

doi: 10.7690/bgzd.2021.03.005

# 基于人工智能的飞行模拟器大脑模型构建

杨 芸, 李京伟, 李雪青, 范毅晟

(海军航空大学海军模拟飞行训练中心, 北京 102488)

**摘要:** 为解决当前飞行模拟器建设发展存在的问题, 构建一种飞行模拟器大脑模型。在对当前人工智能技术进行深入研究的基础上, 对该模型各子系统集成功能和关键技术进行详细分析。结果表明: 该模型可为飞行模拟器的智能化、体系化发展提供一种系统化解决方案, 进一步提升和拓展飞行模拟器的能力, 使其在飞行训练中发挥更大作用。

**关键词:** 飞行模拟器; 人工智能; 大脑模型; 智能化; 群体智能

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Construction of Flight Simulator Brain Model Based on Artificial Intelligence

Yang Yun, Li Jingwei, Li Xueqing, Fan Yisheng

(Naval Simulation Flight Training Center, Navy Aviation University, Beijing 102488, China)

**Abstract:** In order to solve the problems in the current development of flight simulator, a flight simulator brain is constructed. It analyzed integration function in each subsystem and key technology of the model in detail based on the research of current artificial intelligence technology. The results show that the model can provide a systematic solution for the flight simulator's intelligent and systematic development, and improve and expands the capability of flight simulator, and make it play a greater role in flight training.

**Keywords:** flight simulator; artificial intelligence; brain model; intelligent; swarm intelligence

## 0 引言

模拟飞行训练作为一种安全、经济的飞行训练模式, 长期以来, 美国等西方国家十分重视该领域的发展。一方面大力推动真实-虚拟-构造(live-virtual-construction, LVC)技术的发展, 开发新型 P6 吊舱与新机型模拟器, 另一方面开展实装-模拟对抗演习, 比如“红旗”军演, 来检验相关装备的效能<sup>[1-4]</sup>。该领域在国内并未引起足够重视, 导致国内飞行模拟器(以下简称“模拟器”)智能化程度不高、建设发展不成体系、训练中各种问题较多。

进入 21 世纪后, 人类在人工智能领域取得了巨大突破。以深度学习为代表的各种人工智能技术不断被提出, 人类进入了人工智能时代<sup>[5]</sup>, 加快了机器智能化的实现。2012 年, 谷歌正式将“马文计划”称作“谷歌大脑”, 率先开始以大脑命名自己的复杂智能巨系统<sup>[6]</sup>。紧随其后, 百度提出了“百度大脑”, 阿里巴巴提出了“ET 大脑”, 腾讯提出了“腾讯超级大脑”。随着世界主要科技公司向着“大脑”领域进军以及类脑智能<sup>[7]</sup>、城市大脑<sup>[8]</sup>的发展, 人工智能进入了系统化构建“大脑”时期, 体系化和数据利用程度更高。自 2012 年 GE 提出工业互联网概念

后, 该领域得到了快速发展, 引发了新一波工业革命浪潮<sup>[9]</sup>, 有效促进了机器、数据和人的融合<sup>[10]</sup>, 为模拟器智能化、模拟器体系化建设和模拟训练中各种问题的系统化解决提供了契机。

在当前人工智能大发展的背景下, 笔者结合人工智能技术和互联网大脑模型<sup>[11]</sup>, 构建飞行模拟器大脑模型, 进一步完善和拓展模拟器各方面功能, 提升模拟器智能化水平, 促进模拟器系统化、体系化建设发展, 解决模拟训练中出现的各种问题。

## 1 概念简介

### 1.1 人工智能技术

人工智能概念于 1956 年诞生, 经历了多次高潮和低谷。2006 年, 深度学习的出现以及在语音识别、图像识别等领域成功应用, 再次掀起了人工智能研究热潮。近 20 年来, 人工智能形成了机器学习、知识图谱、自然语言处理、人机交互、计算机视觉、生物特征识别和虚拟现实/增强现实<sup>[12]</sup> 7 大核心技术。

人工智能是当前技术发展的热点领域, 世界各国都在大力发展人工智能, 推动人工智能技术创新

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-12-10

作者简介: 杨 芸(1991—), 男, 湖南人, 硕士, 助理工程师, 从事飞行仿真、装备管理、工业互联网研究。E-mail: 535926502@qq.com。

