

# 基于 OpenGL 的飞机飞行实测数据可视化研究

叶舸<sup>1</sup>, 田兆锋<sup>1,2,\*</sup>, 闫楚良<sup>1</sup>

1. 国家机械结构安全性与可靠性开放实验室, 北京 100083

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191

**摘要:** 为实现飞机飞行历程实测数据的可视化, 并检测飞行数据是否满足飞行大纲要求, 运用 OpenGL (Open Graphic Library) 技术, 研究了飞机的三维模型建模方法、特殊场景的生成技术和三维模型的实测数据驱动; 建立了飞机的三维模型和飞行场景。基于飞行实测数据驱动方式, 实现了飞机飞行历程数据的多视角可视化, 直观地再现了飞机的实测飞行历程, 并可以通过飞机飞行姿态判断飞机的受载状况, 为判断实测飞行数据是否满足飞行大纲要求提供了可视化的评定方式。通过合理配置飞行实测数据格式描述文件和三维模型, 该飞行数据可视化系统可实现不同机型实测数据的可视化, 其具有较强的适用性。

**关键词:** OpenGL; 飞行历程; 飞行实测数据驱动; 数据可视化; 三维建模

**中图分类号:** V217+.32; TP319 **文献标识码:** A

数据可视化源于科学计算可视化, 是运用计算机图形学、图像处理技术和虚拟现实将数据转化为图形或者场景并进行交互处理的理论、方法和技术<sup>[1]</sup>。美国、法国、加拿大以及英国等航空技术发展较快的国家在 20 世纪 80 年代就利用计算机模拟三维环境进行飞行仿真; 中国航空飞行数据可视化技术研究起步较晚, 但发展比较迅速, 目前主要采用此项技术做事故调查和分析的辅助手段。国内外航空公司使用的飞行数据分析软件主要有 Teledyne Controls & Airbus AirFASE、Spirent GRAF 以及 FlightScape RAPS 等, 上述软件主要针对飞机机载设备记录数据, 而且软件参数定义库格式不同<sup>[2]</sup>。在飞机载荷谱实测飞行试验中, 通常需要进行几百架次的飞行, 测试数据

采样率和测试参数因机型和测试要求不同有很大差异, 如果使用上述软件进行数据分析, 需要将大量的实测数据转化成特定格式, 并且不同的数据源要有不同的转化算法, 无法保持良好的兼容性。

在飞机载荷谱实测飞行试验中, 以往主要通过观察关键参数的飞行曲线来判断飞行数据是否有效和飞机瞬时受载状态, 其直观性不足, 并且花费研究人员大量时间。随着计算机虚拟现实 (Virtual Reality) 技术的发展, 使得数字仿真向动态图形场景发展, 但大多是建立在虚拟数据基础上的仿真系统。本文阐述了飞行历程数据可视化系统的设计与实现, 并创建了不同型号飞机的三维模型, 构建了基于飞行实测数据驱动的数据可

收稿日期: 2010-10-30; 退修日期: 2011-01-13; 录用日期: 2011-03-30; 网络出版时间: 2011-04-12 15:31:58

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110412.1531.006.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110412.1531.006

基金项目: 国家自然科学基金 (50135010)

\* 通讯作者. Tel.: 010-64883423 E-mail: tian.zhaofeng@hotmail.com

引用格式: 叶舸, 田兆锋, 闫楚良. 基于 OpenGL 的飞机飞行实测数据可视化研究[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1050-1057. Ye Ge, Tian Zhaofeng, Yan Chuliang. Flight-test data visualization of aircraft's flight course based on OpenGL [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6): 1050-1057.

