言模型的语言建模能力,智能代理以表意清晰、句式流畅的自然语言进行信息传递,并通过文字显示或语音播放的方式进行输出。

• 视觉输出单元。基于图像和视频大模型的视觉生成能力,智能代理能够通过逼真详细的视觉信息呈现博物馆的相关业务,如室内导航、展馆布置、遗产研究、文博教育、展厅监控等。基于图像和视频模态的数据生成模型的视觉输出,作为人工智能创作的主要输出媒介,能够满足遗产研究和文博教育中日益增长的自动化创作需求。

• 行动输出单元。智能代理与实体博物馆的物理交互是智能代理不可或缺的功能,包括输出移动、导航、搬运、操作等形式的行动。针对当前智能代理与实体博物馆在信号、交互方式等方面不够完善的问题,智能代理的行动输出利用类人化的物理交

互方式实现与博物馆的无缝便捷对接。行动输出为智能代理提供在实际场景中强化学习的媒介,从而提升智能代理在实体博物馆中的执行效果。

• 工具使用单元。博物馆中设备接口等工具的使用是智能代理执行博物馆任务的重要交互媒介。通过基于大语言模型的工具技能学习,智能代理以类人化的工具使用方式操作博物馆管控相关工具来执行高效准确的业务,利用成熟可控的底层工具链,实现输出内容的专业化和定制化,并缓解当前大模型“输出幻觉”等不稳定表达的状态。

3.2 智能代理驱动的计算实验

平行博物馆利用人工系统方法,完成了虚拟博物馆的构建和智能代理的初始化,其中智能代理仅具备基础的博物馆知识,无法执行深入和专业的博物馆业务。为此,平行博物馆通过计算实验的方法,在虚拟博物馆中对智能代理进行大规模的参数训练和任务推演,从而提升智能代理的博物馆专用业务执行能力,并分化出各项业务的专用代理,智能代理驱动的计算实验方法如图5所示。具体地,计算实验过程包括实验平台建模和智能代理训练两部分。

3.2.1 实验平台建模

实验平台建模旨在对虚拟博物馆中的业务场景和任务细节进行设置,建立模型的训练环境与规则,为智能代理训练提供精准的环境支撑,主要包括实验模型和实验机制两个部分。

(1) 实验模型

虚拟博物馆的实验模型需要对实验环境模型和交互规则模型两个方面进行设计。

• 实验环境模型。虚拟博物馆存储着博物馆的历史运行记录,包括展览、教育、遗产研究等业务

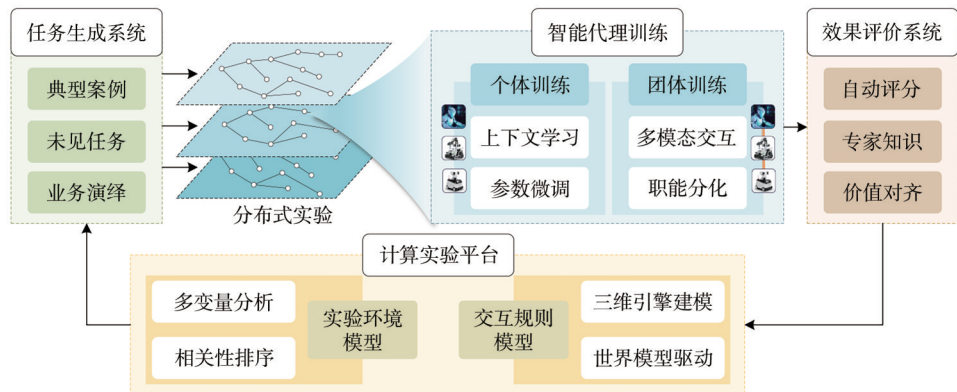


图5 智能代理驱动的计算实验方法

的各项数据。历史数据分析建模,能够拟合不同业务的运行规律,为智能代理提供实验环境。面向博物馆业务执行效果,实体博物馆相关因素的重要性呈现长尾分布形式。为了突出重要变量,减少虚拟博物馆计算量并提升推演效率,通过多变量分析方法对相关因素排序,只纳入相关性大于一定阈值的博物馆建模因素。该方式降低了智能代理的训练复杂度,增强了训练过程的可控性和可解释性。

虽然虚拟博物馆由实体博物馆的运行参数抽象构建得到,但计算实验平台能够对大范围的系统参数进行模拟,可以模拟实体博物馆的多种运行情况,将实体博物馆参数作为虚拟博物馆探索空间的一个实例。因此,虚拟博物馆能够更便捷地进行高负荷、高难度、低资源等极端条件下的业务实验,有助于提升智能代理对特殊和复杂任务的处理能力。同时,较抽象的参数化提高了博物馆各场景间的知识通用性,较精细的参数化有利于虚拟场景与实际场景的适配,因此需要控制建模的抽象程度,实现通用性与适配性的平衡。

- 交互规则模型。对于不同的博物馆业务,针对性地定义交互变量和交互方式,并基于HOOS和MOS进行操作系统平台设计。交互变量包括智能代理可观测的系统变量及智能代理可控制的控制变量。例如,在展览业务中,观测变量包括展厅状态、展品布置、游客规模等;控制变量包括展览方案、展品位置、游览路线等。

智能代理与虚拟博物馆的交互可以通过三维引擎与世界模型两种方法来实现。基于三维引擎的方法通过预置事先定义的博物馆展厅和物品等三维对象,将智能代理置于三维引擎中进行交互,这种方法能够对交互环境实现较高的可控性,但多种对象的建模需要消耗大量人力资源。近年来,视频生成模型飞速发展,为基于生成模型的世界模型引擎的构建带来了发展的可能性。通过实体博物馆的大规模数据训练,视频生成模型能够获取场馆布局、物理交互等规律,从而提供智能代理的可控交互媒介。