发展和应用的落地。我国国务院于 2017 年发布了《新一代人工智能发展规划》，试图抓住人工智能发展的重大战略机遇，构筑我国人工智能发展的先发优势，加快创新型国家的建设，使我国早日成为世界一流强国<sup>[13]</sup>。

### 1.2 互联网大脑模型

互联网大脑模型最早由刘锋团队<sup>[11]</sup>在 2008 年提出，至今已发展出 5 个版本，最新的第 5 版在 2018 年被提出。它起源于以脸书、QQ 等为代表的社交网络，以及社交构造与神经网络的相似性。

互联网大脑十分形象地展现了互联网进化历程，完整地呈现了当前互联网整个生态构造，对各种先进技术、新技术理念进行了系统化梳理和统筹，并且揭示了互联网发展方向：从巨网向大脑进化。互联网大脑的意义不仅体现在揭示互联网发展规律上，还在分析指导当前各科技企业生态构建、揭示科技的未来发展趋势中发挥重大作用。在军事装备如何与当前先进技术结合、揭示军事装备的未来发展趋势、智能化和系统化构建装备发展解决方案等方面，互联网大脑也体现出重大意义。

### 1.3 群体智能

群体智能很大程度上是受自然界生物群体的启示而提出来的，人们发现只有简单本能行为的个体在组成群体后，整体上可以涌现出比较高的智能和完成较为复杂的任务<sup>[14]</sup>。现今群体智能已进入 2.0 时期，即基于互联网的组织结构下被激励进行计算

任务的大量独立个体共同作用下所产生的超越个体智能局限性的智能形态<sup>[15-16]</sup>。

对于群体智能最早的应用是开发各种进化或优化算法，如蚁群算法、粒子群算法等。随着互联网、人工智能技术的发展，对于群体智能的利用逐渐扩展到人类群体和机器群体，可将其分为机器群体智能、人类群体智能、人机结合群体智能 3 种层次<sup>[17]</sup>。群体智能是人工智能重要研究领域之一，当前，已有较多领域利用潜在高效的群体智能方法来解决问題，例如基于群体智能的软件工程方法<sup>[17-18]</sup>、互联网群体智能的涌现与利用<sup>[19]</sup>和智能机器人的进化<sup>[20]</sup>等。

## 2 飞行模拟器大脑模型构建

模拟器最早起源于美国人 Link 于 1929 年设计的“Blue Box”训练器，经历了机械式、计算机模拟和微电子技术 3 个发展时期。随着科学技术发展，模拟器功能不断完善，越来越多地用于飞行训练中。随着模拟训练量不断增多，模拟训练的各种问题越发凸显，比如模拟训练效果评估难、智能化程度低和趣味性差等。这些问题只有在模拟器本身进一步发展后，才能充分解决。另一方面，一直以来模拟器只作为一个独立训练装备在发展，未被打造成一个集成化训练平台，极大地限制了模拟器在飞行训练中的作用发挥。当前，将人工智能技术与模拟器发展相结合已成为必然趋势。为此，在互联网大脑模型基础上，笔者将人工智能技术与模拟器发展相结合，提出了如图 1 所示的飞行模拟器大脑模型。