视化系统,提供了多视角的飞行数据观察方式。研究人员可以直观地观察对应载荷状态下飞机的飞行姿态和动作:一方面可用于飞机载荷状态的判别;另一方面,作为现场实测数据的监控手段,判断该起落飞行员的空中动作是否满足飞行训练大纲规定的要求。这为判断该起落是否有效提供了有力的依据和直观的手段,为飞行完成后研究人员根据飞行曲线判断飞行数据的有效性节省了大量时间<sup>[3-4]</sup>,对飞机动作的判断、飞机状态与载荷关联分析、载荷谱实测飞行科目有效性判断等方面,都具有重要的意义。同时也可用于评估飞行员操纵品质,以提高飞行训练质量。

本文采用 Windows MFC(Microsoft Foundation Classes)和 OpenGL(Open Graphic Library)的开发技术实现飞行实测可视化系统。尽管 MFC 和 OpenGL 是比较底层的开发方式,但是由于系统是完全基于实测飞行数据驱动的,如果使用 Virtools 或者 VEGA 等专用仿真工具,需要将实测数据转为 Virtools 或者 VEGA 使用的格式,转换需要较长时间,而此可视化系统可以高效地读取实测数据,对于不同机型数据用户只需定义数据描述文件即可解析,不需要任何转换,完全兼容实测飞行数据处理平台。

## 1 基于 Windows 的 OpenGL 体系结构

OpenGL 是一个开放的三维图形软件库,可以与 Visual C++ 紧密结合,实现有关计算和图形算法,保证算法的正确性和可靠性<sup>[5-7]</sup>。OpenGL 的作用机制是客户端(Client)/服务器(Server)机制,使得 OpenGL 可以十分方便地在网络环境下使用<sup>[8-10]</sup>。

OpenGL 图形库被封装在动态链接库(DLL) OPENGL32.DLL 内,受客户端应用程序调用的 OpenGL 函数都先在 OPENGL32.DLL 中处理,然后传给服务器。OpenGL 的命令再次得到处理并且直接传给 Win32 的设备驱动接口(DDI),这样就把经过处理的图形命令送给视频显示驱动程序。该过程如图 1 所示<sup>[11-12]</sup>。

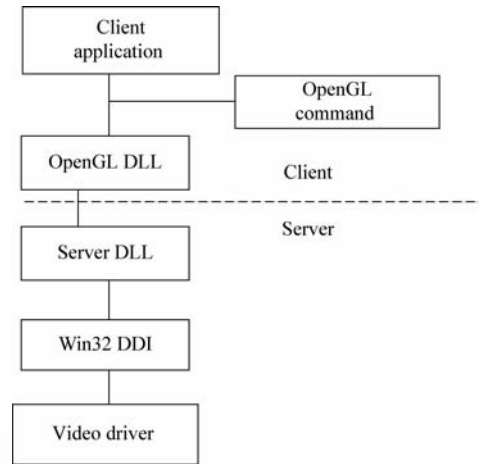


图 1 Windows 平台下 OpenGL 的运行机制  
Fig. 1 Mechanism of OpenGL based on windows

## 2 基于 MFC 的 OpenGL 应用程序框架

### 2.1 基于 MFC 的 OpenGL 实现机制

OpenGL 不提供窗口管理,这一任务是由具体平台系统来完成的。因此,要在 Windows 环境下使用 OpenGL 建立三维数据可视化开发环境,必须先把 Windows 的窗口系统与 OpenGL 关联起来,然后才能利用 OpenGL 提供的函数绘制和处理三维图形<sup>[3]</sup>。

基于 MFC 的 Windows 应用程序要使用 OpenGL 绘图,需创建飞行模拟视图(FlightSim-View),并将其绑定到一个非模式的对话框中。

在 Windows 下,用图形设备接口(GDI)作图必须通过设备上下文调用相应的函数来完成,OpenGL 函数是通过“渲染上下文”(Rendering Context)来完成三维图形的绘制<sup>[14]</sup>。