(2) 实验机制

为了给智能代理训练提供支撑环境,需要进行任务生成系统、效果评价系统和效率提升系统3个方面的设计。

- 任务生成系统。博物馆需要完成多方面多类型的业务,为了提升计算实验的效率,平行博物馆

首先采用具有代表性的案例进行智能代理训练。根据对博物馆历史业务数据的分析结果,训练筛选算法提取出典型案例,在真实案例及其微调变体进行实验。同时,随着观众规模增长和文化审美提升等,博物馆业务设计需要与时俱进。因此,利用生成式模型对历史业务建模,结合未来博物馆业务的趋势进行预测,生成历史业务记录中未见的、对未来博物馆运营有利的博物馆管理业务案例,利用真实案例与生成案例对智能代理进行博物馆业务演绎和模型训练。

- 效果评价系统。效果评价系统是智能代理训练的核心部件,其根据智能代理决策输出与交互引擎的观测变量,得到各智能代理的奖励结果。效果评价系统在构建博物馆人工系统时同步构建,依据博物馆历史数据及专家反馈,融合问卷调研等获取的专家知识,训练博物馆业务评价模型,输出专家关注的多角度业务效果标签。其中,由于实体博物馆业务的复杂性,业务执行效果难以通过有限的观测变量进行衡量,需要博物馆专业人员对智能代理的计算实验过程进行监控干预,从而使智能代理与人类员工的价值观对齐。

- 效率提升系统。对于博物馆多类别业务,采用多个实验同时进行的分布式训练方法,提升系统训练效率。首先,将交互引擎进行分布式布置,分别进行不同场景下的业务规划训练,通过评价模型来更新智能代理的模型参数;然后,交换各场景的智能代理,使智能代理从多项业务中学习博物馆业务知识;最后,筛选出业务执行效果较强的智能代理个体,采用专用技能的高水平智能代理对博物馆的各项业务进行处理。

3.2.2 智能代理训练

基于计算实验平台和大规模的博物馆数据,智能代理训练对人工系统输出的初始化智能代理进行参数更新,使其具备博物馆专用业务的处理能力,并基于大量的迭代训练和协作沟通,使其达到类人化的业务操作水平。智能代理训练主要从个体和团体两个方面开展。

- 智能代理个体训练。智能代理在初始化过程中,已经在通用领域知识数据库上进行了网络参数预训练,具备了基础的通用知识理解能力,同时,利用文博领域知识库进行了参数更新。因此,人工系统中初始化的智能代理已具备通用领域及文博专业领域的基本知识。

然而,智能代理处理博物馆各项业务的执行方法和经验仍存在不足。为此,平行博物馆通过迁移学习和上下文学习等方法对智能代理进行模型微调,对初始化智能代理进行业务分化,构建博物馆各项任务的专用智能代理。对于领域偏差较小且训练资料较少的业务场景,将训练资料通过人机对话的方式输入智能代理中,利用智能代理的长序列理解能力进行上下文学习,在无须反向传播的条件下实现专用业务的技能学习。对于其他需要深入培训的复杂业务,进行大模型微调更新局部网络参数,使智能代理具备博物馆复杂业务的处理能力。通过参数微调与上下文学习的方法,智能代理与训练环境进行大量交互推演,实现在模仿、强化、涌现方面模型性能的提升,从而强化类人化智能水平的决策能力。

- 智能代理团体训练。博物馆的各项业务具有较高的复杂性和多样性,难以通过单一智能代理同时完成多项业务。借鉴人类群体合作方法,平行博物馆利用多个智能代理分工协作,共同完成文物展览、藏品保护、文博教育等复杂业务。在由多个智能代理构成的智能代理团队中,各成员主要利用自然语言及多模态可视化的方式进行交互,并保留清晰且便于人工观察的交互记录,提升智能代理团队的可监管性。

智能代理团队合作包含协同合作与对抗讨论两种模式。前者发挥不同角色的智能代理特性,将博

物馆业务任务进行分解,由不同的智能代理完成。后者发挥智能代理的集体讨论优势,通过对抗性辩论确定博物馆业务的执行路线,基于发散思维等方法得出较优的执行方案。在训练过程中,各智能代理的训练目标与整体业务的训练目标协同执行。由于不同智能代理具有差异化的特性,两种目标对同一智能代理可能会产生相反的更新方向。因此,每个智能代理都具有独有的技术特性,这将促进智能代理进一步增强优势功能,实现智能代理的功能分化,提升智能代理团体在真实系统中的运行效果。同时,通过多智能代理的团队协同训练,智能代理可提升自身团队的沟通能力,增强语言、情感、行为等方面类人化的理解能力。

3.3 智能代理驱动的平行执行

平行博物馆通过计算实验得到了博物馆各项业务专用的智能代理。为了使智能代理在实体博物馆中发挥辅助作用,平行博物馆采用虚拟与实体博物馆平行执行的方式进行系统运行,智能代理驱动的平行执行体系如图6所示。平行执行需要进行人机混合决策体系及平行执行系统架构的设计,具体如下。

3.3.1 人机混合决策体系

人类员工是平行博物馆中重要的运营支撑,与智能代理的交互方式、协同策略共同直接影响着博物馆业务的运行效果。为了提升质量,人机混合决策需要从合作范式、运行模式、工作流程3个方面