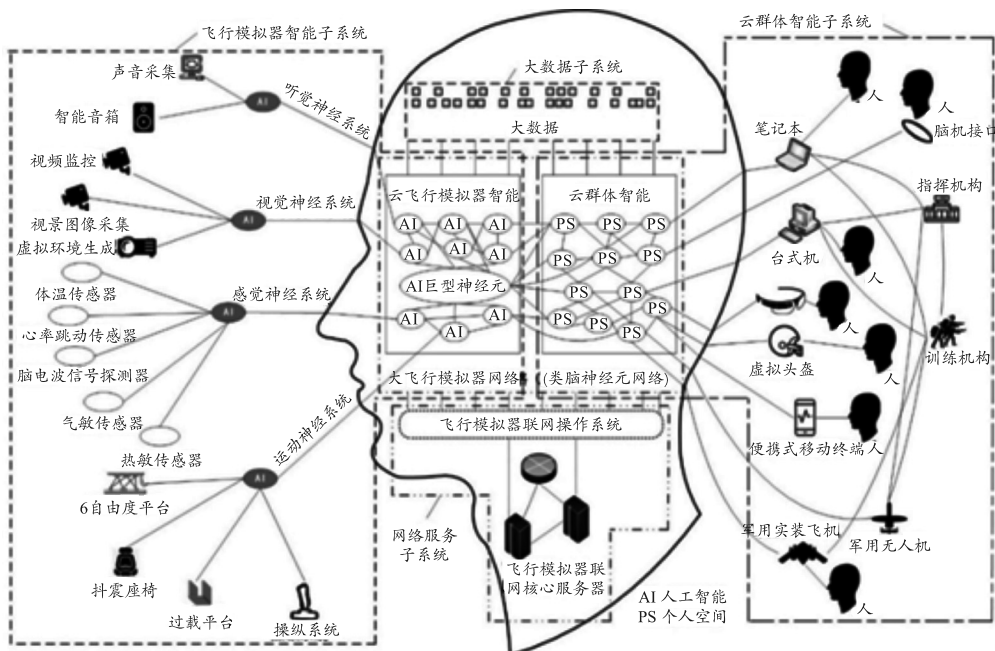


图 1 飞行模拟器大脑模型

该模型分为网络服务、大数据、飞行模拟器智能和云群体智能4个子系统。如图2所示，子系统之间联系十分紧密。

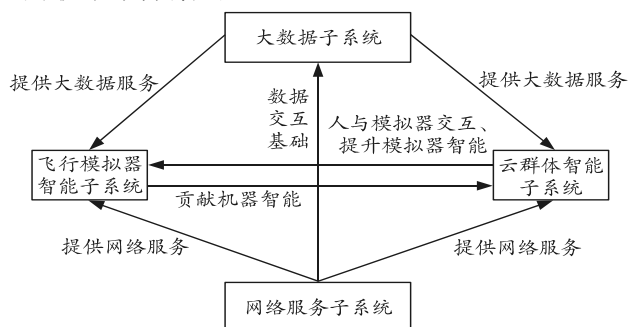


图2 各子系统之间关系

网络服务子系统是基础部分，为飞行模拟器智能子系统、云群体智能子系统提供网络服务，为大数据子系统提供数据交互服务，使得数据能在整个系统内部顺利分发。大数据子系统为飞行模拟器智能子系统、云群体智能子系统提供大数据服务，是这2个子系统发挥作用的关键。飞行模拟器智能子系统专注于单个模拟器和模拟器组网后本身机器的智能实现，为云群体智能子系统贡献机器智能。云群体智能子系统是在大飞行模拟器网络基础上，实现人-模拟器-人之间群体智能的产生，帮助进一步提升模拟器智能。

### 3 飞行模拟器大脑各子系统集成功能分析

与人类大脑一样，飞行模拟器大脑也有自己的功能分区。各子系统功能的划分，在促进本系统功能实现与完善的同时，有助于各子系统之间协同配合，使得飞行模拟器大脑功能清晰明了。

#### 3.1 网络服务子系统

网络服务子系统是飞行模拟器大脑的基础，为整个大脑的运行提供网络软硬件支持。构建大飞行模拟器网络软硬件系统，实现人-物-人三者之间的网络互连，保持整个网络正常运行是其主要功能。该网络既包括各种模拟器之间组网，又包括模拟器与其他一些相关系统组网，比如模拟器与实装飞机之间组网、模拟器与指挥机构之间组网等。为此，需要建设一些核心的飞行模拟器联网服务器和大的数据中心，研发相应飞行模拟器联网操作系统和大型系统组网技术，实现模拟器与实装、指挥机构和训练机构等其他系统之间互连。

#### 3.2 大数据子系统

当前，大数据是人工智能实现的基础。在飞行

模拟器大脑模型中，大数据子系统以大数据技术、云计算技术为核心进行构建，包括数据抽取与集成、数据存储与分发、数据分析、数据可视化。在人工智能应用中，对数据实时性有一定要求；为此，需要利用当前先进的大数据技术构建相应集成数据库系统，采用合适的大数据、云计算处理框架，以满足飞行模拟器大脑各子系统之间快速的数据交互需求，确保飞行模拟器大脑正常运行。

#### 3.3 飞行模拟器智能子系统

如图3所示，飞行模拟器智能子系统，即飞行模拟器大脑的左脑，包含4个部分<sup>[21]</sup>：1) 以物联网技术为基础构建的模拟器感知神经结构模块；2) 信息接入控制模块；3) 以人工智能技术为基础构建的推理与学习模块；4) 在前3部分基础上开发的应用模块。

