

## 基于 World Wind 的空管系统三维显示技术

郝敬堂<sup>a</sup>, 苏志刚<sup>a,b</sup>, 黄振<sup>a</sup>

(中国民航大学, a. 中欧航空工程师学院; b. 智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

**摘要:** 针对新一代空中交通管理系统对航空器航迹及空域背景三维显示的需求, 提出了一种基于美国 NASA 的 World Wind 平台的空管系统三维显示技术。利用 World Wind 平台为显示子系统的三维空域背景进行渲染, 采用透明目标层对航空器的三维动态信息进行显示, 并通过空间变换的方式使航空器在目标层的位置与三维空域背景相一致。利用 ADS-B 地面站采集空域内航空器的实时动态信息, 并利用此信息进行航空器的实时航迹三维显示。实验结果表明, 所提出的空管系统三维显示技术与传统空中交通显示技术兼容, 并能够为管理员提供更为直观的空域动态信息, 有利于提高空中交通指挥的有效性和可靠性。

**关键词:** 空中交通管理; 三维显示技术; 地理信息系统; 坐标变换

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2016)01-0061-06

## 3D Display Technology for Air Traffic Control System Based on World Wind

HAO Jing-tang<sup>a</sup>, SU Zhi-gang<sup>a,b</sup>, HUANG Zhen<sup>a</sup>

(Civil Aviation University of China, a. School of Sino-European Institute of Aviation Engineering;

b. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** For the request of 3D dynamic display of trajectory and airspace background in new generation air traffic management systems, a 3D display technology is proposed for air traffic control system based on World Wind of US NASA. World Wind is used for 3D rendering the airspace background as display subsystem. A transparent layer is placed to display the aircraft dynamic information. And the aircraft position on the layer is ensured to be consistent with 3D airspace background by spatial transformation. The real-time dynamic information of the aircraft in the airspace is collected by ADS-B ground station, and the information is used for real-time trajectory display. The experiment result indicates that: the proposed 3D display technology is compatible with the traditional air traffic display technology, and can offer more intuitional dynamic information in airspace to the controllers, which is helpful for improving the effectiveness and reliability of air traffic control.

**Key words:** air traffic management; 3D display technology; geography information system; coordinate transform

### 0 引言

随着全球化趋势的加强, 航空运输业在全球经济发展中的地位愈发突出。航空运输业将进一步实现自由化, 同时, 以信息技术、通信技术和卫星技术为代表的新

科技在航空领域广泛应用, 推动着民航空中交通管制(ATC)方式发生深刻的变革。国际民航组织(ICAO)提出了“全球空管运行”的新概念, 在此基础上, 美国推出了下一代空中交通管理系统(NEXTGEN)<sup>[1]</sup>, 欧盟推出了欧洲天空一体化空管研究(SESAR)<sup>[2]</sup>计划。新一代空中交通管理系统(NEXTGEN和SESAR)的发展是一个由地基系统逐步过渡到星基-地基结合、以星基系统为主的过程, 是全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、遥感技术、互联网技术等的应用<sup>[3]</sup>。

作为空中交通管理关键技术之一, 航迹显示是将

收稿日期: 2015-03-03

修回日期: 2015-11-16

基金项目: 国家科技支撑计划(BAH24B12); 中央高校科技基本科技业务费中国民航大学专项项目(3122014H003)

作者简介: 郝敬堂(1989—), 男, 河南鹤壁人, 硕士, 助理实验师, 研究方向为空中交通管理、空管信息仿真、空管中间件技术。

航空器的当前位置及飞行轨迹实时地显示在监控器上,以使空中交通管制员及时了解管制空域内的航空器动态,避免偏航和冲突<sup>[4]</sup>。现行民航空中交通管理系统对航空器航迹信息的显示是采用二维动态显示模式,即在显示器上仅能直观地显示管制空域内航空器的水平分布情况,航空器的高度信息是通过标牌形式数字化表征的。管制员在掌控航空器间相对位置时,需要在头脑中重构现实三维动态场景,这对管制员技术要求较高、难度较大,不利于对高密度航空器进行管制。NEXTGEN 和 SESAR 的建设与应用,对航空器的航迹及空域背景显示提出了更高的要求。目前二维动态显示模式难以胜任这一要求,需要探索适合于新一代空中交通管理系统的三维显示技术。

