

基于 Agent 的空中交通系统建模与仿真研究

王超,徐肖豪

WANG Chao,XU Xiao-hao

中国民航大学 空中交通管理研究基地,天津 300300

Air Traffic Management Research Base,Civil Aviation University of China,Tianjin 300300,China

E-mail:wangch6972@tom.com

WANG Chao,XU Xiao-hao.Researching on air traffic system using Agent-based modeling and simulation.Computer Engineering and Applications,2008,44(31):12-14.

Abstract: Air traffic system is analyzed from the aspects of system's attributes,internal operating mechanisms and external behaviors.A hybrid air traffic simulation model described by the combination of discrete-event and continuous-time models is proposed.The simulation model uses Agent-based techniques to describe micro behaviors of the air traffic individuals,and integrates micro behaviors into dynamic macro performance in system-wide level.Typical Agent-based air traffic models such as aircraft agent and controller agent have been constructed.An arrivals and departures simulation application has validated that the Agent-based hybrid air traffic model is provided with high fidelity in micro behavior and macro performance of the system.

Key words: Agent;air traffic simulation;discrete-event;continuous-time;micro behavior;macro performance

摘要:从系统特性、内在运行机制和外在行为表现等方面对空中交通系统进行了深入分析,提出基于离散事件和连续时间相结合的混合空中交通仿真模型。该模型采用 Agent 技术表现实现个体微观行为的仿真,集成个体微观行为构成系统宏观性能表现。构建了典型的空中交通系统的 Agent 模型:飞机 Agent 和管制员 Agent。最后,通过一个起飞和落地的应用验证了基于 Agent 的空中交通混合仿真在模拟个体微观行为和系统宏观表现方面均具有较高的逼真度。

关键词: Agent;空中交通仿真;离散事件;连续时间;微观行为;宏观性能

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2008.31.004 文章编号:1002-8331(2008)31-0012-03 文献标识码:A 中图分类号:TP391

1 前言

中国航空运输业持续高速发展,已经连续 10 多年平均保持 18.5%的增长率。中国空中交通系统已经无法满足日益增长的航空运输需求。全国主要骨干机场和东部地区空中交通容量严重不足,如首都机场设计容量为 52 架次/h,实际高峰期达到 68 架次/h,造成了严重的交通拥塞、航班延误和安全隐患。在有限的空间资源条件下,修建新机场开辟新航路并不能完全改善交通状况。于是提出在交通规划与管理方案实施之前对其实施效果模拟、评价的方法。用仿真的方法评价系统性能,提供一种安全和费用低廉的检查系统变化造成的潜在影响的方法。

目前应用广泛的空中交通仿真系统工具有 TAAM,SIMMOD 和 RAMS。其中,TAAM 面向空中交通的全部过程,强调“门到门”的仿真;SIMMOD 是离散事件仿真模型;RAMS 是基于 4D 航迹预测的连续时间仿真模型。从发展历程上看,以上 3 种仿真模型产生于 20 世纪 80、90 年代,都存在着仿真逼真度差和效率低的问题。

面向对象技术是开发仿真模拟软件的主要手段之一,它通

过对象、继承、封装、消息传递等机制实现对客观事物的有力描述,实现问题描述与处理的统一,大大提高了开发效率。然而随着开发的不断深入,人们逐渐发现面向对象存在缺少自主性和主动性的缺陷,在描述有生命或者有行为的智能实体时便无能为力。Agent 技术以其自主性与交互性的特点弥补了面向对象技术的不足。因此利用 Agent 技术便成为了交通仿真的首选技术^[1]。

2 空中交通系统的仿真分析

2.1 空中交通系统的特性分析

(1)空中交通系统是大范围、多角色参与的复杂系统。空中交通系统地理范围广大,可以涵盖全球、全国或一个大的管制区。空中交通系统包括不同角色的实体,按照各自的工作方式在复杂技术社会环境中交互作用。空中交通系统可以定义为独立实体(如飞行器、管制员、通信设备和导航台等)相互作用的集合。管制员和飞行员响应环境和其他实体的变化,不断地改变飞机的航迹,同时也改变了运行环境本身。

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA12A105);

天津市科技支撑计划重点项目(Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs of Tianjin under Grant No.07ZCKFGX01600)。

作者简介:王超(1971-),男,博士研究生,副研究员,研究方向为空中交通信息与控制、空中交通规划与管理;徐肖豪(1949-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为空中交通管理。