### 2.2 双缓冲技术

为形成动态画面,模拟仿真窗口不断地进行刷新和绘制。在默认情况下,画面会发生闪烁。闪烁主要由两个原因引起:背景清除和绘制过程的延时。

在 OpenGL 中利用双缓存技术,分配两个帧缓存区,在连续显示三维曲面时,一个帧缓冲区中的数据执行绘制曲面命令的同时,另一个帧缓存区中的数据进行图形显示。当后台视频缓存中的

数据要求显示时,OpenGL 就将它拷贝至前台视频缓存,显示硬件不断地读可见视频缓存中的内容,并把结果显示在屏幕上<sup>[15]</sup>。应用双缓存,每一帧三维曲面只在绘制完成之后才显示出来,所以观察者可以看到每一帧绘制完成的三维场景,而不是场景的绘制过程。

### 3 飞机模型的三维建模

飞机的三维建模是实现数据可视化的关键部分。飞机模型包含结构信息、材质信息和位置信息等。OpenGL 没有高级的三维造型命令,以代码的形式绘制出复杂的飞机模型显然是非常困难的<sup>[16]</sup>。

三维造型软件可以制作高精度的飞机三维模型,然后利用 OpenGL 读取这些模型文件。由于模型设计人员使用的软件系统不同,飞机模型的格式也是多种多样的。针对不同的三维模型文件格式,需要有不同的读取方法,这给开发人员带来了困难。因此,考虑选取一种较为简单易读的中间格式文件,使其能够较好地支持模型读取和显示,同时又支持与各种三维模型文件间的相互转换。

经过综合考虑,选用了 MilkShape 3D(MS3D)格式作为 OpenGL 显示模型时使用的文件格式。对于飞行历程数据可视化这一用途,主要希望飞

机模型仿真度高,对内部结构则无关。同时,出于对模型运行流畅性的要求,应该尽量降低模型的复杂度,以降低模型显示渲染的耗时和对计算机硬件的要求,提高场景渲染的流畅性,实际三维模型构建的工作流程如图 2 所示。

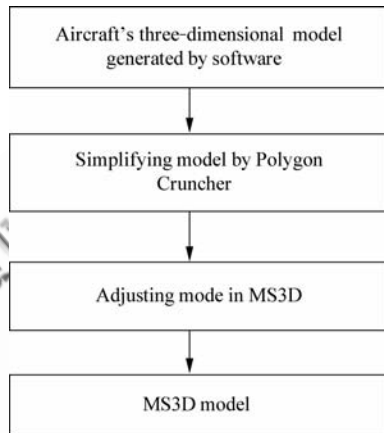


图 2 飞行历程数据可视化系统中飞机三维模型制作流程

Fig. 2 Process of three-dimensional model formation in flight course data visualization system