飞机的三维航迹具有可认知性和可表达性,更具形象的现实逼真效果,在飞行冲突探测、航迹规划、飞行仿真以及空管支持等方面都具有重要意义。随着地理信息系统技术应用的不断深入,三维 GIS 正广泛应用于空管系统三维显示方面<sup>[5]</sup>。文献[6]建立了基于 GIS 组件的航迹标绘系统;文献[7]研究了三维轨迹监视系统的实现方法和关键技术问题;文献[8]研究了 GIS 在雷达显示控制系统中的应用价值。上述成果表明三维 GIS 对空管系统三维显示具有重要的意义。

通常基于 GIS 的三维航迹仿真都是用 OpenGL<sup>[9]</sup> 或 Direct3D<sup>[10]</sup> 绘制航迹,用 Creator 创建三维模型,用 Vega 生成视景<sup>[11-12]</sup>;文献[13]通过对地形、地物、航线以及空域等进行数字化处理,生成三维地形数据库,并探讨将三维 GIS 信息应用到空管系统中;文献[3]重点研究了将 GIS 应用到空管系统时数据库设计及坐标转换等技术。然而,上述开发方式工作量大,技术含量高,而且运行效率不高。文献[14]利用 Google Earth 作为平台,使用 KML 语言描述飞机三维航迹,通过可扩展接口将飞机监视数据引入 Google Earth 进行三维显示。然而,Google Earth 仅能通过处理 KML 文件进行信息处理,不利于开发者按照需求扩展功能。

与 Google Earth 相比,美国宇航局(NASA)开发的 World Wind 系统的三维可视化框架是完全开放的,而且功能比较齐全强大<sup>[15]</sup>。本文将用 World Wind 系统对三维空域背景进行渲染,通过实时接收 ADS-B 监视数据,提出一种实现航空器实时航迹 2.5 维动态显示技术方案,即在二维动态显示基础上增加景深效果,实现管制员对航空器空间相对位置直观掌控,有效地提高空中交通管理效率,降低管制负荷,提高空域安全性。

## 1 现行空管系统显示技术

空中交通管理系统是一个专用实时人机交互系

统,该系统采用分布式网络结构,将不同传感器感知的航空器航迹信息、飞行情报信息、气象信息等综合地呈现给管制员。管制员通过空管系统采用语音或数据的方式来指挥空域内航空器的运行。

空管系统通过局域网将显示所需的航空器飞行动态数据分发给显示子系统。显示子系统采用的是综合显示器,它将涉及航行安全的要素,如机场、导航台站、航线、特殊空域、障碍物等集成为航空器飞行态势显示的背景信息,使管制员能够更清晰明了地掌握空域运行状况。

然而,早期的综合显示器只能提供航线、特殊空域等由简单线段构成的图形,机场、导航台站、障碍物等只能用简单的符号标注其位置信息。随着信息技术的发展,现今的综合显示器可以提供更为复杂的图形显示,如河流、行政区域边界等。即便如此,现今显示子系统仍然沿用 20 世纪 70 年代的技术框架。图 1 所示为现行空管系统显示界面。

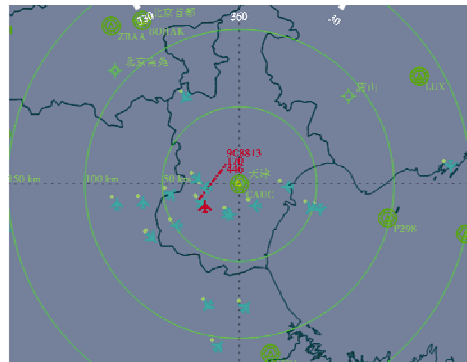


图 1 现行空管系统显示界面

Fig. 1 Display interface of current ATC system

航空器航迹信息的显示是空中交通管理系统的重要组成部分之一,它的核心任务是协助管制员掌握空域内航空器的动态,降低管制员工作负荷,提高工作效率。

根据空管雷达及管制中心设施间协调移交数据规范(MH/T 4008-200)和欧洲监视数据移交标准(SUR-ETI. ST05. 2000-STD-09-01)等规定,航空器飞行动态数据主要包括以下几点。