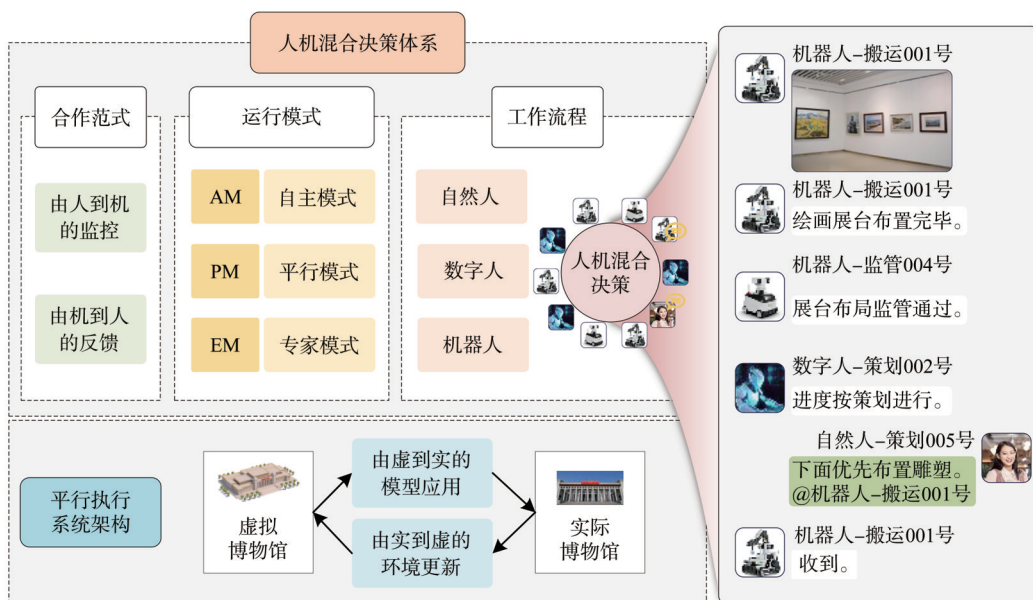


图6 智能代理驱动的平行执行体系

进行设计。

(1) 人机混合合作范式

人机混合的人工智能代理团队中, 人类员工有更多的业务执行经验, 合作范式主要包括由人到机的监控和由机到人的反馈两种模态。

- 由人到机的监控。人机混合决策过程运行在以人为中心的管理操作系统中, 便于人类与多个智能代理之间的管理关系维护和无缝合作。受训练数据规模和智能代理技术水平的制约, 智能代理团队面临诸多执行问题。同时, 利用数据驱动与强化学习的训练方式, 智能代理在个体层面与团体层面均存在决策输出的不确定性。因此, 需要人类员工负责监督管控工作, 提供系统优化的重要控制策略与反馈信息。

基于融合专家经验的系统设计, 智能代理团队需要根据人类的反馈信息动态调整执行策略, 利用执行效果较好的智能代理解决业务的关键问题, 利用执行效果较差的智能代理进行持续训练与优化。人类员工拥有智能代理的监管控制权, 能够对智能代理的决策失误和不当行为进行干预, 设置奖惩规则来动态调整智能代理的工作职责。例如, 对工作效果低下的智能代理, 通过计算实验进行重新训练。同时, 真实系统存在诸多难以预测和建模的信息, 具有较高的不确定性。例如, 情绪变化和舆论走势等, 需要人类员工补足智能代理的感知短板, 实现二者之间的优势互补。

- 由机到人的反馈。在人机混合执行中, 人类的工作模式是智能代理自适应学习的重要因素, 智能代理依托于群体智能等技术对人类员工的工作模式进行建模, 包括人类个体工作习惯、人类群体合作方式等。同时, 从多种智能代理与人类的交互记录可以综合分析得出人类员工的提升方向, 便于博物馆进行人员培训和考核等工作。

(2) 人机混合运行模式

人类与智能代理的合作运行模式是平行博物馆需要实现的一个重点, 为了便于与当前智能代理参与较少的博物馆对接, 采用自主模式 (autonomous mode, AM)、平行模式 (parallel mode, PM) 和专家/应急模式 (expert/emergency mode, EM) 3种运行模式实现人机混合平行执行。

在AM中, 博物馆业务主要由智能代理团队完成, 人类员工负责监管, 根据业务执行结果和执行过程的日志文件评价执行效果。在此模式中, 智能

代理与人类拥有同样的管理权限, 在面对难以处理的困难任务时, 智能代理主动向人类发出工作请求, 将工作模式转换为PM, 利用人机协同的方式进行任务处理。

在PM中, 人类与智能代理分工协作, 发挥各自业务优势, 人类主要负责任务分工、方案制定等复杂任务, 并处理智能代理难以完成的困难任务; 智能代理负责简单任务、重复任务的方案制定和执行。这一模式适用于平行博物馆运行前期及人机混合团队磨合期等场景。

在EM中, 以人类为主、智能代理为辅的方式进行业务执行, 智能代理主要负责数据库查询、场馆布置等底层支撑服务。此模式与传统博物馆运行机制最接近, 能够为现有博物馆到平行博物馆的布置与过渡提供便利。同时, 面对需要优先保证业务稳定性和安全性的情况, 可以利用此模型使人类员工快速获得博物馆各项业务的管理权限。

(3) 人机混合工作流程

该流程通过由自然人、数字人和机器人组成的智能代理团队协同完成博物馆业务, 对人类员工和智能代理员工进行角色分工, 利用自然语言对讲机制、多模态交互平台、人机混合协同执行方法进行智能代理间的分工协作。对已有的人类工作流程进行微调适配, 形成智能代理工作流程, 使虚拟博物馆和实体博物馆平行执行博物馆业务。

实体博物馆业务往往对任务执行的可靠性有较高的要求, 而大语言模型等技术常常出现“输出幻觉”等问题, 输出内容可能存在事实性错误。为此, 人机混合决策体系采用显式知识图谱驱动的方法提升智能代理团队决策的可靠性, 使其在进行客观事实的相关决策时, 能够通过知识查询与融合等操作来保证决策的正确性。其中, 显式知识图谱是由博物馆已有数据进行结构化转换得到的, 利用大语言模型自动化提取离散文本的结构化知识, 并由人类员工进行转化质量监控。