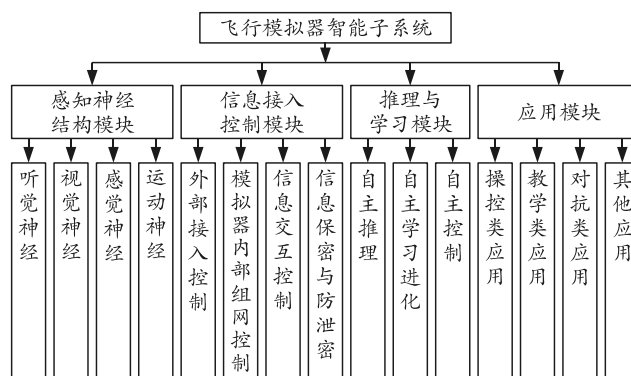


图3 飞行模拟器智能子系统结构

感知神经结构模块作为数据采集和数据传递的终端，负责模拟器各种信息采集、与人之间进行信息交互以及模拟器终端控制。他们以各种传感器为基础，搭建传感器网络，在大数据子系统提供大数据服务的基础上，与推理与学习模块相结合，形成完整的神经感知处理回路，即图1所示的4种神经系统。听觉神经系统负责各种语音播报和人声的采集、处理与响应，操作者可以直接与模拟器进行对话，通过语音对模拟器进行操控。视觉神经系统负责各种视频信息采集与处理、模拟器视景系统中各种虚拟环境生成，进行人脸识别。感觉神经系统负责模拟器座舱环境信息采集和操作者生理、心理信息采集，以及模拟座舱环境生成。模拟器座舱环境信息包括座舱内温度、湿度、气压、含氧量和烟雾等信息。运动神经系统负责各种运动平台信息收集，对平台进行自主控制。

信息接入控制模块主要负责模拟器内外信息交互控制，具体包括：1) 外部接入控制，负责外部请

求处理；2) 模拟器内部组网控制，负责多模拟器组网控制；3) 信息交互控制，负责多模拟器组网时信息交互控制，LVC 训练时与实装之间的信息交互控制，以及其他机构接入时的信息交互控制；4) 信息保密与防泄漏，负责对信息进行加密与分发控制，防止信息被盗取和泄露。

推理与学习模块是飞行模拟器智能子系统神经中枢，负责对采集到的模拟器各种信息进行智能化处理和模拟器智能化控制。它通过人工智能技术，实现自主推理、自主学习进化和自主控制。

应用模块主要是在以飞行模拟器智能子系统前 3 个模块和大数据服务基础上，开发的各种实际功能应用。

操控类应用，主要是指对模拟器进行远程操控。智能语音技术作为 AI 应用最成熟的技术之一，在很多领域得到了迅猛发展<sup>[22]</sup>。对模拟器进行操控，可以借助智能语音技术，通过开发语音助手实现模拟器远程操控，如通过语音操控模拟器座舱环境，实现基于每个操作者生理状况的舒适座舱环境生成，为操作者提供空中飞行训练环境真实模拟，以及通过语音操控完成模拟器复位、初始化等。近年来，机器视觉技术快速发展，人脸识别在各领域大量应用。通过人脸识别技术来自动识别操作者，对操作者信息进行个性化管理，并与其他先进技术相结合，实现基于操作者历史信息的个性化飞行技术科目设计、生成操作者个体成长档案等，更好地锤炼操作者的飞行技术，纠正孤僻动作。

教学类应用，主要是指基于人工智能技术，在模拟器上开发的各种辅助教学功能。教学是模拟器主要功能之一，但当前飞行教员缺乏，影响了教学效果提升。实现模拟器自主教学与训练效果自动评估有助于解决这一问题，提升教学效果。实装驾驶体验和优秀操作者驾驶体验为操作者提供了安全、快速的学习途径。实装驾驶体验，一方面可以通过导入实装飞行数据，教导操作者实装操作流程，提供较为真实的驾驶体验；另一方面，可以通过与实装训练同步，实现一对多教学，加快飞行员培养进程。优秀操作者驾驶体验，通过为操作者提供经验丰富、技术熟练操作者的成长历程，加快培养进程，减少操作中的孤僻动作。特情场景开发也是必不可少的，既能使操作者在安全环境中体验特情过程，又能锻炼操作者的应急处置能力和熟练掌握应急处置流程。