1) 识别信息。该信息可以是 ICAO 规定的每架航空器的唯一 24 位识别码,也可以是机载二次雷达应答机提供的 12 位识别码。

2) 飞行动态数据。主要包括航空器的三维位置、地速、爬升速度、偏向角、紧急状态等实时变化的信息。

3) 时间信息。这是指分发给显示子系统的数据包中所包含的时间信息,该信息用于标记产生数据包内点迹或航迹报告的时刻。空管系统可以接收来自不同传感器(如航管一次雷达、航管二次雷达、ADS-B 等)生成的飞行动态数据。由于这些数据的获取在时

间上、空间上并不同步,因此在显示子系统中同步处理,需要标记报告产生的时间信息。

4) 其他特征。这类信息主要包括航班号、航空器类型等,通常这类信息用于对航空器的辅助说明,在航空器飞行全程基本不变。

上述飞行动态数据将以航空器航迹形式显示,如图 2 所示。航空器航迹的显示是利用航空器的当前位置、历史尾迹、速度矢量线及包含高度、编码等信息的标牌共同描述的。

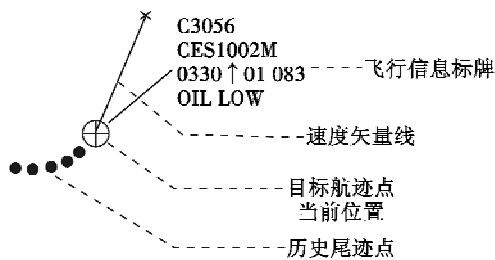


图 2 航空器航迹图例

Fig. 2 Sample of the aircraft's track

显然,航空器的高度信息是通过标牌以数字形式提供给管制员的,此种形式的航迹显示仅适用于现行的二维动态显示方式。

## 2 空管系统三维显示技术

对于美国的 NEXTGEN 和欧洲的 SESAR 等新一代空中交通管理系统,由于对航空器航迹的精细化管理,需要管制员对负责空域内的航空器间、航空器与周边障碍物的相对位置有较直观的掌控。因此,一方面要求航空器航迹的显示应具备直观三维效果,另一方面也要求显示子系统能够提供更为丰富的背景信息。

当前较成熟的三维显示技术(如分光立体眼镜、全息投影等)都可以实现很好的三维效果,然而利用这些技术构建的显示系统很容易给使用者造成疲劳,不适于长时间使用,因此空管系统不适合采用此类显示手段。

为实现对航空器航迹及背景的三维可视化显示,采用 2.5 维显示技术构建空管系统中的显示子系统时需要考虑三维背景渲染、目标图层加载以及目标显示位置确定等问题,只有将上述各问题有效解决,方能构建出可实用的 2.5 维动态显示系统,实现空管显示技术由二维到三维的转变。

### 2.1 三维背景渲染

为了满足新一代空中交通管理系统空域背景的三维动态显示的需求,需要引入空域的三维 GIS 信息,如数据高程模型(Digital Elevation Model, DEM)信息、地图图像信息等。三维 GIS 的显示为指挥空域中的航空器提供目标周围参考,可直接对周边地形和环境等加

以判断,丰富空管系统的显示内容,缩小了管制员与飞行员的视景差距,从而提高管制效率和准确度。

本文利用 NASA 开发的 World Wind 三维动态显示系统进行背景渲染。World Wind 具备 Direct3D 引擎的三维图形渲染机制,可以在地球模型上进行图像、模型等的渲染。World Wind 除了开放三维可视化框架外,还提供 XML 文件形式的接口,通过这个接口,可以向 World Wind 平台加载本地地图瓦片分割图像和 DEM 高程数据,也可加载气象云图、雷达信号强度等其他管制信息,从而提供丰富的三维动态显示的背景信息。图 3 所示为将某地区部分山脉的卫星图像和 DEM 数据加载到 World Wind 平台的三维显示效果,显然,采用三维显示更便于呈现场景的远近、高低变化特征。