通过人机混合决策平台, 人类员工和智能代理员工可以一对一或一对多地分发指令、文字、图片、视频等多模态信息。接收方通过类人化自然语言反馈, 加速人类员工对平台的学习, 实现人机决策过程的便捷存档与复盘。人机混合决策平台能够实现人类指导机器、人机平等协同等多种工作模式, 以实现博物馆各项业务的高效交流。

3.3.2 平行执行系统架构

由于虚拟与实体博物馆之间存在难以避免的领域偏差,虚拟博物馆中训练得到的执行策略无法完全适应实体博物馆的数据分布。同时,作为一种复杂系统,实体博物馆的数据分布与模型特征随着外界需求的变化而变化,可能出现虚拟场景中未见的业务需求。由于虚实分布差异及实体博物馆数据分布的变化,虚拟博物馆的执行策略需要根据实体博物馆的特征进行实时调整。因此,博物馆的平行执行需要进行由虚到实的模型应用和由实到虚的环境更新。

- 由虚到实的模型应用。在实体博物馆业务场景中,通过虚拟博物馆的计算实验获得的执行策略进行业务应用。根据实体博物馆的业务特性,在虚拟博物馆中搜索最匹配的业务场景,并调用对应的智能代理团队和策略进行业务执行。在执行策略由虚拟博物馆应用到实体博物馆的过程中,执行策略不是完全被动地进行应用,而是根据其最佳运行环境,有侧重地引导实体博物馆业务场景向虚拟博物馆场景靠拢,从而提升虚拟博物馆的策略在实体博物馆中的执行效果。

- 由实到虚的环境更新。根据智能代理在实体博物馆的执行效果,以问卷反馈等专家评价方法作为奖励函数,结合人类员工的控制信号,对执行策略进行更新。同时,根据观测到的真实系统的数据分布,对虚拟系统的环境建模参数进行更新。根据真实系统的奖励信息,智能代理利用终身学习技术优化自身的策略函数。

虚拟与实体博物馆间的双向控制过程可被视为一种闭环迭代优化策略。在面对真实系统的工作任务时,先根据任务的需求、现状、条件等因素设置虚拟系统中一对一的映射环境,在虚拟系统中进行模拟推演。根据实验的各种系统反馈,选择较优的行动路线,在真实场景中执行短时段的策略方案,并获取真实系统的监控信息,重复进行推演和策略搜索步骤。这个过程中,智能代理将根据真实系统的运行状态,搜索虚拟系统中最相似的优势场景,通过变量控制引导真实系统向更可控的状态演变。

4 典型案例

4.1 博物馆智能教育内容生成

绘画、雕塑等文化遗产的教育传播是博物馆一个重要职能。近年来,人工智能内容生成(artifi-

cial intelligence generated content, AIGC)飞速发展,AIGC通过大规模数据的训练提高了文化内容的理解与生成能力,展现了辅助文化遗产研究的潜力。例如,根据输入的文字描述,Stable Diffusion和Midjourney等模型能够生成逼真的绘画艺术图像,为博物馆的文化教育提供了参考信息。然而,为了达到较精细的生成效果,工作人员需要反复多次修改输入文字提示^[75],这往往会花费大量的调试时间,限制了内容生成模型对博物馆文化教育的作用。

利用智能代理的文化艺术理解能力,可以提升面向博物馆教育的内容生成模型的效果。ChatGPT等语言模型智能代理表现出强大的语言理解与输出能力^[76-77],能够作为辅助实验人员,进行人机混合的艺术教育图像生成,减轻人类实验人员的工作负担。具体地,智能代理驱动的教育内容生成过程包括智能代理训练与人机混合生成两个步骤,如图7所示。

- 智能代理训练。将通用领域的大语言模型的参数作为智能代理的初始化参数,在大规模的通用语料上进行预训练,使智能代理具备通用领域及博物馆专业领域的基本知识。为了提升智能代理对博物馆专业领域知识的处理能力,对智能代理进一步微调训练,通过上下文学习训练智能代理掌握文字生成图片的控制方法,通过语言交互向智能代理询问、解答、修正生成的内容,并通过创作案例检验和反馈智能代理的生成效果,进而将通用领域的智能代理微调为博物馆教育内容生成的专用代理。

- 人机混合生成。相比常规的AIGC过程,智能代理驱动利用人机混合交互的模式进行内容生成。首先,人类通过简短的文字描述给出生成指令与要求,其可以仅包含创作形式、主要物体、图像风格等信息;然后,人工智能代理基于人类提供的要素进行场景想象,发挥想象智能的作用,将场景细节与图像风格补全,并按照文生图模型的技术特点进行组织,输出内容生成的提示词;最后,将人机混合生成的提示词输入文生图模型,形成最终的生成结果。

智能代理驱动的内容生成过程能够显示出智能代理内容生成效果^[75],智能代理驱动的绘画创作结果如图8所示。基于同样的提示词,分别采用直接生成和智能代理驱动的方式进行教育内容生成,其中,智能代理驱动的方式对输入的“Horse,

