

TAN Xiao,ZHU Qing,ZHAO Junjiao, et al. Dynamic 3D Representation Model of Complex Air-ground Environment for Visual Aircraft Navigation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2):177-183, 204. (谭笑, 朱庆, 赵君峤, 等. 面向飞行器可视导航的复杂空地环境动态三维表示模型[J]. 测绘学报, 2012, 41(2):177-183, 204.)

面向飞行器可视导航的复杂空地环境动态三维表示模型

谭笑^{1,2}, 朱庆², 赵君峤², 许伟平², 张叶廷², 杜志强²

1. 海军工程大学管理工程系, 湖北武汉 430033; 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079

Dynamic 3D Representation Model of Complex Air-ground Environment for Visual Aircraft Navigation

TAN Xiao^{1,2}, ZHU Qing², ZHAO Junjiao², XU Weiping², ZHANG Yeting², DU Zhiqiang²

1. Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Aiming at a unified, accurate and efficient presentation of the complex air-ground environment for visual aircraft navigation, a dynamic 3D GIS data model and related spatio-temporal data structures are proposed using UML. Taking into account the multi-dimensional, dynamical characteristics and fuzzy boundary of environmental elements, this model systematically depicts the geometric, temporal, scale and semantic features of the complex air-ground environment and their relationships. Simulation experiments illustrate the usefulness and validity of the proposed data model, this model facilitates comprehensive spatio-temporal data analysis for the optimal flight path planning.

Key words: visual aircraft navigation; airport terminal area; dynamic 3D representation; spatio-temporal data model

摘要: 针对飞行器可视导航中复杂空地环境时空要素统一、精准和高效表示的难题, 提出面向飞行器可视导航的复杂空地环境动态三维表示的 GIS 数据模型和相应的时空数据存储结构, 并用 UML 图进行描述。该模型综合考虑了复杂空地环境要素多维、动态、边界模糊等特点, 刻画多维动态时空数据在空间、时间、尺度和语义 4 个方面的特征及其相互关系, 有利于复杂机场环境时空数据的综合分析, 支撑飞行路径的动态优化选择。以某机场空地环境的模拟数据为例, 仿真验证该模型的实用性与有效性。

关键词: 飞行器可视导航; 机场终端区; 动态三维表示; 时空数据模型

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)02-0177-07

基金项目: 国家 973 计划(2010CB731801; 2011CB302306); 国家自然科学基金(41021061)

1 概述

飞行器可视导航是一种将综合视觉、飞行和空管技术有机结合的新型导航方法, 需要综合考虑复杂地形、气象和电磁环境, 融合实时的飞行器导航传感器数据、多波段环境传感器数据和地形地物等信息, 实现终端区环境信息精准的统一表示。影响可视导航的环境要素包括地形、建筑物、植被等地面要素以及气温场、气压场、湿度场、风场、云、雷暴、气团等大气环境要素和电磁场, 这些环境要素具有不同的物理性质, 其空间尺度和时间变化尺度跨度大并且相互影响。要规避各种危险, 必须要透彻感知飞行器周围环境。因此机场终端区环境高效高精度的动态三维表示成为飞行

器可视导航的重要前提。

在 GIS 领域, 气象和电磁场等多维时空现象主要当做场景特效, 重可视化效果而轻高精度的分析应用。在气象和电磁环境各专业领域内, 以大气运动^[1-2]、天气现象^[3-8]以及自然景观^[9-10]等为研究对象, 主要研究宏观和微观的大气运动模拟及其可视化。

在电磁波、信号仿真等领域, 以局部有限边界的电磁场为主要对象, 研究电磁环境的拟合、仿真、数值计算和可视化等。在电磁环境三维网格消隐、实体显示、三维场等值着色等表现方面研究较多^[11-19]。但仅有少数对电磁传播有明显影响的环境要素被建模和表达, 缺乏对机场终端区这一特殊区域电磁场的大范围集成表示研究。

在飞行器安全进近环境可视导航领域^[20-21]，也还缺乏对机场终端区空地环境数字化表达的系统研究。国际上，美国 NASA 从 20 世纪 70 年代就开始发展 SVS，工业界例如 Rockwell-Collins 公司已经推出了一些投入使用的商业产品。但是，目前的研究成果仍然是以地形模拟叠加抽象符号为主，还没有气象、电磁环境要素的一体化表示成果^[22]。