对抗类应用既包括虚拟对抗，又包括与实装飞机之间进行飞行对抗演练。对抗练习是锻炼、检验操作者飞行技能的最佳手段。虚拟对抗演练，通过人工智能技术构造“智能蓝军”，实现在虚拟战场环境中的对抗演练，不仅能有效降低费用，而且能实现场景多样化，更好地加强操作者技战术掌控能力。模拟器-实装飞行对抗演练是未来模拟飞行训练的一种发展趋势<sup>[23]</sup>，近年来，美军通过开发 LVC 技术，大力推进该领域的发展。2018 年，驻日美军飞行员就通过在基地使用飞行模拟器，参加了美本土实时飞行对抗训练。通过 LVC 技术开发的“SLATE 系统”，是本地模拟器参与战术对抗训练的关键<sup>[4]</sup>。

其他应用主要是指利用模拟器采集到的数据，开发一些其他方面应用。如通过操作者生理、心理数据对操作者身心状况进行评估，给出疗养或锻炼规划建议。这些数据还可作为新飞行员选拔的参照。

### 3.4 云群体智能子系统

云群体智能子系统，即飞行模拟器大脑的右脑，主要包含以工业互联网架构<sup>[10]</sup>、云计算技术、大数据技术为基础构建的云群体智能系统，其构成如图 4 所示。它将不同群体通过云端系统联接起来，目的在于加强多群体知识的利用和促进群体智能的涌现。

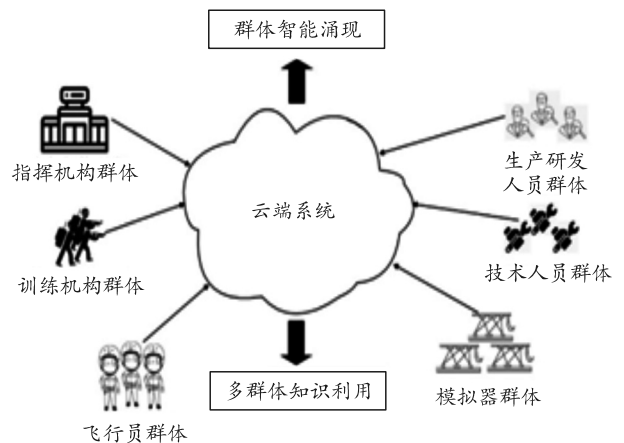


图 4 云群体智能子系统构成

该子系统联通不同的群体，主要在人类群体智能、人机结合群体智能这 2 个层次上实现群体智能的利用。

在人类群体智能层次，一方面要有效利用不同群体的专业领域知识；另一方面通过打破不同领域之间的隔阂，加强不同领域之间信息沟通，促进对各种问题的有效解决、流程革新和知识涌现等。在多群体知识利用方面，知识图谱技术可用来构建多

群体知识库,实现知识在线搜索与访问,使各领域人员可以方便快捷地实时学习和掌握不同群体知识。通过构建类似于“知乎”的问答社区,不同专业人员可以发布和回答工作中遇到的问题,有助于集中群体智慧来解决问题,加强知识和经验保留。在群体智能涌现方面,通过构建实时信息交互平台,如美国的P5吊舱,打破实装飞行训练与模拟训练之间的壁垒,不仅可以有效解决当前只能一对一飞行教学的困境,增加飞行员培训量,而且可以加强对抗演练,提升飞行员技战术水平,集中群体智慧促进战术战法更新。此外,平台中数据通过大数据和人工智能技术进行挖掘,形成宝贵的飞行经验。云制造技术有效地融合发展了网络化协同和智能制造<sup>[24]</sup>,通过集成云制造平台,可以实现模拟器研发制造过程中多群体智慧的集成,加快模拟器研发制造过程,提升模拟器实用性能。