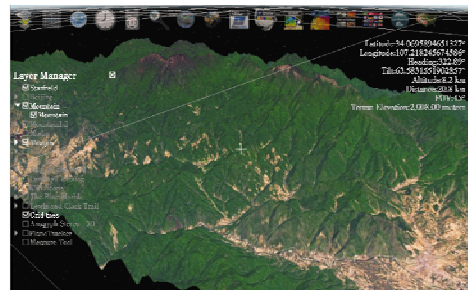


图 3 某地区部分山脉三维显示

Fig. 3 3D display for mountains of a certain area

本文基于 World Wind 平台将现有的二维动态显示系统增加景深效果,形成 2.5 维数字化显示系统,从而既可以实现从高空直接俯瞰地面的显示,即退化为当前空管系统的二维动态显示,又可以实现从地面视角呈现管制空域,形成友好的三维可视化能力。

### 2.2 目标图层加载

利用 World Wind 引入的三维场景信息是通过 Direct3D 引擎渲染的。当场景信息发生变化时,系统将触发 Direct3D 引擎进行重新渲染,从而确保场景的动态变化。由于 Direct3D 引擎渲染过程计算复杂度高、时间负荷大,不适于频繁调用。

对于空管系统的显示子系统,被监视空域航空器的动态信息更新频率高,若采用与三维场景一致的 Direct3D 引擎渲染机制,必然导致系统过荷,从而无法正常显示。

本文方案是将三维场景显示层的前方放置一层用于绘制目标动态的透明目标层,效果如图 4 所示。将三维场景的动态渲染与航空器动态信息更新分离,从而使 Direct3D 引擎只在三维场景发生变化时被调用,而目标动态信息的更新不会触发 Direct3D 引擎。

透明目标层的引入解决了 Direct3D 引擎受目标更新信息影响而频繁调用问题,减少了航空器动态绘制的时间负荷,保证航空器航迹显示的实时性。然而,由

于航空器位置的显示是独立于 World Wind 系统的,因此,在目标层绘制航空器位置时需要解决与三维场景位置的一致性问题。

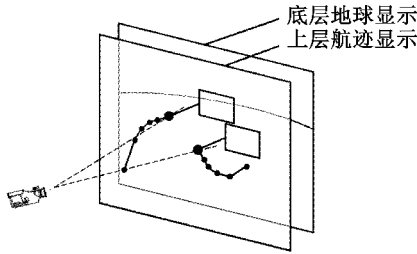


图4 覆盖透明图层显示航迹

Fig. 4 Tracks displayed by covering a transparent layer

### 2.3 航空器显示位置的确定

本文采用的2.5维数字化显示技术是将三维场景按照特定方式投影到二维显示平面上,这会导致空间中的航空器位置标定存在景深方向的模糊性。为消除这种模糊性,可在现有航空器航迹显示方式上增加投影线,其长度可反映出航空器的高度和投影点,即航空器在地球表面的位置。

作为三维场景显示系统,World Wind 的外部接口是利用经度、纬度和高度来定义目标在地球表面的位置,经过其内容的空间变换,最后以屏幕坐标的形式给出目标在屏幕投影的位置。若在透明目标层上显示航空器位置就需要系统采用与 World Wind 相同的空间变换方式,从而确定航空器在目标层的显示位置。

假设由空管系统分发到显示子系统的某航空器的经度、纬度和高度分别为  $\alpha, \beta$  和  $h$ , World Wind 以地球球心为原点构建地球模型坐标系。该坐标系的  $z$  轴与地球自转轴相同指向北极,  $xoy$  平面位于赤道面,  $x$  轴穿过格林威治子午线。在 WGS-84 坐标体系下,航空器在模型坐标系中的坐标  $(x_m, y_m, z_m)$  为

$$\begin{cases} x_m = (r+h) \cos \alpha \cos \beta \\ y_m = (r+h) \sin \alpha \cos \beta \\ z_m = [r(1-e^2) + h] \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $r = \frac{R_c}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \beta}}$ , 为等效半径;  $e = 0.0818$ , 为地球