综上所述，现有研究分散在不同的学科领域、孤立地开展，还缺乏对机场终端区环境统一表示的系统研究。而空地环境信息分散应用使得导航决策等需要的信息繁杂、尤其是位置信息和情景意识很弱、决策时间很长，因此急需关于复杂大气和电磁等多维连续分布现象及其与地形地貌集成的系统研究。

2 复杂空地环境动态三维表示的概念模型

针对飞行导航决策对复杂空地环境数据高效组织管理和高性能多维可视化分析的需求，首先要建立机场终端区复杂环境要素的几何模型、物理模型和过程模型的集成表示，将多源异构信息有机融合到统一的时空框架内，并提供高效精准的时空分析，其概念模型如图 1 所示。

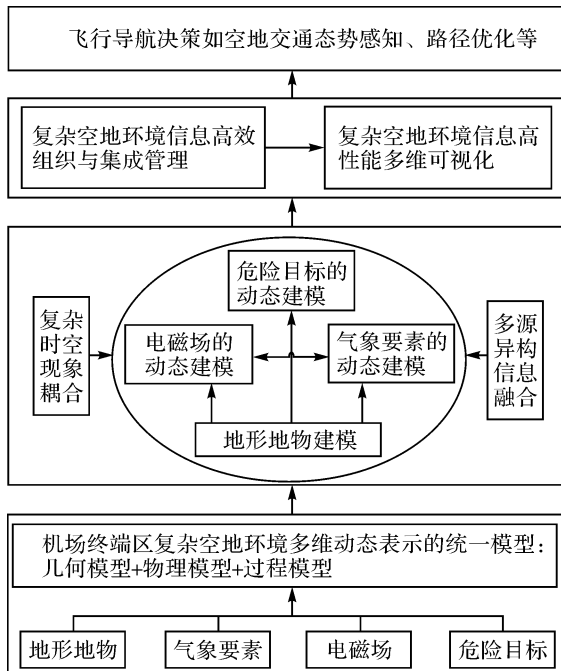


图 1 机场终端区复杂空地环境统一表示的概念模型

Fig. 1 Conceptual model of unified airport environment

复杂空地环境的动态三维表示模型是在统一的时空框架下，一种可计算、可推理和可全息感知的机场终端区复杂空地环境信息模型。从图 1 中可见，复杂空地环境动态三维表示模型包含四个方面的内容：空地一体化的时空数据模型；多源异构信息融合；复杂时空现象耦合；复杂空地环境信息可视化表达，相互关系如图 2 所示。

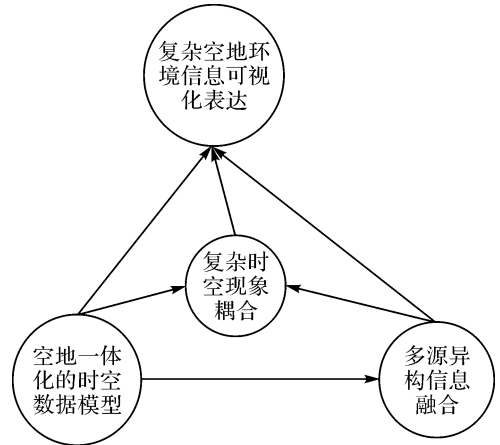


图 2 研究内容及其关系

Fig. 2 Research contents and relationship

2.1 空地一体化的时空数据模型

机场终端区空地环境要素包括地形地物、气象环境、电磁环境和危险目标。针对这些环境要素种类繁多、分布范围广且动态变化的特点，一体化的时空数据模型包括这些对象的几何模型、物理模型以及反映其演变规律的过程模型。与传统三维 GIS 数据模型相比，需要发展矢量与标量结合、表面与实体结合、动态与静态结合、离散与连续结合的一体化数据模型和数据结构。

2.2 多源异构信息融合

机场终端区复杂地空环境下的多平台多传感器数据在表示方法、时空基准、精度、时空尺度等方面存在差异，导致多源信息的有机融合与无缝集成成为关键问题之一。多源异构信息融合包含两个方面的含义：语法上，多源信息统一的时空基准、尺度转换、配准，以及误差传播规律等；语义上，多源数据专题语义分类众多，不同语义细节层次尺度不一，各种动态现象时空过程语义及其关系语义复杂，对多分辨率语义、过程语义、关系语义的统一描述。