收稿日期:2008-06-27 **修回日期:**2008-08-05

(2)空中交通系统是分布式系统。主要有下列3层含义:①系统的众多工作单元在地理位置上分布存在,以追求各自工作目标最优为目的独立计算处理各自管制范围内的空中交通;②系统具有协同工作特性。尽管各个独立的管制单元首先满足其自身的工作目标,但为了整个空中交通系统的利益,需要进行交通信息的传递、交互,并可根据需要对飞机实体或工作程序进行临时调整;③空中交通系统是个开放的系统。如把某个管制单元作为一个子系统,随着时间的推移,不断有飞机进入或离开,子系统的状态也在不断的变化。

(3)空中交通系统是社会、技术系统。系统中除了飞机、导航通讯设备等技术实体外,还有飞机运行的大气媒介、机场和航路结构以及运行程序等环境,更重要的是这些实体都是在人(飞行员和管制员)的管理与操作下工作的。人的生理和社会属性自然也成为影响 ATM 系统性能的重要因素之一。

2.2 空中交通仿真的内在机制

空中交通系统作为大范围、复杂系统不能简单的用离散事件系统或连续事件系统描述^[2-3]。从仿真的内在机制上分析发现:空中交通仿真具有离散事件仿真的特征。通过给定离散事件仿真模型中各种离散随机变量来完成对空中交通系统进行实验分析。如通过按照某种分布规律生成交通流中的机型混杂比、飞机到达延误和机组反应时间等随机变量,从宏观上来研究和分析在各种交通假设下产生的交通流行为和系统容量、延误等性能指标。但是,随着对仿真工作的需要的扩展,要求某些仿真模型具有较高逼真度。例如,在研究跑道容量的问题中,连续使用跑道的飞机的时间间隔需要达到秒级精确度,因此,必须为飞机的飞行过程建立连续时间模型。飞机的连续时间仿真模型包含飞机空气动力学模型、大气环境模型、跑道模型和起飞与落地模型^[4]。这些模型相互作用,完成对飞机起飞和落地过程中速度的高逼真度仿真,从而为跑道容量的研究打下理论基础。

由此可见,不同的仿真实体需要不同逼真度的仿真模型。空中交通仿真具有离散事件和连续时间的综合特征,不同实体的个体行为和系统的整体性能表现可以通过连续时间和离散事件的有机整合建模实现。

2.3 从微观仿真到宏观仿真

真实的空中交通系统的宏观交通流表现是各种实体的个体之间行动以及个体与环境交互的结果。交通态势体现了系统的一种整体特性,是由低层的个体行为引起,又不能仅通过微观的仿真预测和感知。近来在交通仿真领域逐渐出现了打破微观仿真和宏观仿真界线的趋势^[5]。通过建立个体 Agent 模型,并将其置于真实场景的丰富的仿真环境中,来观察系统行为来研究交通流的宏观特性^[6]。因此,本文概括出两个仿真层次:(1)个体 Agent 层次。尤其象飞行员和管制员和 Agent,他们表现了个体 Agent 的行为,如管制员对当前飞机的指挥指令行为,飞行员的操作行为以及飞机的速度、高度、位置等信息;(2)系统广度的交通态势。仿真 Agent 个体按照系统仿真机制的组织调度,按照某种时钟推进形式,相互作用,并与仿真环境交互,从而产生宏观效果。既满足了分析系统宏观表现特性,又可观察个体微观行为^[6]。

因此,提出空中交通仿真模型具有离散事件和连续时间模型的综合特征,要求在个体微观行为和系统宏观性能两个层次上进行深入研究。因为空中交通系统是一个复杂的随机系统,所以系统仿真包含各种连续型随机变量和离散型随机变量。系统广度的交通行为特性正是在这些随机条件下仿真个体 Agent 之间、仿真个体与环境之间交互作用的结果。

3 基于 Agent 的空中交通仿真

3.1 Agent 与 Multi Agent

Agent 是面向对象开发方法的高级形态与发展,是由具有知识、信念、意向、期望等因素组成的一个实体,具有自主性与交互性的特点。它可以感知系统环境的变化,并对这种变化做出自主的反应。该技术具有以下特点:(1)自治性。能根据外界环境的变化而自动地对自己的行为和状态进行调整而不是仅仅被动地接受外界的刺激,具有自我管理自我调节的能力;(2)反应性。即能对外界的刺激作出反应的能力;(3)主动性。对于外界环境的改变能主动采取活动的的能力;(4)社会性。具有与其它人进行合作的能力。不同的 Agent 可根据各自的目的意图与其它 Agent 进行交互,以达到共同解决问题的目的。