偏心率;  $R_c = 6378137$  m, 为地球赤道半径。在 World Wind 中,三维场景的旋转平移都不会影响航空器在模型坐标系中的位置。

将显示屏幕中心所对应的地球表面点视为原点,构造世界坐标系,该坐标系的各个坐标轴与模型坐标系的对应坐标轴平行。世界坐标系的原点在模型坐标系中的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 则航空器在世界坐标系的位置为  $(x_w, y_w, z_w)$ 。考虑不同坐标系间变换中平移的影响,将各坐标分别表示为  $(x_m, y_m, z_m, 1)$  和  $(x_w, y_w, z_w,$

1), 则两者关系为

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

以虚拟观测点为原点(如图4所示相机位置)朝向并垂直于投影平面为  $z$  轴,平行于投影平面的水平方向为  $x$  轴,构成观察坐标系,航空器在观察坐标系中的坐标表示  $(x_c, y_c, z_c, 1)$ , 即

$$[x_c \ y_c \ z_c \ 1]^T = M_2 \cdot M_1 \cdot [x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T \quad (3)$$

式中:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \sin \alpha_c & -\sin \alpha_c \sin \beta_c & -\cos \alpha_c \cos \beta_c & 0 \\ -\cos \alpha_c & -\cos \alpha_c \sin \beta_c & -\sin \alpha_c \cos \beta_c & 0 \\ 0 & \cos \beta_c & -\sin \beta_c & 0 \\ r_c \cos \alpha_c \cos \beta_c & r_c \sin \alpha_c \cos \beta_c & r_c \sin \beta_c & 1 \end{bmatrix},$$

为相机变换矩阵;  $\alpha_c, \beta_c$  和  $r_c$  分别表示相机的经度、纬度和以及相机与地面之间的距离;  $M_2$  为旋转矩阵,  $M_2 =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \varphi$$

和  $\theta$  分别表示沿观察坐标系的  $x$  轴和  $z$  轴旋转的角度。

视景空间在观察坐标系下由两个取景面截出的锥形区域构成,如图5所示。

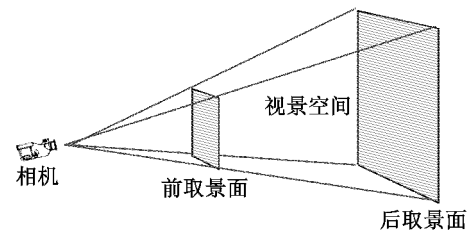


图5 观察坐标系下的视景空间

Fig. 5 View port space in viewing coordinate system

以前取景面作为投影面,观察坐标系的  $z$  轴与投影面的交点作为投影坐标系的原点,投影坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴分别平行于观察坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴。观察坐标系中  $(x_c, y_c, z_c, 1)$  处航空器在投影面的坐标是由观察坐标系原点与航空器连线交投影面的点所确定的,因此航空器的投影坐标与  $x_c$  和  $y_c$  成线性关系,与  $z_c$  成倒数关系。利用三角变换可得

$$\begin{bmatrix} x_p' \\ y_p' \\ z_p' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{s_w}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{s_h}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tan \frac{\phi}{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $s_w$  和  $s_h$  分别为前取景面在观察坐标系中的宽度与高度； $\phi$  为视角大小，在三维显示系统中， $\phi$  通常是固定的； $x_p'$  和  $y_p'$  为未利用  $z$ 。进行非线性变换前的投影坐标； $\frac{1}{r_p}$  为投影坐标缩放比例系数。所以，航空器在投影面的坐标为

$$\begin{cases} x_p = \frac{x_p'}{r_p} \\ y_p = \frac{y_p'}{r_p} \end{cases} \quad (5)$$