以某飞机模型制作过程为例,首先使用 3DS Max 建立了飞机的模型,如图 3 所示。在完成飞

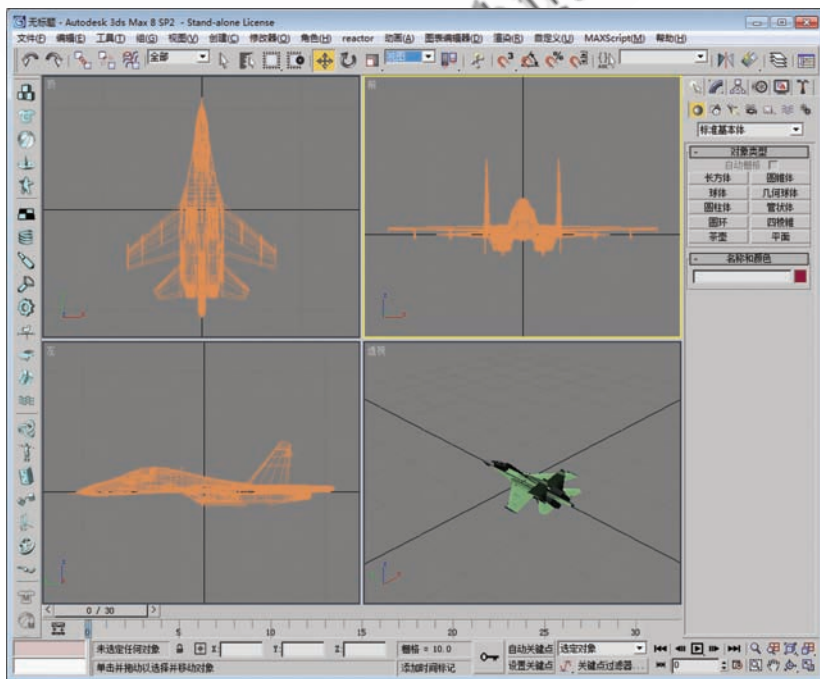


图 3 3DS Max 制作的飞机三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model in 3DS Max

机模型的制作后,通过 Polygon Cruncher 减面工具对模型进行简化,在获得适当显示质量的前提下尽量降低模型的复杂程度。最后,用 3DS Max

将模型导出为 3DS 文件,然后导入到 MS3D 软件中,进行调整并转换为 MS3D 文件。如图 4 和图 5 所示。

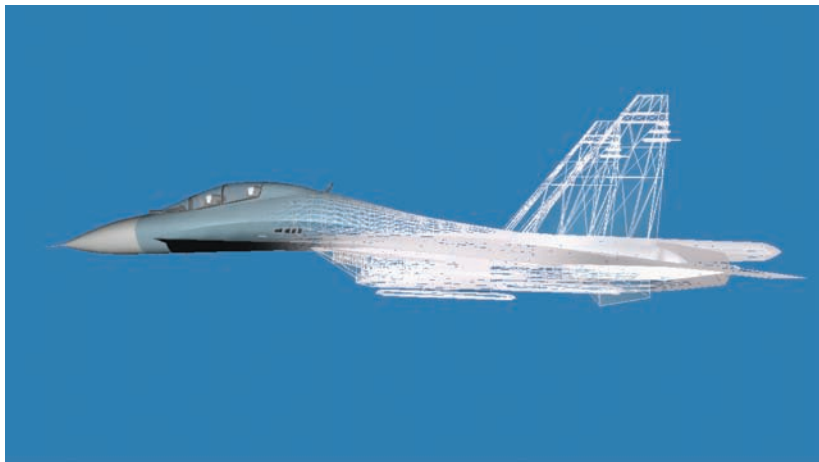


图 4 简化的飞机三维模型

Fig. 4 Simplified three-dimensional model

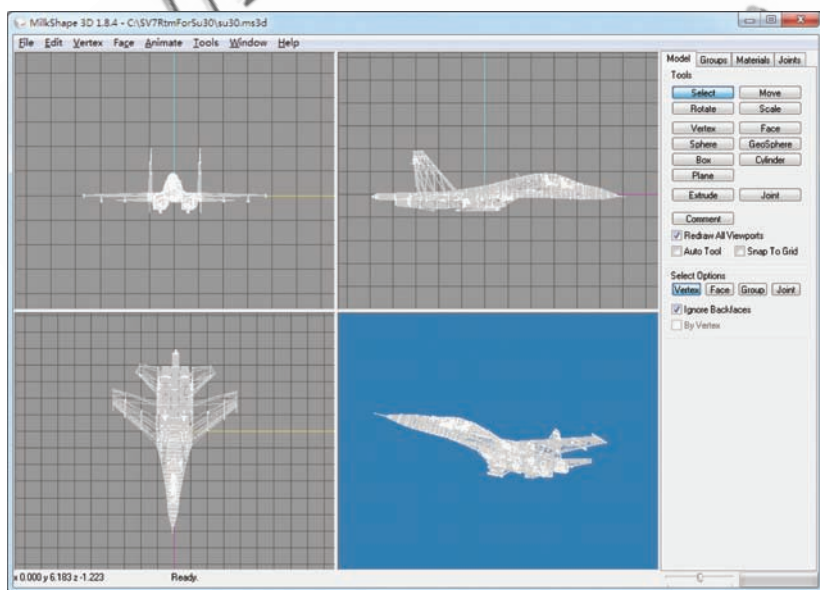


图 5 在 MS3D 中处理的三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model processed in MS3D