Multi Agent 系统是由不同的单个 Agent 为完成某一特定任务而组成的集合。Agent 总是处在 Multi Agent 系统的环境中。Multi Agent 构成的系统是动态、复杂和不确定的^[7]。

3.2 基于 Agent 的空中交通仿真

鉴于空中交通系统的多角色、大范围、复杂的社会技术系统的特点,适合采用基于 Agent 技术来仿真研究。设计仿真系统时要注意以下2个问题:(1)因为空中交通系统具有开放性,包含众多异种 Agent。每类 Agent 个体都有自己的目标和意图;(2)抽象 Agent 个体微观行为使之面向宏观系统广度级的目标而无需全面反映真实实体的所有属性。如可以通过规定管制员和飞机 Agent 的工作程序来产生更高效的交通流。所以,通过定制个体 Agent 的属性和行为,在个体 Agent 之间以及个体 Agent 和环境的交互作用下,自然生成仿真结果一系统宏观表现,而不像以往的宏观仿真是将假设预先设计在仿真方案中。所以,这种仿真结果具有较高的逼真度,更贴近现实世界。

3.3 构建基于 Agent 的空中交通仿真模型

为了构建高逼真度的空中交通仿真,需要开发3类仿真模型:(1)具有模拟系统相关角色行为能力的个体 Agent 模型;(2)与个体 Agent 交互的关于物理空间的环境模型;(3)个体 Agent 交互的机制和通讯机制。下面简单介绍空中交通仿真系统的主要模型。

3.3.1 Agent 个体模型

利用 Agent 技术从系统的各个部分自底向上逐步研究。根据系统特点、仿真宏观目标和逼真度的要求,提取 Agent 的模型结构,设计了飞机 Agent 和管制员 Agent。飞机 Agent 是将飞机和飞行员抽象成统一的整体,由飞机的物理属性、空气动力学性能、飞行员、飞行计划和控制器组成,如图1所示。飞机物理属性包括机型、载重、大小等。空气动力学性能提供一组飞机在大气中运动的各个飞行阶段的约束方程^[8]。飞行员特性是影响飞机的一个重要因素,如飞行员反应操作时间、认知规律等。飞行计划是飞机从出发点到目的地的航路选择,在飞行的过程中,可根据管制员 Agent 的指令改变。控制器是飞机 Agent 的控制中心,决定了个体飞机 Agent 的最终飞行行为。

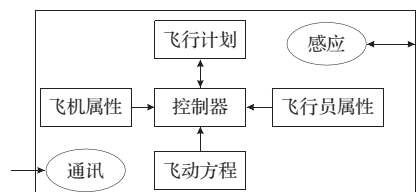


图1 飞机 Agent 结构图

管制员 Agent 是由管制规则、指挥方案、管制指令和交通状况组成,如图 2 所示。通过感应器测得空域内的交通状况(如飞机间隔、飞机意图等),按照规则规定,产生指挥方案,由控制器综合生成管制指令,在通过通讯器发送给接受飞机。

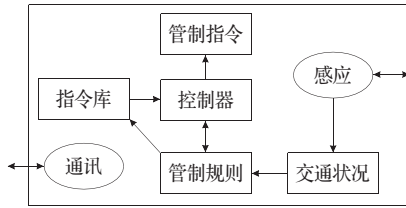


图 2 管制员 Agent 结构图

3.3.2 环境 Agent 模型

环境模型不仅包括系统边界外部条件,还涵盖预动型 Agent 的工作域。环境 Agent 可对个体 Agent 行为产生深刻影响,同时也改变了系统整体性能。空中交通仿真系统有两类环境模型。其一为活动 Agent 周围的物理空间,如大气条件,如风速风向、气压、温度大气密度等直接影响飞行空气动力方程,约束着飞机的微观行为。其二为空域结构,直接限制飞机 Agent 的行动路线。其三为工作域的交通态势,如拥挤的空域不能再容纳飞机进入,表现出整体交通环境对个体 Agent 的行为的制约和影响。

4 基于 Agent 的空中交通仿真实例

通过上述所构建的 Agent 模型进行了一个基于 Agent 的空中交通仿真应用。项目应用在北京首都国际机场,用来分析在 36L 跑道上的容量、跑道占用时间(ROT)和落地时间间隔。真实数据采集于 2004 年 10 月 15 日,观测跑道 36L,标高 200 m。统计了当日共 920 架起降飞机的相关数据。通过这一非典型日的真实数据和仿真数据比较,研究微观行为相似性和宏观行为相似性,说明基于 Agent 的空中交通仿真具有较高逼真度。