利用式(5)获得的航空器的投影坐标( $x_p, y_p$ )可以在透明目标层上对航空器的定位。

### 3 实验结果

为验证本文所提出的三维显示技术的可行性,基于 World Wind 平台构建 2.5 维显示子系统,并重点实现航空器航迹的三维显示。为增加所研究成果的实用性,实验采用的数据源为 ADS-B 接收机实时接收的某地空域内航空器动态数据。这些动态数据包括 ICAO 识别码、二次雷达识别码、实时三维位置信息(经度、纬度、高度)、速度信息、航向信息和时间信息等。

显示子系统的俯视效果如图 6 所示。

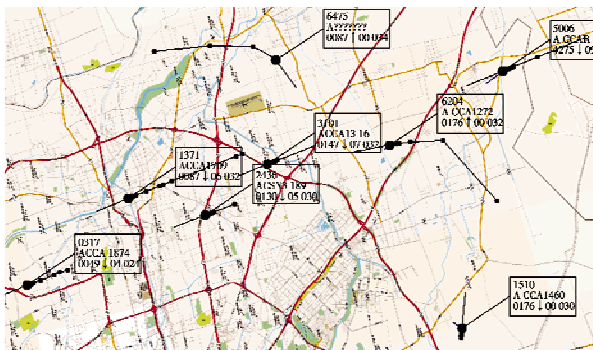
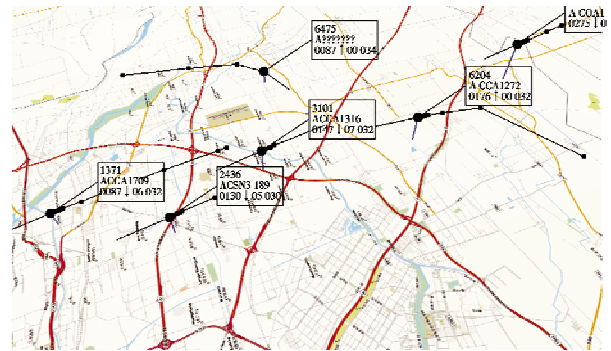


图 6 真实航迹的实验显示俯视效果

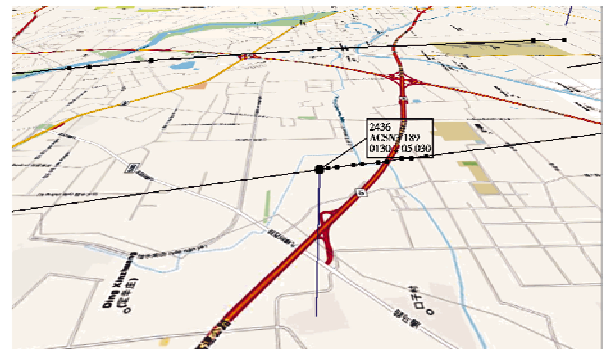
Fig.6 Real trajectory test overlooking display

图中,较大实心圆点标识出航空器的当前位置,相应的标牌给出航空器的识别信息及速度、高度等信息,通过折线与航空器相连的若干小点表示航空器的历史位置,这些位置的连线形成了航空器的尾迹信息。由图 6 可见,在俯视时,本文的显示子系统退化为与现行空管显示子系统兼容的显示方式。

当显示子系统采用斜视时,航空器航迹显示如图 7 所示。图 7a 为较大场景显示情况,图 7b 为个别目标放大显示情况。与图 6 相比,图 7 中航空器的显示增加了投影线,从而能够更直观地为管制员提供航空器的高度信息,而且 World Wind 引入的三维 GIS 信息更能协助管制员掌握管制空域的动态。



a 多目标监视斜视图



b 个别目标放大图

图 7 真实航迹的实验斜视显示效果

Fig.7 Real trajectory test tilted-looking display

### 4 结束语

针对未来空中交通管理系统对三维显示技术的需要,本文提出一种基于 World Wind 的用于空中交通管理系统的 2.5 维显示技术。通过引入三维 GIS 信息和增加透明目标层的方式实现了航空器航迹的三维动态显示,并能够很好地与传统显示子系统模式兼容。实验结果表明,新技术既完善了空域地理信息,又实现了航迹三维显示的突破,可以协助管制员更清晰地掌握空域内各航空器间的相互位置,提高了空中交通指挥的有效性和可靠性。

### 参考文献

- [1] HARRY S, RICHARD B, MICHAEL L. Next Generation Air Transportation System (NGATS) Air Traffic Management (ATM)-airspace project[R]. Virginia, NASA, 2006:25-28.
- [2] SESAR Consortium. SESAR definition phase deliverable 3-the ATM target concept [R]. DLM-0612-001-02-00, Toulouse, Eurocontrol, 2007.
- [3] 常平. GIS 技术在空管系统中的应用[D]. 广州:华南理工大学,2010. (CHANG P. The application of geographic information system on air traffic control system [D]. Guangzhou;South China University of Technology, 2010.)

