

数字仿真技术在塞拉菲尔德废物处理中实现突破性应用

英国塞拉菲尔德场区采用的“乏燃料包壳筒仓操作模拟器”验证了协作与仿真在放射性高危环境中的价值，为未来更多机器人应用铺平道路。



塞拉菲尔德的乏燃料包壳筒仓是一个历史遗留废物储存设施，也是该场区最危险的设施之一。

机器人在核退役场所的放射性环境中具有重要作用。它们能处理放射性物质，或在人类难以进入或需严密防护才能进入的危险区域执行任务。然而机器人并非人们想象中的完全“免手动”解决方案。有时程序员需遵循严格安全规程进入辐射区，对软件相关流程进行升级或设置新路径。这要求他们穿戴供气防护服，配备双层手套和呼吸器，才能进入作业舱对机器人进行调试。这种操作不仅令人不适、成本高昂，更伴随着潜在风

险。

针对这一难题，模拟器作为解决方案出现。这类系统对机器人所处环境进行高度精确虚拟再现，且处于安全的“沙盒”环境，可无风险测试新配置与运行路径，最终将最优参数传输至机器人控制器。此举能节省机器人升级所需的数日时间，降低操作不适感与辐射照射风险，辅助机器人操作人员培训，并大幅削减人员进入污染区域所需成本。

塞拉菲尔德场区的机器人模拟技术取得突破性进展

首个在塞拉菲尔德应用的此类模拟器是“乏燃料包壳筒仓操作模拟器”(PFCS OpSim)，由塞拉菲尔德有限公司与机器人技术与人工智能合作组织(RAICo)联合开发。RAICo由英国原子能管理局(UKAEA)、核退役管理局(NDA)、塞拉菲尔德有限公司、曼彻斯特大学以及近期加入的AWE核安全技术公司组成。

该模拟器针对废物容器处理设施(WCHF)而设计，系一个由机器人处理废物容器的混凝土操作间。该设施位于塞拉菲尔德场区的乏燃料包壳筒仓(PFCS)内——这座建于二十世纪五十年代的遗留废物贮存设施，曾用于存储场区首批核反应堆产生的放射性燃料包壳，现已被列为场区优先退役项目。如今该库区是场区内最具危险性的设施之一，亟需清空库存废物以便将其重新封装至安全的现代化贮存系统中。



塞拉菲尔德已采用一套模拟废物容器处理设施，成效显著。

WCHF 厂房内配备一台大型六轴工业机械臂，其工作流程包括：卸除空容器螺栓→将容器送至废物填充处→对完成填充的返回容器进行紧固螺栓操作以便转运。该机械臂还会对容器外壁进行污染检测拭子采样，并将样本存入分析专用收纳箱。

当需要进行升级改造时，例如软件修改或更换工具（如拭子夹持器或螺母扳手），工程师或维护人员必须让机器人停止运行，而机器人程序员需穿戴防护装备进行调整。位置调整需借助 KUKA 智能平板对机器人进行定位，随后逐一对每个位置进行“精调”——由机器人软件记录坐标数据。



该模拟器模拟了一台六轴工业机器人手臂，用于卸下空容器、将其送至废物填充处，随后为返回的容器牢固拧紧螺栓以便转运。

升级改造需经过多次测试运行，通常需人工反复介入以优化设置。为确保安全，每次介入都需规划、清场与监控，并配备随时待命的支援团队。

一次典型升级改造需经历 10 天测试，这种缓慢进程源于厚重防护装备带来的不适——单次作业时长因此受限。此类升级改造可能因设备故障或异常状况触发，在系统性升级改造期间尤为频繁。每次人员入舱都会增加辐射照射或污染风险，同时人为失误可能损毁机械臂或室内设备，而新设备和新配置的试运行更会直接导致作业中断。

PFCS OpSim 能够解决其中许多问题。它提供了允许操作人员在虚拟现实的 WCHF 中可视化机器人的模拟环境。这使得

新程序及其他变更在实施到实际设施前，可通过模拟进行测试验证。经验证后，软件更新可通过数字方式传输至机器人。

机器人仿真的优势

虚拟仿真并非完美无缺，仍需要进行部分内部微调。但若一切顺利，这类模拟器带来的效益将相当可观。

最明显的优势在于节省时间。塞拉菲尔德有限公司估计，在最佳情况下，需要派遣人类程序员进入作业舱的天数将从 10 天缩减至 2 天。这不仅解放了工程师资源，还降低了人员穿戴全套正压防护装备进入作业舱的成本。

风险降低同样至关重要。减少在作业舱内的时间意味着降低危险照射程度。这符合“合理可行的低水平（ALARA）”原则——英国安全准则要求退役场所在合理成本/努力范围内将人员风险控制最低水平。模拟器还能支持更多实验操作，例如可测试新指令序列以探索机器人性能，像创建工具意外脱落时的抓取复位指令。

这让塞拉菲尔德场区的机器人程序员们兴奋不已，他们期待能花更多时间在电脑前工作，而不用再穿着笨重的防护服进行繁琐的编程操作。

最后，模拟器是培训机器人操作人员的有力工具。由于它在视觉和操作上完全复刻真实工作单元，因此非常适合具备适当资质与经验的人员（SQEP）进行培训与熟悉流程、维护演练及作业前简报。操作人员无需再通过闭路电视进行评估，而是能置身于一个交互式、零风险的环境中，使学习过程更快速、

更安全、更精准。



为了升级与软件相关的流程或设定新路径，程序员们需要穿戴个人防护装备进入工作单元。这不仅令人不适、成本高昂，还伴随着一定风险。

创建废物处理设施模拟器

该项目始于塞拉菲尔德有限公司对 UKAEA 位于卡勒姆（Culham）的“挑战性环境中的远程应用（RACE）”设施的访问。团队参观了那里用于 JET 聚变装置的“MASCOT”双臂机械手的虚拟模拟器。