人机结合群体智能专注于人类群体智能与机器群体智能的结合。通过将人类专家智慧与人工智能算法结合,可获得远超机器或者人本身的能力<sup>[25]</sup>。当前,对于模拟训练效果的评估较为困难,一方面,评估算法开发较为困难,另一方面,人类专家评估过于主观,将机器群体智能与人类专家知识相结合,是解决这一问题的有效途径。人工智能技术快速发展,使得智能化战争呼之欲出,人机智能协同是制胜关键之一<sup>[26]</sup>。美国等西方国家在大力推进人工智能技术应用于高强度空战对抗,如“空战进化项目”“空中博格人”等,实现有人-无人高度协同。在模拟训练中,可以通过开发虚拟智能僚机、智能助手,来实现有人-无人编队对抗练习、人机协同对抗练习,促进战术战法的改进。也可以通过LVC技术,在实装训练中实现有人-无人编队对抗练习、人机协同对抗练习、指挥智能化,加强战术战法练习和改进。

## 4 关键技术分析

飞行模拟器大脑的基础在于构建大型人机交互网络,目的在于实现模拟器智能化与群体智能利用。本文中主要对飞行模拟器大脑的2方面关键技术进行分析,分别为大型人机网络交互和模拟器智能化。

### 4.1 大型人机网络交互

飞行模拟器大脑作为一个大型人机交互系统,为了实现人-模拟器-人三者之间有效交互,需要突

破2方面的难题:1)构建高效的大型人机交互网络;2)设计科学的大型人机网络交互模式。这两者的实现,需要基于物联网技术与人机交互技术。

#### 4.1.1 物联网技术

物联网技术的发展为构建更加高效的大型人机交互网络提供了基础<sup>[27]</sup>。飞行模拟器大脑人机交互网络的构建分为3个层次:1)构建人与人交互网络,实现基本的模拟飞行训练,人操作模拟器进行组网训练,模拟训练过程中的实时交流等;2)构建LVC训练网络,在第一个层次基础上,实现模拟器与实装之间对抗训练;3)构建模拟器与模拟器交互网络,实现智能模拟器自主组网训练,人与智能模拟器之间对抗训练,智能模拟器与实装之间对抗训练。借助互联网技术,第1个层次实现起来相对较容易,而第2、3个层次不仅涉及人与人交互,还包括人与物、物与物之间信息交互,后两者正是物联网的核心。基于物联网技术,构造飞行模拟器大脑的大型人机交互网络体系框架,分为3层:底层为无线传感器网络、智能设备、模拟器、RFID等,中间层为网络设备和中间件,顶层为飞行模拟器大脑平台。当前,物联网技术在较多领域取得了成功应用。在大型人机交互网络构建时,物联网中的传感器技术可以较好地对模拟器信息进行采集,通过与5G、数据链、云计算等技术相结合,实现人与模拟器、模拟器与模拟器、模拟器与实装之间、模拟器与其他设备之间更加高效的信息交互。

#### 4.1.2 人机交互技术

人机交互技术是科学地设计人机网络交互模式的基础<sup>[28]</sup>。大型网络交互模式设计涉及5个方面:人与模拟器之间交互模式、人与人之间交互模式、模拟器与模拟器之间交互模式、模拟器与实装之间交互模式及模拟器与其他设备之间交互模式。在这些交互模式设计中,人是核心,目的是使得模拟器与人的交互更加和谐,更加契合人类社会的实际,实现人机共生。语音交互是人类社会最基本且高效的一种交互方式。当前,语音交互技术已实现人与计算机之间较好的沟通,将其作为一种交互方式应用于大型网络交互模式设计中,能实现人-模拟器-人三者之间高效的信息交互。情感交互是一种更高层次的信息交互,情感交互技术的发展最终将使得计算机具有情感理解和表达能力。在大型网络交互模式设计过程中,情感交互技术的应用,将使人-模拟器-人三者之间的交互更加自然,也使模拟器

能更好地理解操作者的一些情感,从而提醒操作者及时从疲劳、厌烦等情绪中走出,提升模拟训练效果。

## 4.2 模拟器智能化

模拟器智能化包括 2 部分: 1) 模拟器本身的智能化,实现模拟器自主训练、自主评估和充当对手等; 2) 如何更好地总结利用模拟训练知识与经验,并将实装飞行训练知识与经验应用于模拟训练中,提升模拟训练的实战性。