- [4] 汤新民,韩云祥,韩松臣. 面向 4D 航迹运行的飞行冲突混杂系统理论监控方法[J]. 电子科技大学学报,2012,41(5):716-722. (TANG X M, HAN Y X, HAN S C. 4D trajectory based operation flight conflict supervisory control based on hybrid system theory [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(5): 716-722. )
- [5] TIAN Y P, WENG Z P, MAO X P. Study on key technologies of three-dimensional GIS in geosciences [C]//International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT), Wuhan, 2010: 166-169.
- [6] 崔文,崔焕东,张嵩. 基于 GIS 组件的航迹标绘系统设计与实现[J]. 测绘与空间地理信息,2012,35(2):107-109. (CUI W, CUI H D, ZHANG S. Design and implementation of flight-path plotting system based on GIS component [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(2):107-109. )
- [7] COLEMAN N, LAM K, PATEL K, et al. Real-time targeting and trajectory estimation for enhanced network centrality [C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, Honolulu, 2008:7117.
- [8] 安良,莫红飞. GIS 在雷达显示控制系统中的应用[J]. 雷达科学与技术,2011,9(3):264-267,285. (AN L, MO H F. Application of GIS in display and control system of radar [J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(3): 264-267, 285. )
- [9] 田甜,曹宁. 基于 OpenGL 实现雷达目标航迹的三维动态仿真[J]. 河海大学常州分校学报,2006,20(2):30-33. (TIAN T, CAO N. 3D dynamic simulation of radar target track based on OpenGL [J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2006, 20(2):30-33. )
- [10] 秦江波,李卫忠,高崇. 基于 Direct3D 的飞行器飞行航迹生成显示系统设计[J]. 电光与控制,2009,16(12):89-91,96. (QIN J B, LI W Z, GAO C. Design of a flight path generation/display system based on Direct3D [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(12):89-91, 96. )
- [11] 梁伟,李新国. 直升机三维航迹规划与可视化仿真[J]. 计算机辅助工程,2008,17(2):73-76. (LIANG W, LI X G. 3D trajectory planning and visualization simulation for helicopter [J]. Computer Aided Engineering, 2008, 17(2):73-76. )
- [12] 邱震宇,杨红雨,刘强. 三维大地形下的飞行航迹优化仿真[J]. 计算机仿真,2008,25(3):59-62. (QIU Z Y, YANG H Y, LIU Q. Optimal flying trail simulation on three-dimensional terrain [J]. Computer Simulation, 2008, 25(3):59-62. )
- [13] 刘洁,李宏. 基于三维 GIS 的新疆空管系统的设计与实现[J]. 地理空间信息,2012,10(4):86-88. (LIU J, LI H. Design and implementation of air traffic control system of Xinjiang based on 3D GIS [J]. Geospatial Information, 2012, 10(4):86-88. )
- [14] 唐勇,刘昌忠,吴宏刚. 基于 Google Earth 的三维航迹监视及六自由度飞行仿真[J]. 计算机应用,2009,29(12):3385-3387. (TANG Y, LIU C Z, WU H G. 3D flight track and 6-DOF flight simulation based on Google Earth [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(12):3385-3387. )
- [15] 田良辉,刘根友,陈晓峰,等. 空间飞行器在 World Wind 平台上的轨迹演示系统开发[J]. 测绘科学,2011(2):184-186. (TIAN L H, LIU G Y, CHEN X F, et al. Development of space aircraft trace display system based on the platform of World Wind [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011(2):184-186. )

## 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。