2.3 复杂时空现象耦合

本文的时空现象耦合是指机场终端区的气象、电磁、地形地物等要素之间相互影响的状态和

过程,主要指要素间的相互影响使其中一种要素的强弱、方向、分布等发生了改变,如复杂地形与低空风场的耦合,机场建筑与电磁场的耦合等。

2.4 复杂空地环境信息的可视化表达

机场终端区环境的可视化表达包含 3 个层次:① 对直观可见、边界明确的环境要素的可视化表达,如机场周边地形、建筑、跑道等;② 对时空连续分布、不可见但对飞行器安全导航有直接或间接影响的环境要素的可视化表达,如气温、风场、电磁场等;③ 对时空分布连续且渐变、具有生命周期过程的环境要素的可视化表达,如积雨云、风切变、沙尘暴等,需要着重表达其生命周期的过

程语义。特别是空地环境要素信息量大且动态演变,需要考虑在有限载荷条件下保证关键信息的清晰、可信表达,实现空地一体化、要素综合化、表现直观化的自适应多维动态可视化。

3 复杂空地环境动态三维表示的 GIS 数据模型

根据机场终端区复杂空地环境统一表示的概念模型,面向飞行器导航需要解决不同专题要素的精准的空间位置、专业的物理模型、连续的时空变化 3 个层次的统一表达问题。本文建立如图 3 所示的动态三维 GIS 数据模型。