认识到模拟器的潜力后，各方开始探讨为塞拉菲尔德创建

类似方案，最终促成了与 RAICo 的合作项目。这正是成立 RAICo 的初衷——让成员单位能够共享挑战，携手攻克难题。

为绘制废物处理设施地图，采用激光雷达扫描仪采集了空间内所有物体的精确位置数据。这些数据点与塞拉菲尔德有限公司原始设施设计中的 CAD 模型一同被传送至 RAICo。

RAICo 利用这些资料构建了塞拉菲尔德乏燃料包壳筒仓的精确数字孪生模型，完全复现其真实布局。这一成果依托其自主研发的 RHOVR 三维可视化软件平台实现，该平台同时采用以游戏开发闻名的虚幻引擎技术，能够创建高度逼真的三维作业环境。

随后，获取并集成了现成的机器人软硬件模拟器。这是整个项目中最具技术挑战性的环节——相当于在虚拟 PFCS 环境中完整嵌入了机器人的数字孪生体。

产品完成后，用户可以编程机器人模拟器（如同操作真实机器人一样），并观察虚拟机器人实例在照片级逼真的 PFCS 虚拟环境中运行该程序。程序员随后能直观评估运行结果——例如机器人是否选择最优路径、新增工具后是否仍能正确执行擦拭废料容器等动作，以及行进过程中是否发生碰撞——之后再修改应用至真实机器人控制软件。

该模拟器经过六个月的验证，并于 2025 年 3 月在坎布里亚郡怀特黑文（Whitehaven）的 RAICo1 设施进行了预演。

从预演到应用

该预演广受好评，随后可用版本移交至塞拉菲尔德卓越工

程中心。这款工具目前仍属新兴技术，现阶段主要实际价值体现在培训领域——操作人员如今能通过虚拟方式零距离接触机器人，而非依赖缺乏可靠深度感知的监控屏幕。它同时也成为向内外利益相关方展示塞拉菲尔德机器人技术实力的有效工具。

但真正的价值在于其能够对废物处理机器人进行虚拟编程。与所有安全关键应用一样，此类操作需遵循特定流程。必须对操作序列进行严格测试以确认其适用性。塞拉菲尔德公司还需建立严格的流程与网络安全措施，确保程序能从模拟器（运行于沙箱环境中，与公司 IT 系统物理隔离）安全传输至机器人。团队对此持乐观态度，预计首套经模拟器验证的程序将于明年投入运行。

塞拉菲尔德模拟器的更广泛潜力

PFCS OpSim 是塞拉菲尔德首创，但绝非终章。首批扩展目标包括箱体封装厂（BEP）与封装产品仓库—废物转运路线（EPS-WTR），由机器人在人类难以进入的区域执行废物处理、尺寸缩减、螺栓固定、拭擦作业等精密操作。以 BEP 为例，部分作业舱的高危环境将完全禁止人员进入，操作人员只能依靠景深有限的摄像反馈实施作业。在此应用模拟器既可实现安全精准的程序调试与故障排除，又能大幅提升培训可及性。

目前已有两台同类机器人在运，一旦 BEP 投入使用还将新增至少 10 台，在塞拉菲尔德规模化应用机器人模拟器的前景明朗。更重要的是，NDA 下属其他场区面临相似挑战，这项技术有望成为多个场址机器人模拟应用的蓝本。

协作的价值

该模拟器的研发能力得益于 RAICo 合作汇集的专业知识。塞拉菲尔德有限公司拥有自身场址的专业认知，并长期认可先进数字模拟的价值，但内部缺乏专业的机器人技术与三维可视化能力。

RAICo 凭借其在核工程、机器人技术和软件开发领域的综合能力，已研发出解决该问题的工具并积累了专业经验。不过，与塞拉菲尔德公司协作理解现场具体配置与挑战同样至关重要。最终诞生的是一款性能稳定的工具，其交付速度更快、成本效益更高——这对塞拉菲尔德有限公司和纳税人而言是双赢成果。

拉维·丘尼拉尔，塞拉菲尔德有限公司机器人与人工智能部门负责人评论道：“与 RAICo 的合作正在加速实现我们的使命，并为核退役领域的创新树立了新标杆，这一模式可在塞拉菲尔德及 NDA 旗下其他运营公司推广复制。”

仿真技术并非全新事物，其在航空航天等领域的应用已相当成熟。但在核退役领域，由于新技术应用需遵循严格的安全规程，仿真应用仍属创新尝试。当前项目正打破这一局面，塞拉菲尔德有限公司期待在验证成功后快速推进模拟器的规模化应用。

当然，该项目是塞拉菲尔德场区及 NDA 旗下更广泛数字化行动的一部分，旨在运用无人机、机器人四足设备、虚拟培训及手套箱自动化等数字工具提升安全性与作业效率。

核设施退役工程极其复杂，必须遵循极高的安全标准。当

今的退役场地涉及各类高难度空间中的多样化修复任务——这些空间在设计时均未考虑现代技术的应用。机器人技术与数字化技术显然具备加速实现这一使命的潜力。不存在能解决所有问题的单一方案——挑战与风险实在过于多元。像塞拉菲尔德这样的场区需要精准采用机器人与人工智能，针对具体挑战逐个击破，每次采用都应使核退役任务更安全高效——从而整体加速进程，降低核退役的风险与成本。

对外交流合作部 余少青 供稿

编译自国际核工程（Nuclear Engineering International）

<https://www.neimagazine.com/>