## 4 基于实测数据驱动的飞行历程可视化

### 4.1 可视化场景绘制

飞行历程数据可视化窗口的场景主要包括以下部分:

#### (1) 飞机

飞机模型与贴图以外部文件形式存在。该系统支持多种机型的飞行模拟,并自动根据飞行实测数据属性中的机型信息匹配飞机模型文件。例如,A 飞机实测数据的数据描述文件中定义了 TestObjectName=A,则在进行该数据回放时,会



自动查找并载入 A. MS3D 模型,以此类推。

使用类 MilkshapeModel 封装了飞机三维模型的操作。MilkshapeModel::loadModelData() 执行从 MS3D 文件中载入飞机模型数据,并将其转变为顶点列表、多边形列表和材质列表的操作;MilkshapeModel::draw() 则执行飞机模型绘制的操作。

### (2) 地形

由于飞行历程数据可视化系统重点关注飞机飞行姿态、机动动作的真实再现,对地形的仿真度要求不高,因此地形并未使用真实的机场和飞行区域地形,而是处理为照片纹理贴图的地平面效果。

### (3) 天空

天空按照半径足够大的球体天穹处理,并以无缝的云彩照片为材质进行贴图,取得了较好的效果。

### (4) 飞行轨迹拉烟效果

为了便于辨识飞行的轨迹,给飞机加上了翼对象,每隔一定距离产生一行烟雾,具有随机的大小。烟雾使用始终面向观察者的烟雾照片贴图形式绘制,随着时间推移逐渐变大变淡并消失,如图 6 所示。



图 6 飞行历程数据可视化窗口

Fig. 6 Data visualization window of flight course

## 4.2 实测数据驱动的飞行数据可视化

飞行历程再现使用的是真实的实测飞行数据驱动,更强调真实还原飞机的姿态、机动动作,其飞机姿态含 6 自由度参数:相对于机场的三维空间坐标和相对于机体的 3 个姿态角、舱内仪表指示和飞行轨迹等。对于某些飞机型号没有导航定

位装置,因此需要对飞行参数中的速度等参数进行积分运算,得到飞机的空间地理位置。根据记录的高度、速度、迎角、俯仰角、航向角和滚转角等参数,在飞行动力学理论的基础上可直接积分法算出飞行航迹。

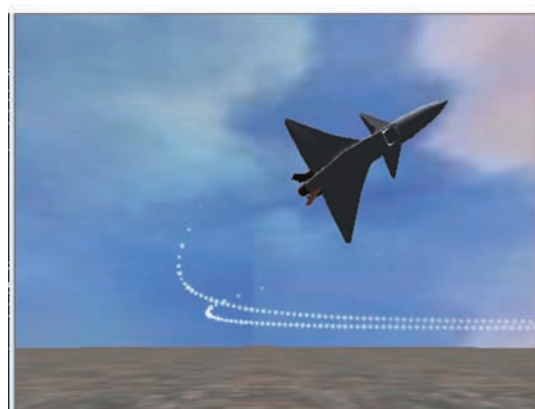
该飞行数据可视化系统主界面是飞行历程曲线视图,它支持飞行实测数据的动态回放,同时可以调节回放的速率。飞行历程数据可视化窗口为单独应用程序窗口,显示当飞行历程曲线视图处于回放状态或者鼠标在飞行历程曲线窗口内拖动时间点时,飞行历程曲线视图将发送自定义消息 WM\_FLIGHTSIMBARUPDATE 给飞行模拟窗口,将位置信息和姿态角数据存入数组数据缓冲区,将数据缓冲区的首地址作为用户自定义窗口消息的参数发送给飞行历程数据可视化窗口。