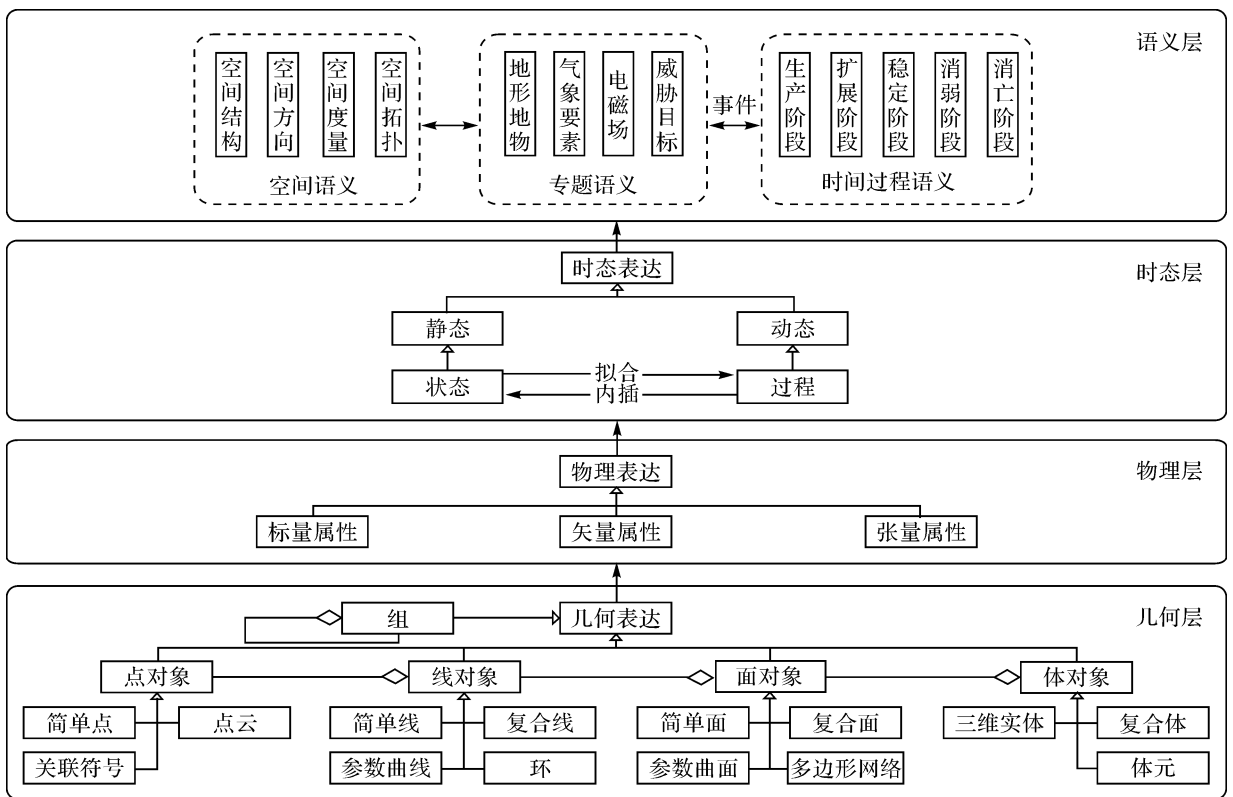


图 3 机场终端区空地环境统一表示的动态三维 GIS 数据模型

Fig. 3 Dynamic 3D GIS model of airport environment

3.1 几何层

几何层界定了空地环境要素的空间界限和精确位置,是多维时空信息集成的基础。空间对象抽象为点、线、面、体 4 大类,并根据不同要素的分布、形态等特征将这四类对象分为若干子类^[23]。如图 4 所示,复杂空地环境中的点、线、面要素与静态三维场景中的点、线、面要素的几何形态和空间分布类似,其特别之处在于大气、电磁等可进入、可剖分的动态场的存在,因此体对象不仅能够

描述参数曲面、简单面等面对象所构成的三维实体及其复合体,还要包括不同体素所组成的对象。体素由四面体对象 (C3DTetrahedron)、立方体对象 (C3DCube) 组成,支持空地环境中形状不规则、边界模糊的场要素的任意剖分和可视化分析。动态对象变化过程的几何描述是确定其动态几何边界 (C3DDynamicBoundary) 以及边界内每个点的空间轨迹 (C3DDynamicTrack)。

(RelationRule)来表示过程对象的变化特征和耦合特征。

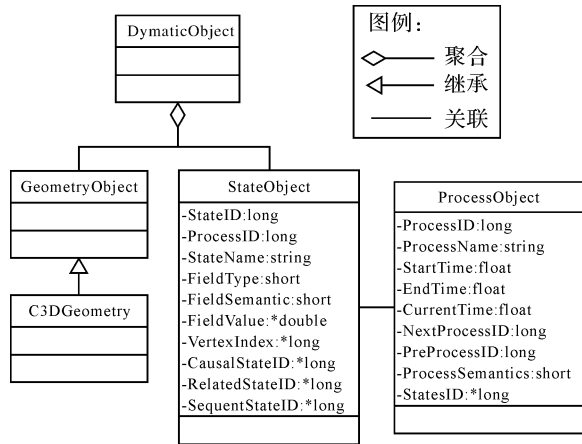


图 5 动态对象存储结构

Fig. 5 Storage structure of dynamic objects

稳定、削弱、消亡 5 个阶段,即 5 个子过程。过程语义与专题语义通过事件关联。事件是引起时空对象状态发生变化的原因,时空对象在其生命周期内的变化正是在事件的驱动下由一个状态变化到另一个状态。时空对象生命周期的过程语义只有通过事件的抽象描述与表达,并且与专题语义相关联,才能够反映出动态环境要素变化过程背后的物理本质及其对飞行器可视导航的影响。

4 试验分析与结论

本文以 NetCDF 数据为大气环境数据源,以模拟的雷达电磁波和机场中尺度的电磁数据为电磁环境数据源,描述机场动态三维空地环境的可视化模型。试验的设计围绕本文提出的机场终端区空地环境模型的 4 个层次展开,即几何、物理、时态和语义。

如图 7 所示。该试验场景包括 4 大类几何对象:点对象(电磁场分布)、线对象(参与构建面对象)、面对象(地形、雷达波球面)、体对象(云体)。以试验场景中的积雨云模型中的云量模型和动力学为例,云量的大小、分布是标量场模型,通过对大气环境数据的分析来建立。因为云不仅由水蒸气组成,还有云水、雨水、冰晶、霰、雹等,对应着 NetCDF 数据中的 Qcloud、Qgraup、Qice、Qrain、Qsnow 等各项数据,进而得到云量值。云的动态变化是矢量场模型,通过计算流体力学中的 Navier-Stokes 方程计算得到(如表 1 所示)。