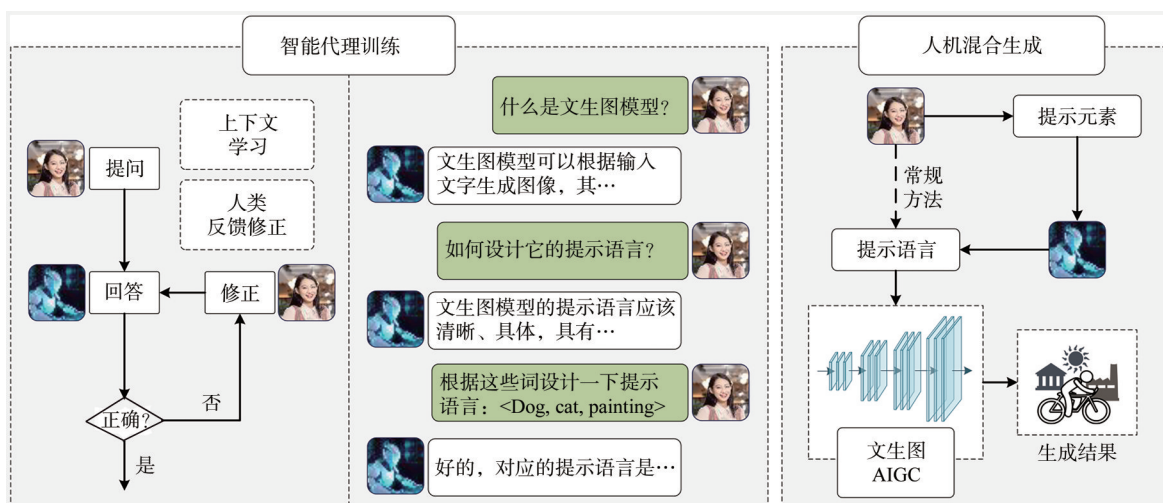


图7 智能代理驱动的教育内容生成方法

Chinese Painting”进行了符合文化特性的内容补全。在智能代理处理前，生成的图像混合了不同风格的艺术手法，在马匹身上出现了不协调的花朵等图案，生成的图像与传统文化的艺术表达不符。在智能代理处理后，根据智能代理加入的对图像具体内容的说明生成的图像，在风格、构图及配色方面呈现出更好的效果。因此，基于智能代理驱动的内容生成方法能够提升博物馆教育内容生成的语义和内容等信息表达的效果。



图8 智能代理驱动的绘画创作结果

4.2 博物馆人工展览系统构建

展览是博物馆的一个重要职能，是博物馆实现业务功能与文化传承的重要环节。据统计，国家博物馆2023年共举办展览57个，累计接待观众约675万人次。在展览活动中，展览的效果和普及率

影响着博物馆的运行效果。为了保存展览数据、提升线上展览的效果、扩大展览内容的影响力，国家博物馆对举行的实体展览进行了信息采集与虚拟化，构建了虚拟化和数字化的博物馆展厅，为平行博物馆的人工系统构建提供了重要的技术支撑，使智能代理在多种展览场景中能够进行任务推演和模型训练的环境。

为了提高展览数据虚拟化的构建质量，虚拟化博物馆展厅的构建方法从需求级别、安全策略、数据维度和应用场景4个方面进行设计，如图9所示。在需求级别方面，对展览中留存级、传播级和普及级的数据进行针对性采集。对重要数据进行高精度采集来提升数据的保存质量，对常规数据进行快速采集来提升构建效率。在安全策略方面，利用虚拟化、云计算与分布式等技术，实现访问安全、数据安全、运维安全和开发安全的全链路安全闭环。在数据维度方面，利用2D图像和3D点云进行信息采集，实现二维数据与三维数据的保存与处理。在应用场景方面，通过采集到的高精度数据，实现数据管理、互联与多种下游数据的应用。

基于虚拟化博物馆展厅的构建方法，多种实体博物馆展厅的数据得到了精细化采集和虚拟化与数字化构建，使展览数据具有易存取、可查询、多模态等特点，虚拟化博物馆展厅构建结果如图10所示。其中，图10（a）展示了国家博物馆的线上数字展厅部分展览内容；图10（b）和图10（c）分别展示了“伟大的变革”与“复兴之路”展览的线上观看起点。虚拟化博物馆展厅的构建提供了实体

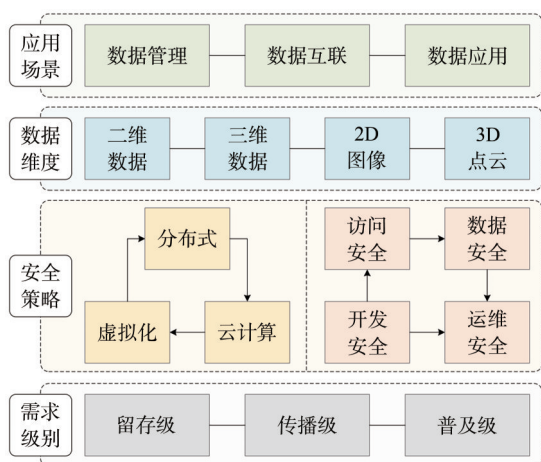


图9 虚拟化博物馆展厅的构建方法

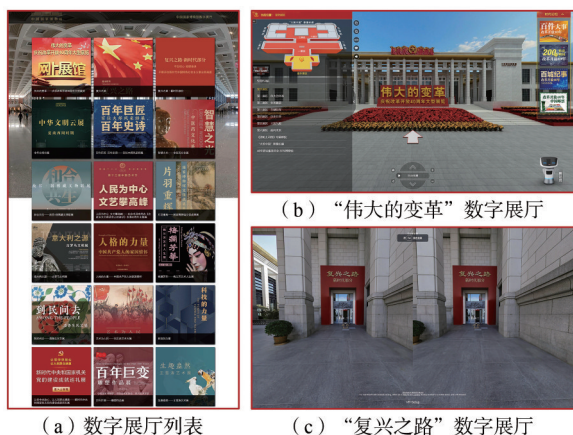


图10 虚拟化博物馆展厅构建结果

展览的精细化人工系统，对于平行博物馆中人工系统的构建与智能代理的训练起到推动作用。

5 结束语

本文基于智能代理等通用人工智能技术进行了平行博物馆的技术架构设计，讨论了人工系统、计算实验与平行执行中的关键技术。通过构建虚拟博物馆系统与智能代理生产工厂，形成了平行博物馆的人工系统，利用实验平台建模与智能代理训练进行了虚拟博物馆的计算实验，使智能代理获得博物馆业务的专用知识，并基于平行执行业务机制与人机混合决策体系的设计实现了虚拟与实体博物馆的平行执行。结合智能代理与平行博物馆的技术特性进行了平行博物馆管理方法的设计，提升了实体博物馆的管理与运行质量。