### 4.2.1 机器学习技术

机器学习技术是实现模拟器智能化的关键。早在 2017 年, DeepMind 团队就应用强化学习技术成功构建了 StarCraft II 学习环境,开发学习算法实现计算机与人类玩家的对战,并使得算法能不断学习进化<sup>[29]</sup>。2019 年, DeepMind 公司开发的 AlphaStar,在 Battle.net 上的玩家排名超过 99.8%<sup>[30]</sup>。AlphaStar 使用摄像机观察世界,有着和人类玩家一样的约束。模拟器的仿真环境与星际争霸游戏的虚拟环境相似,通过将强化学习技术应用于模拟器自主训练环境的构造,开发类似于 AlphaStar 的模拟训练助手,模拟器将具备自主进化能力,更好地辅助飞行员完成模拟训练。在模拟器自主评估方面,利用监督学习技术,构建模拟器自主评估模型并开发相应的学习算法,能较好地实现模拟器对训练成绩自主评估。模拟器自主评估系统的设计分为 3 个步骤: 1) 搜集整理并标注模拟训练数据,数据包括飞参数据、模拟训练过程中采集的视景数据、座舱操作视频数据,进行分类整理后,与专家知识相结合进行标注; 2) 设计有效的学习模型并开发相应的学习算法; 3) 对学习算法进行训练并不断改进,使其能达到较高的评估准确率。

### 4.2.2 知识图谱技术

知识图谱是一种较为先进的领域知识描述和建模技术<sup>[31]</sup>,通过知识获取、知识表示、知识抽取、知识融合、知识图谱补全与推理等,构建可视化的图谱来形象地展示某一领域的核心结构、整体知识架构。经过多年的发展,模拟训练和实装飞行训练均积累了大量的知识,可以用于模拟飞行训练领域知识图谱的建模。在模拟训练和实装飞行训练知识的表示方面,可以采用距离模型、单层神经网络模型、能量模型、双线性模型、张量神经网络模型、矩阵分解模型和翻译模型等<sup>[32]</sup>。其中翻译模型中的

TransE 模型<sup>[33]</sup>最具代表性,参照这一模型及其改进型,能较好地构建模拟训练和实装飞行训练知识表示模型。知识抽取分为实体识别和实体关系抽取。其中,实体关系抽取是关键,在这一领域,近年来基于深度学习的方法取得了较大进展,在特征提取深度和模型精确度上已逐渐超过了传统基于特征和核函数的方法<sup>[34]</sup>。在构建模拟训练和实装飞行训练知识实体关系的抽取模型时,可以采用基于 RNN、CNN、LSTM 这 3 种模型及其改进型。在知识融合方面,通过加入民航和国外与飞行训练有关的一些知识库,将使模拟飞行训练领域的知识图谱更加丰富。知识图谱补全可以分为概念补全和实例补全 2 个层次。概念层次的常用方法有基于描述逻辑的规则推理机制、基于机器学习的类型推理机制和基于表示学习的类型推理机制;实例层次的常用方法有基于随机游走的概率补全方法和基于表示学习的补全方法<sup>[35]</sup>。

## 5 结束语

随着人工智能技术深入发展,智能化是武器装备未来发展的必然趋势。笔者提出的飞行模拟器大脑模型,对于促进模拟器智能化发展有着重大意义。它不仅对当前人工智能技术如何应用于模拟器发展提供指导,而且系统化构造了模拟器未来发展蓝图,指明了模拟器未来发展趋势。当前提出的飞行模拟器大脑模型远非一个成熟大脑模型,随着各种科学技术发展,还将不断得以完善。

## 参考文献:

- [1] GUSTAVSSON P M, BJÖRKMAN ULF, WEMMERGÅRD J. LVC Aspects and Integration of Live Simulation[C]// Fall Simulation Interoperability Workshop (FallSIW 2009). Orlando, FL, 2009.
- [2] 李进,吉宁,刘小荷,等.美军新一代支持联合训练的 JLVC2020 框架研究[J].计算机仿真,2015,32(1): 463-467.
- [3] 何晓晓. P5 老矣? ——美军征集 P6 空战训练系统的方案[J/OL]. 2020-02-29. <http://mp.ofweek.com/security/a645693623386>.
- [4] 美军“安全保密的真实-虚拟-构造高级训练环境”(SLATE)空战训练系统分析[N].中国航空报,2019-01-15(5).
- [5] (美)杰瑞·卡普兰.人工智能时代[M].杭州:浙江人民出版社,2016: 19.
- [6] 刘寅斌,胡亚萍.从谷歌大脑看人工智能在知识服务上的应用[J].图书与情报,2017(6): 112-116.