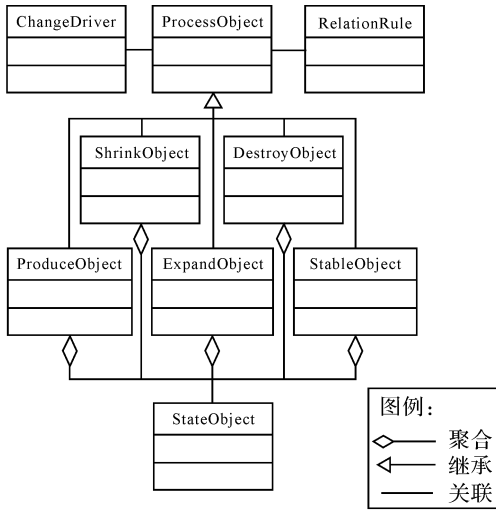


图 6 过程对象 UML 模型

Fig. 6 UML diagram of process objects

3.4 语义层

复杂空地环境统一表示的概念模型中的语义层包括专题语义、空间语义和时间过程语义。专题语义涵盖了空地环境中地形地物(如机场建筑、地形等)、大气环境(如风场、气压场、积雨云等)、电磁环境(如场强、频率的分布等)和威胁目标(如地面入侵物、飞行器、鸟群等)及其相互关系等方面的语义。空间语义主要包括空间的结构、拓扑、方向和度量等,是描述各专题语义之间或专题语义内部的空间关系和进行空间分析的主要手段。对于大气、电磁等专题语义中的动态环境要素,则将其生命周期的时间过程语义划分为产生、扩展、

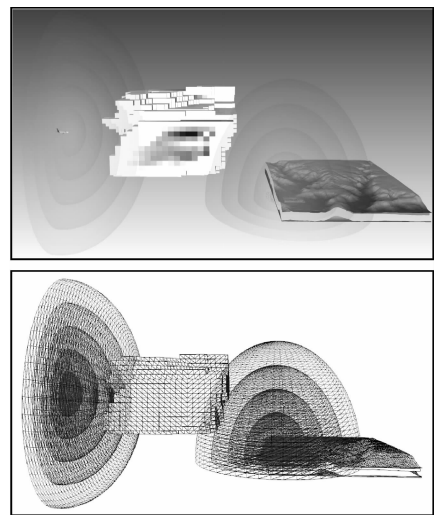


图 7 空地环境一体化几何模型

Fig. 7 Geometric model

根据时态模型生命周期中状态和过程的概念,试验以某机场进近空域 2011-04-20T18:00—

2011-04-21T12:00 这 18 h 内三维动态云数据为例,时间分辨率为 1 h,网格为 25×25×40,图 8 中显示的是其中 3 个时刻的三维云动态变化结果。

表 1 物理模型

Tab. 1 Physical model

| 模型名称 | 模型类型 | 输入参数 | 输出参数 |
|------|---------|---|---|
| 云模型 | 云量模型 | Qcloud、Qgraup、 Qice、Qrain、Qsnow | Qcloudiness (云量) |
| | 云的动力学模型 | ρ (压力)、 ρ (密度)、 \mathbf{V} (速度矢量)、 \mathbf{F} (外力矢量) | \mathbf{u} 、 \mathbf{v} 、 \mathbf{w} (速度场) |

如图 8 所描述的是积雨云生命周期中的 3 个状态,这 3 个状态处于过程语义中的“扩展阶段”和“稳定阶段”。空间语义的表达依赖于空间尺度,以电磁环境为例,在进近的初始阶段,飞行器高度较高,离机场和地面较远,电磁环境不如低空复杂,在此大尺度下更加关注宏观的电磁环境(如机载雷达波、地面雷达波)建模及其对飞行器导航、通信的影响(图 9(a))。而在进近着陆阶段,离机场、地面的距离更近,各种介质散射体更加复杂多样,在此小尺度下则更加关注机场终端区的电磁场的分布和传播,图 9(b)中电磁场信息表现为离散格网点上的 3 个量:频率、场强的大小和场强的方向,分别用箭头的灰度、长度和方向来表示。