近年来，大语言模型、视频生成和智能代理等技术飞速发展，通用人工智能展现出算法智能、语

言智能和想象智能，为平行博物馆系统不断提供新技术支撑。智能代理等方法能够提高平行博物馆虚拟系统的推演效率与质量，提供平行系统对实体博物馆的管控媒介，保证虚实融合的平行执行的效果。未来，平行博物馆与实体博物馆的融合应用，需要对智能代理的生产和训练、人机混合决策方法、博物馆信息的隐私与安全等问题进行深入研究，从而更好地发挥博物馆的文化服务与遗产研究等重要社会作用。

参考文献：

- [1] 王春法. 关于智慧博物馆建设的若干思考[J]. 博物馆管理, 2020, 2(3): 4-15.
WANG C F. Some thoughts on the smart museum construction[J]. Museum Management, 2020, 2(3): 4-15.
- [2] 王春法. 加强数据治理, 积极探索元宇宙在文博领域的应用场景与发展方向[J]. 博物馆管理, 2023, 5(1): 4-7.
WANG C F. Strengthening data management to explore the application and development of the metaverse in the museums[J]. Museum Management, 2023, 5(1): 4-7.
- [3] CROITORU F A, HONDRU V, IONESCU R T, et al. Diffusion models in vision: a survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023, 45(9): 10850-10869.
- [4] OUYANG L, WU J, JIANG X, et al. Training language models to follow instructions with human feedback[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2022, 35: 27730-27744.
- [5] WANG F Y, MIAO Q, LI X, et al. What does ChatGPT say: the DAO from algorithmic intelligence to linguistic intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 575-579.
- [6] LIU Y, ZHANG K, LI Y, et al. Sora: A review on background, technology, limitations, and opportunities of large vision models[EB]. arXiv preprint, 2024, arXiv: 2402.17177.
- [7] WANG F Y, MIAO Q, LI L, et al. When does Sora show: the beginning of TAO to imaginative intelligence and scenarios engineering[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(4): 809-815.
- [8] XI Z, CHEN W, GUO X, et al. The rise and potential of large language model based agents: a survey[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2309.07864.
- [9] LI X, MIAO Q H, LI L X, et al. Sora for scenarios engineering of intelligent vehicles: V&V, C&C, and beyonds[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(2): 3117-3122.
- [10] 王春法. 博物馆藏品和人才工作的规律及方向——基于中国国家博物馆的思考[J]. 博物馆管理, 2022, 4(4): 4-16.
WANG C F. Laws and directions of museum collection and talent work: based on the thinking of national museum of China[J]. Museum Management, 2022(4): 4-16.
- [11] 王春法. 赋能城市未来——博物馆的力量[J]. 科学教育与博物馆, 2023, 9(1): 1-3.
WANG C F. Empowering the future of cities: the power of museums[J]. Science Education and Museums, 2023, 9(1): 1-3.
- [12] 王春法. “智慧国博”助推国家文化数字化发展[J]. 前线, 2024(3): 12-15.
WANG C F. “Smart National Museum” promotes the digital development of national culture[J]. Qian Xian, 2024(3): 12-15.