- [7] 徐波, 刘成林, 曾毅. 类脑智能研究现状与发展思考[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(7): 793-802.
- [8] 华先胜, 黄建强, 沈旭, 等. 城市大脑: 云边协同城市视觉计算[J]. 人工智能, 2019(5): 77-91.
- [9] 美国通用电气公司(GE)编译. 工业互联网: 打破智慧与机器的边界[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 1-8.
- [10] 魏毅寅, 柴旭东. 工业互联网: 技术和实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 8.
- [11] 刘锋. 崛起的超级智能: 互联网大脑如何影响科技未来[M]. 北京: 中信出版集团, 2019: 7.
- [12] 中国电子技术标准化研究院. 人工智能标准化白皮书(2018版)[R/OL]. 2018-01-24. <http://www.cesi.ac.cn/201801/3545.html>.
- [13] 新一代人工智能发展规划[EB/OL]. 2017-07-20. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-07/20/content\\_5212064.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-07/20/content_5212064.htm).
- [14] 何小贤, 朱云龙, 王玫. 群体智能中的知识涌现与复杂适应性问题综述研究[J]. 信息与控制, 2005(5): 50-56.
- [15] 赵健, 张鑫祺, 李佳明, 等. 群体智能 2.0 研究综述[J]. 计算机工程, 2019, 45(12): 1-7.
- [16] LI W, WU W J, WANG H M, et al. Crowd intelligence in AI 2.0 era[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017(18): 43.
- [17] 徐立鑫, 吴化尧. 基于群体智能的软件工程方法综述[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(3): 487-512.
- [18] 张伟, 梅宏. 基于互联网群体智能的软件开发: 可行性、现状与挑战[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(12): 1601-1622.
- [19] 谭丽华, 董毅明, 李林红. 互联网群体智能的涌现[J]. 管理学报, 2010, 7(12): 1839-1845.
- [20] 戚骁亚, 刘创, 富宸, 等. 群智进化理论及其在智能机器人中的应用[J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 101-111.
- [21] 童恩栋, 沈强, 雷君, 等. 物联网情景感知技术研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 9-14, 20.
- [22] 甘玉珏, 苏军根, 林健, 等. 智能语音产品现状及展望[J]. 广东通信技术, 2017, 37(12): 66-68.
- [23] PAL J V D, KEUNING M, LEMMERS A. A Comprehensive Perspective on Training: Live, Virtual and Constructive[C]. Bern: NATO Modeling and Simulation Group Symposium, 13, 1-10, October, 2011.
- [24] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 再论云制造[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 449-457.
- [25] 李光林, 郑悦, 吴新宇, 等. 医疗康复机器人研究进展及趋势[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 793-802.
- [26] 胡晓峰. 战争科学论: 认识和理解战争的科学基础与思维方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 334.
- [27] LI S, XU L D, ZHAO S. The internet of things: a survey[J]. Information Systems Frontiers, 2015, 17(2): 243-259.
- [28] 范俊君, 田丰, 杜一, 等. 智能时代人机交互的一些思考[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(4): 361-375.
- [29] VINYALS O, EWALDS T, BARTUNOV S, et al. StarCraft II: a new challenge for reinforcement learning[J/OL]. 2017. ArXiv:1708.04782.
- [30] VINYALS O, BABUSCHKIN I, CZARNECKI W M, et al. Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning[J]. Nature, 2019, 575(7782): 350-354. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1724-z>.
- [31] 王昊奋, 漆桂林, 陈华钧. 知识图谱: 方法实践与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019: 13.
- [32] 刘知远, 孙茂松, 林衍凯, 等. 知识表示学习研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(2): 247-261.
- [33] BORDES A, USUNIER N, GARCIA-DURAN A, et al. Translating Embeddings for Modeling Multi-relational Data[C]//Proc of NIPS. Cambridge, MA: MIT Press, 2013: 2787-2795.
- [34] 王硕, 杜志娟, 孟小峰. 大规模知识图谱补全技术的研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(4): 551-575.
- [35] 鄂海红, 张文静, 肖思琪, 等. 深度学习实体关系抽取研究综述[J]. 软件学报, 2019, 30(6): 1793-1818.