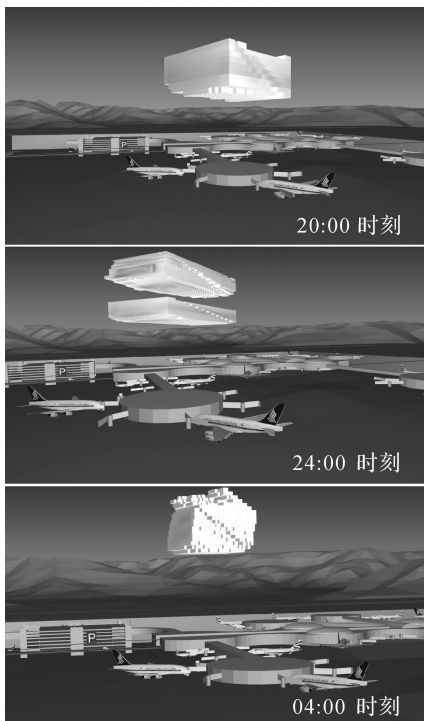
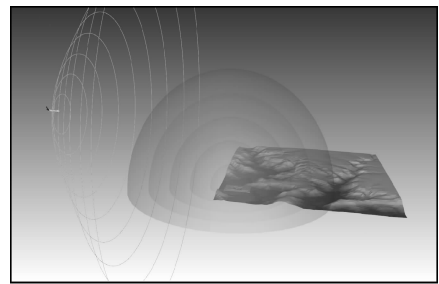
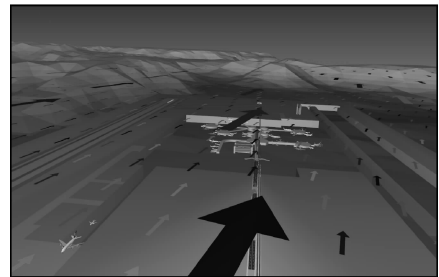


图 8 动态对象的时态模型

Fig. 8 Temporal model



(a)



(b)

图 9 不同尺度下的语义模型

Fig. 9 Multiscale semantics model

复杂空地环境模型的可计算与可推理特点体现在为飞行路径的自主优化决策服务。如图 10 所示,通过实时集成飞行器雷达探测到航路前方的积雨云信息(图 10(a)),根据云的动力学模型和热力学模型模拟计算出它的移动路径、扩散范围和云体内部环境参数,并结合航路信息对三维云体进行多维剖分,可计算出飞行器航路上经过的三维云体的体素(图 10(b)),根据图 5 动态对象的数据结构,每个体素对应于一个动态对象存储结构表(表 2)。通过对表中的存储信息进行综合分析计算,进而判断飞行器在云中飞行是否会遇到积冰等威胁,以便及时调整航线,保障飞行安全。

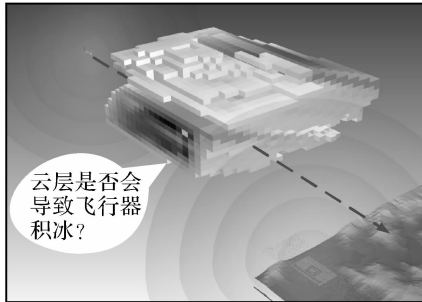
表 2 三维动态云的体素信息存储表

Tab. 2 Voxel information of dynamic 3D cloud

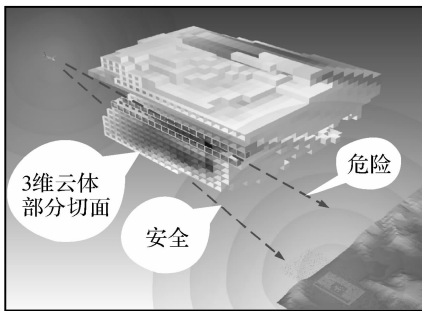
| | | |
|--------------|--------------------|-----|
| Object ID | 22 469 | ... |
| State ID | 3 | ... |
| Process ID | 2 | ... |
| Current Time | 18:00 | ... |
| Position | (3898, 3940, 6712) | ... |
| Height | 6712 | ... |
| Temperature | 3.183 | ... |
| Qcloudiness | 0.771 | ... |
| Qliquidwater | 259.447 | ... |

复杂空地环境统一表示模型作为机场终端区物理环境在计算机中的一种数值映射,是飞行器可视导航的基础,本文将地形地物、电磁、气象环

境集成到统一的时空框架下,建立面向飞行器导航的复杂空地环境动态三维表示模型,准确刻画了空地环境要素的时空变化及其相互影响,进一步研究将基于此模型,发展高效的数据组织管理与可视化分析方法,支持多源多尺度景象鲁棒匹配与可信导航视场下的进近优化。



(a)



(b)

图 10 基于专题语义分析的导航决策

Fig. 10 Navigation analysis

参考文献:

[1] ZHAO Wei, LIN Baojia, WU Lun. Studies on Integration of GIS with Air Quality Models[J]. Environmental Science and Technology, 2003,26(5):27-29. (赵伟,林报嘉,邹伦. GIS与大气环境模型集成研究与实践[J]. 环境科学与技术,2003,26(5):27-29.)