- [13] 王春法, 王飞跃, 鲁越, 等. 平行博物馆: 新时代博物馆运营的智能管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(2): 125-136.
WANG C F, WANG F Y, LU Y, et al. Parallel museums: intelligent management and control of museum operations in the new era[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(2): 125-136.
- [14] 鲁越, 郭超, 潘晴, 等. 平行博物馆系统: 框架、平台、方法及应用[J]. 模式识别与人工智能, 2023, 36(7): 575-589.
LU Y, GUO C, PAN Q, et al. Parallel museum systems: framework, platform, methods and applications[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2023, 36(7): 575-589.
- [15] LU Y, GUO C, LIN Y, et al. Computational aesthetics of fine art paintings: the state of the art and outlook[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(11): 2239-2259.
- [16] 李华颀, 王若慧, 郝琳霞. 数字技术在博物馆中的应用现状与对策[J]. 中国信息化, 2022(9): 80-82.
LI H B, WANG R H, HAO L X. Current situation and countermeasures of the application of digital technology in museums[J]. Chinese Informatization, 2022(9): 80-82.
- [17] 史雪振, 李华颀, 王若慧. 智慧博物馆建设及评价标准构建研究[J]. 信息技术与标准化, 2023(11): 59-63.
SHI X Z, LI H B, WANG R H. Research on the construction and evaluation standards of smart museum[J]. Information Technology & Standardization, 2023(11): 59-63.
- [18] WANG S. A bodies-on museum: the transformation of museum embodiment through virtual technology[J]. Curator: the Museum Journal, 2023, 66(1): 107-128.
- [19] WANG S, DUAN Y, YANG X, et al. "Smart Museum" in China: from technology labs to sustainable knowledgescapes[J]. Digital Scholarship in the Humanities, 2023, 38(3): 1340-1358.
- [20] 周虹霞, 李华颀, 周宇阳, 等. 基于大数据与微服务的博物馆智慧服务研究[J]. 博物馆管理, 2022, 4(3): 47-54.
ZHOU H X, LI H B, ZHOU Y Y, et al. Research on the museum smart service based on big data and micro-services[J]. Museum Management, 2022, 4(3): 47-54.
- [21] 陈康, 李华颀. 近十年来我国智慧博物馆研究热点及趋势——基于CNKI(2012—2022)数据的文献计量分析[J]. 科学教育与博物馆, 2023, 9(4): 38-45.
CHEN K, LI H B. Research focus and development trends of smart museum in China in the past decade: bibliometric analysis based on CNKI (2012—2022) data[J]. Science Education and Museums, 2023, 9(4): 38-45.
- [22] JIN F, CHANG Q, XU Z. MuseumQA: a fine-grained question answering dataset for museums and artifacts[C]//Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Natural Language Processing. Piscataway: IEEE Press, 2023: 221-226.
- [23] WANG H, QIAN S, ZHANG J, et al. Paint ChatGPT: a platform for old shanghai calendar card generation[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2023: 332-337.
- [24] 李晓璐, 郑霞, 李华颀, 等. 元宇宙赋能博物馆藏品数字资源利用模式初探[J]. 博物馆管理, 2023, 5(4): 65-73.
LI X L, ZHENG X, LI H B, et al. Preliminary study on the utilization mode of museum collection digital resources empowered by the metaverse[J]. Museum Management, 2023, 5(4): 65-73.
- [25] 郭艳艳, 李华颀, 车大为, 等. 科技让我们遇见更美好的未来——智慧博物馆论坛综述[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2022(8): 29-36.
GUO Y Y, LI H B, CHE D W, et al. A summary of the forum "research and practical exploration of smart museum construction"[J]. Journal of National Museum of China, 2022(8): 29-36.
- [26] LU Y, GUO C, DAI X, et al. Image captioning on fine art paintings via virtual paintings[C]//Proceedings of the International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence. Piscataway: IEEE Press, 2021: 156-159.
- [27] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489.
- [28] SUN Y, HU Y F, ZHANG H, et al. Transfer methods for vehicle carbon emission models based on the parallel transportation system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024(99): 1-11.
- [29] SHUAI Z B, HU Z, GAI J T, et al. Metaverse-enabled intelligence for open-terrain field vehicle fleets: leveraging parallel intelligence and edge computing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(2): 3111-3116.
- [30] GUO J Q, CHEN L, LI L X, et al. Advanced air mobility: an innovation for future diversified transportation and society[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(2): 3106-3110.
- [31] WANG F Y. Social radars for social vision of intelligent vehicles from skyways in low altitude airspace[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(1): 5-38.
- [32] QU J X, LIU R W, GAO Y, et al. Double domain guided real-time low-light image enhancement for ultra-high-definition transportation surveillance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024(99): 1-13.
- [33] LIANG X L, LI J J, QIN R, et al. Trustworthy intelligent vehicle systems based on TRUE autonomous organizations and operations: a new perspective[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(2): 3195-3204.
- [34] WANG X X, LI J J, FAN L L, et al. Advancing vehicular healthcare: The DAO-based parallel maintenance for intelligent vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(12): 4671-4673.
- [35] LU J W, LI L F, WANG F Y. Event-triggered parallel control using deep reinforcement learning with application to comfortable autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(3): 4470-4479.
- [36] 王飞跃. 数字教师与平行教育: 关于ChatGPT之后教学变革的探讨[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(4): 454-463.
WANG F Y. Digital teachers and parallel education: a paradigm shift in teaching and learning after ChatGPT[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(4): 454-463.
- [37] ZHANG W, ZHENG W, LI Q, et al. Parallel vision $\supseteq$ image synthesis/augmentation[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(3): 782-784.
- [38] LU Y, GUO C, DAI X Y, et al. Data-efficient image captioning of fine art paintings via virtual-real semantic alignment training[J]. Neurocomputing, 2022, 490: 163-180.
- [39] WANG F Y, SHEN Y. Parallel light fields: A perspective and a framework[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(2): 542-544.
- [40] 郭超, 鲁越, 林懿伦, 等. 平行艺术: 人机协作的艺术创作[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(4): 335-341.
GUO C, LU Y, LIN Y L, et al. Parallel art: artistic creation under human-machine collaboration[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(4): 335-341.
- [41] GUO C, BAI T, LU Y, et al. Skywork-daVinci: a novel CPSS-based painting support system[C]//Proceedings of the IEEE International