4.1 微观行为比较

大型民航商务客机均装备飞行管理计算机(FMS)。FMS 的输出报表记录了起飞各阶段速度值,以此作为真实数据和仿真结果进行比较和验证。样本飞机为 B737-600,气压 1 008 Pa,温度 15℃,干跑道,起飞重量 54 829 Kg,全推力起飞条件下记录 $V_R=122$ kts, $V_2=129$ kts,根据

$$V_{takeoff}=1.1V_{stall} \quad (1)$$

$$V_2=1.2V_{stall} \quad (2)$$

得到实际飞行 $V_{takeoff}=118.25$ kts。将上述环境条件代入仿真中得到仿真飞行的 $V_{takeoff}=121.6$ kts。由此得到样本飞机的起飞速度误差为 2.8%。

另一个表现微观行为的特性是样本飞机的起飞滑跑距离^[4]。比较下列 4 种情况下的起飞滑跑距离,结果见表 1。

表 1 不同环境下的起飞滑跑距离

项目	环境			
	标准海平面		5 000 英尺	
	15℃	35℃	15℃	35℃
仿真值	2 397	2 654	3 082	3 566
实际值	2 510	2 800	3 200	3 750
误差值/(%)	4.5	5.2	3.7	4.9

通过对起飞速度和起飞距离的比较,认为仿真结果可以接受,逼真地模拟了起飞阶段的微观行为。

4.2 宏观行为比较

交通流分布是空中交通的重要宏观表现形式之一^[9]。图 3 给出了通过观测试验日的 920 架飞机在 36L 跑道上降落的落地时间间隔分布和相同环境下利用基于 Agent 的空中交通仿真运行统计的落地时间间隔分布,分布图曲线相吻合。由此验证了相似的微观行为产生了相似的宏观结果,从而验证了基于 Agent 的空中交通仿真模型具有较高的逼真度。

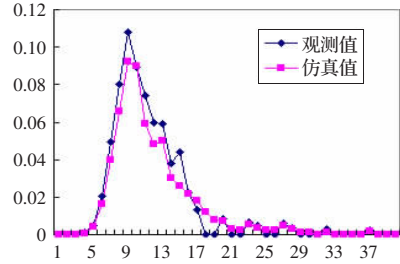


图 3 落地时间间隔分布

5 结论

Agent 技术是计算机和人工智能领域的新兴研究成果。利用该技术构建空中交通仿真系统中的 Agent 个体,结合连续时间与离散事件的仿真方法,集成仿真 Agent 个体微观行为形成系统广度的宏观表现,为解决当前空中交通面临的拥塞、延误问题,评价系统安全性能提供了一条有效和经济的途径。本文剖析了空中交通系统的内在特性和仿真机制,重点讨论了基于 Agent 的空中交通实体的建模,最后利用所建模型开展了跑道起降运行的应用,验证了模型在微观仿真和宏观仿真具有较高逼真度,达到令人满意的效果。由此可见,在空中交通快速发展的今天,利用先进的计算机仿真技术模拟现实世界的交通过程,将在交通规划、空域管理、空中交通流量管理和航空安全等领域发挥越来越大的作用。

参考文献:

- [1] 韦影仪,陈志远.基于 Agent 的交通微观模拟[J].计算机工程与应用, 2005,41(1):217-220.
- [2] Seungman L, Prichett A, Goldsman D. Hybrid agent-based simulation for analyzing the national airspace system[C]//Proceedings of the 33rd Conference on Winter Simulation, 2001:1029-1036.
- [3] 冯允成,邹志宏,周泓.离散系统仿真[M].北京:机械工业出版社, 1998.
- [4] Langhans S. Simulation of runway capacity [EB/OL]. [2007].http://www.avtech.se/pictures/documents.
- [5] 吴娇蓉.交通系统仿真及应用[M].上海:同济大学出版社, 2004.
- [6] Shah A P, Prichett A R, Feigh K M. Analyzing air traffic management system using agent-based modeling and simulation [C]//6th USA/Europe ATM2005 R&D Seminar, Baltimore (Inner Harbor), Maryland, USA, 2005.
- [7] 石纯一,张伟,徐晋晖.多 Agent 系统引论[M].北京:电子工业出版社, 2003.
- [8] 陈治怀.飞机性能工程[M].北京:中国民航出版社, 1993.
- [9] Xie Y, Shortle J, Donohue G. Airport terminal-approach safety and capacity analysis using an agent-based model [C]//Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004:1349-1357.