[2] WANG Peng, XU Qing, LI Jiansheng. 3D Modeling and Visualization Simulation of Near-earth Space Environment Elements[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(12): 2957-2960. (王鹏,徐青,李建胜. 近地空间环境要素三维建模与可视化仿真研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(12):2957-2960.)

[3] LIU S G, WANG Z Y, GONG Z, et al. Real Time Simulation of a Tornado [J]. The Visual Computer, 2007, 23(8):559-567.

[4] DOBASHI Y, YAMAMOTO T, NISHITA T. A Controllable Method for Animation of Earth-scale Clouds [C]//Proceedings of Computer Animation and Social Agents. Geneva; [s. n.], 2006: 43-52.

[5] SHEN Zhenyu, FAN Yin, TAO Lijun. Visualization Method on Meteorological Data Analysis [J]. Journal of System Simulation,2006,18(Suppl. 1): 328-332. (沈震宇,范茵,陶俐君. 可视化技术在气象数据场分析中的运用[J]. 系统仿真学报, 2006,18(Suppl. 1):328-332.)

[6] PETER K. Large-Scale 3D Visualization of Doppler Reflectivity Data [D]. West Lafayette : Purdue University,2010.

[7] LI Xudong,SUN Jizhou,ZHANG Kai. Meteorological Data Visualization System Using AVS/Express[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(4): 357-361. (李旭东,孙济洲,张凯. 基于 AVS/Express 的气象数据可视化系统[J]. 天津大学学报,2009,42(4): 357-361.)

[8] XUE Cunjin, ZHOU Chenghu,SU Fenzhen,et al. Research on Process-oriented Spatio-temporal Data Model [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1),95-101. (薛存金,周成虎,苏奋振,等. 面向过程的时空数据模型研究[J]. 测绘学报,2010, 39(1),95-101.)

[9] WANG Changbo. Physically Based Rendering of Natural Phenomena [D]. Hangzhou : Zhejiang University ,2006. (王长波. 基于物理模型的自然景物真实感绘制[D]. 杭州:浙江大学, 2006.)

[10] LIU Shiguang. Modeling and Rendering of Natural Phenomena[D]. Hangzhou: Zhejiang University ,2007. (刘世光. 大气现象的真实感建模及绘制技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.)

[11] XIAO He, HE Mingyun, BAI Zhongjian, et al. 3D Visualization of Electromagnetic Field Based on Visualization Toolkit[J]. Computer Applications, 2007, 27(11): 2773-2775. (肖何,何明耘,白忠建,等. 基于 VTK 的电磁场三维可视化研究及实现[J]. 计算机应用,2007, 27(11): 2773-2775.)

[12] ZHOU Qiao,CHEN Jingwei, LI Jiansheng, et al. 3D Visualization Technology of Electromagnetic Environment [J]. Computer Engineering, 2008, 34(9):248-250. (周桥,陈景伟,李建胜,等. 电磁环境三维可视化技术[J]. 计算机工程,2008, 34(9):248-250.)

[13] TENG Yunfei. Investigation on Visualization System of Electromagnetic Data in War-field [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (滕云飞. 战场环境电磁场数据可视化系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.)

[14] WANG Yongqing, DAI Chuanjin, ZHAO Xiubin, et al. Modeling and Simulation for Electromagnetic Environment of the Approaching Landing System for Aeroplane[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(2): 20-22. (王永庆,戴传金,赵修斌,等. 飞机进近着陆系统电磁环境建模与仿真[J]. 航空计算技术,2007,37(2): 20-22.)

[15] SHIRAI H, SATO R, OTOI K, et al. Electromagnetic Wave Propagation Estimation by 3D SBR Method [C]// Proceedings of International Conference on Electromagnetic in Advanced Applications. Torino;IEEE,2007:129-132.