- Conference on Automation Science and Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2020: 673-678.
- [42] GUO C, LU Y, DOU Y, et al. Can ChatGPT boost artistic creation: the need of imaginative intelligence for parallel art[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 835-838.
- [43] 王飞跃, 王雨桐. 数字科学家与平行科学: AI4S 和 S4AI 的本源与目标[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(1): 27-33.
WANG F Y, WANG Y T. Digital scientists and parallel sciences: the origin and goal of AI for science and science for AI[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(1): 27-33.
- [44] GUO C, DOU Y, BAI T, et al. ArtVerse: A paradigm for parallel human-machine collaborative painting creation in metaverses[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(4): 2200-2208.
- [45] GUO C, BAI T, WANG X, et al. ShadowPainter: active learning enabled robotic painting through visual measurement and reproduction of the artistic creation process[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2022, 105(3): 61.
- [46] 王飞跃. 平行智能数字警察构建平行安全新格局: 从平行警务到平安中国[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(4): 431-435.
WANG F Y. Parallel and digital police for new norm of public safety: from parallel security to peaceful China[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(4): 431-435.
- [47] WANG Y, WANG J, CAO Y, et al. Integrated inspection on PCB manufacturing in cyber-physical-social systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 53(4): 2098-2106.
- [48] 崔华宁, 王飞跃, 李娟娟, 等. 平行财务预算: 复杂业财的深度融合与智能服务[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(4): 446-453.
CUI H N, WANG F Y, LI J J, et al. Parallel financial budgeting: deep integration and intelligent services for complex business and finance[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(4): 446-453.
- [49] LI Z S, XIONG G, LYU Y S, et al. An urban trajectory data-driven approach for COVID-19 simulation[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2024(99): 1-10.
- [50] WANG Y, WANG X, WANG X, et al. The ChatGPT after: building knowledge factories for knowledge workers with knowledge automation[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(11): 2041-2044.
- [51] WANG Y, TIAN Y, WANG J, et al. Integrated inspection of QoM, QoP, and QoS for AOI industries in metaverses[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2071-2078.
- [52] LI J, QIN R, GUAN S, et al. Digital CEOs in digital enterprises: automating, augmenting, and parallel in Metaverse/CPSS/TAOs[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(4): 820-823.
- [53] ZHU J, YUAN Y, WANG F Y, et al. Federated control: a trustable control framework for large-scale cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(5): 7986-7994.
- [54] XUE X, YU X, ZHOU D, et al. Computational experiments for complex social systems: integrated design of experiment system[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(5): 1175-1189.
- [55] WANG X, WANG Y T, YANG J, et al. The survey on multi-source data fusion in cyber-physical-social systems: foundational infrastructure for industrial metaverses and industries 5.0[J]. Information Fusion, 2024, 107: 102321-102337.
- [56] FAN L, ZENG C, WANG Y, et al. Social radars: finding targets in cyberspace for cybersecurity[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(2): 279-282.
- [57] XUE X, ZHOU D, YU X, et al. Computational experiments for complex social systems: experiment design and generative explanation[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(4): 1022-1038.
- [58] LIU X, LIU L, YUAN Y, et al. When blockchain meets auction: a comprehensive survey[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2024(99): 1-13.
- [59] LI J J, QIN R, GUAN S T, et al. Blockchain intelligence: intelligent blockchains for Web 3.0 and beyond[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024(99): 1-10.
- [60] YANG J, WANG Y T, WANG X X, et al. Generative AI empowering parallel manufacturing: building a “6S” collaborative production ecology for Manufacturing 5.0[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024(99): 1-15.
- [61] WU W S, YANG W Y, LI J J, et al. Autonomous crowdsensing: Operating and organizing crowdsensing for sensing automation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(3): 4254-4258.
- [62] 倪清桦, 郭超, 王飞跃. 平行戏剧: 新时代戏剧的人机协同创作与智能管理[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(4): 436-445.
NI Q H, GUO C, WANG F Y. Parallel theaters: human-machine collaborative creation and intelligent management for theatrical art[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(4): 436-445.
- [63] LU Y, GUO C, DAI X, et al. ArtCap: a dataset for image captioning of fine art paintings[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2024, 11(1): 576-587.
- [64] LU Y, GUO C, DAI X, et al. Generating emotion descriptions for fine art paintings via multiple painting representations[J]. IEEE Intelligent Systems, 2023, 38(3): 31-40.
- [65] BO P, TU W Q, TU X B, et al. Dual RIS-aided parallel intelligence surface for IoAMVSS: a co-design approach for 3C problems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024(99): 1-10.
- [66] ZHENG X L, LI J Y, LU M Y, et al. New paradigm for economic and financial research with generative AI: impact and perspective[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2024(99): 1-11.
- [67] PONNUSAMY P, GHAS A, YI Y, et al. Feedback-based self-learning in large-scale conversational AI agents[J]. AI Magazine, 2022, 42(4): 43-56.
- [68] WANG L, MA C, FENG X, et al. A survey on large language model based autonomous agents[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2308.11432.
- [69] MIN B, ROSS H, SULEM E, et al. Recent advances in natural language processing via large pre-trained language models: a survey[J]. ACM Computing Surveys, 2023, 56(2): 1-40.
- [70] ZHAO H, CHEN H, YANG F, et al. Explainability for large language models: a survey[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2024, 15(2): 1-38.
- [71] LI X, LIU E L, SHEN T Y, et al. ChatGPT-based scenario engineer: a new framework on scenario generation for trajectory prediction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(3): 4422-4431.
- [72] WANG F Y, LI J, QIN R, et al. ChatGPT for computational social systems: from conversational applications to human-oriented operating systems[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2023, 10(2): 414-425.
- [73] HU A, RUSSELL L, YEO H, et al. GAIA-1: A generative world model for autonomous driving[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2309.17080.
- [74] WANG F Y, ZHANG J J, ZHENG X, et al. Where does AlphaGo go: from church-turing thesis to AlphaGo thesis and beyond[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(2): 113-120.
- [75] LU Y, GUO C, DOU Y, et al. Could ChatGPT imagine: content control for artistic painting generation via large language models[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2023, 109(2): 39.

- [76] WU T, HE S, LIU J, et al. A brief overview of ChatGPT: the history, status quo and potential future development[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(5): 1122-1136.
- [77] SHEN Y, SONG K, TAN X, et al. HuggingGPT: solving AI tasks with ChatGPT and its friends in hugging face[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2303.17580.

[作者简介]



鲁越 (1994-), 男, 博士, 山东大学控制科学与工程学院博士后, 主要研究方向为机器学习、小样本学习、机器人系统。



郭超 (1992-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所助理研究员, 主要研究方向为机器学习、强化学习、机器艺术创作、智能机器人系统。



倪清桦 (1999-), 女, 博士, 澳门科技大学博士生, 主要研究方向为平行智能、数字孪生、智能系统等。



李华颢 (1976-), 男, 中国国家博物馆数据管理与分析中心主任, 主要研究方向为智慧博物馆、文物数字化技术。



王春法 (1963-), 男, 博士, 曾任中国国家博物馆馆长, 主要研究方向为科技政策与科学文化、博物馆管理、智慧博物馆。



王飞跃 (1961-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 兼任中国国家博物馆科学与艺术研究所所长, 主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能、知识自动化。