飞行模拟视图在初始化后即启动一个定时器,以每秒 30 次的频率产生飞行模拟窗口客户区无效的消息,以驱动飞行模拟视图的更新。通过消息驱动的形式,使得飞行模拟窗口和时间历程曲线窗口之间处于松散耦合的状态,简化了程序的逻辑,增强了飞行模拟模块的独立性。同时,该方式利用了 Windows 消息队列对 WM\_PAINT 消息处理的累加性特点(一次处理累加的 WM\_PAINT 请求),异步地进行飞行数据可视化窗口更新,避免了飞机姿态数据变化时强制重绘可能导致的系统响应停顿的问题。

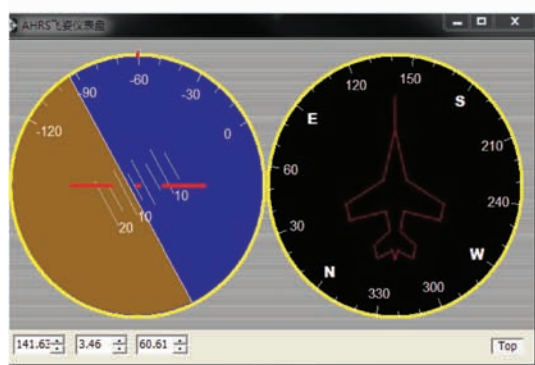
飞行历程数据可视化系统除了对飞行姿态进行还原外,还还原了飞行航姿仪表盘窗口,三维飞行轨迹窗口,如图 7 所示。

为了从不同角度、不同层次全面了解飞机飞行状态,系统支持多种再现观察模式,具体包括跟随视角(僚机)模式、地面视角模式、仪表盘模式和航迹模式。

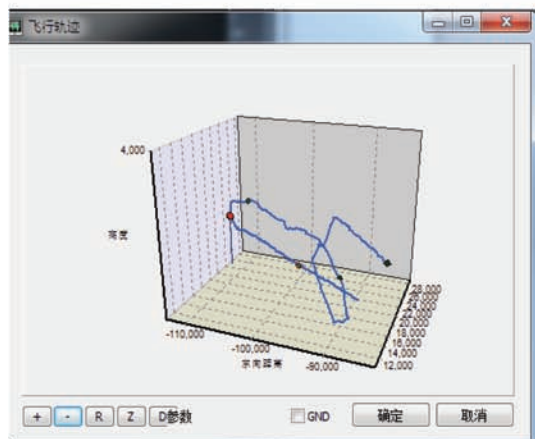
跟随视角也可以成为僚机视角,是指在飞机的外部随动地观察飞机姿态,就像处于僚机的角度。僚机视角的观察以飞机的运动质心为相对坐标系的原点,虚拟摄像机与飞机的相对位置保持不变,观察角度始终对准飞机质心。虚拟摄像机与飞机的相对位置用其与 X 轴和 Z 轴的夹角及其与原点的距离这 3 个参数表示。用户通过标准输入输出设备可自由控制观察点虚拟摄像机的方位,从任意角度和任意接近距离观察飞机姿态。



(a) Flight status



(b) GPS panel



(c) Flight track

图 7 飞行历程数据可视化系统的组成

Fig. 7 Parts of flight course data visualization

## 5 结 论

(1) 区别于飞行模拟驾驶等仿真系统,基于实测飞行数据,对飞机的飞行历程进行了可视化分析,为研究人员判断数据有效性和飞机负载状

态提供了直观的判断方式。

(2) 系统可通过改变数据格式描述文件和飞机三维模型配置文件实现不同机型的飞行实测数据的可视化,具有较强的可移植性和适用性。

## 参 考 文 献

- [1] 赵焕芳,朱东华. 信息可视化在技术监测中的应用[J]. 情报杂志, 2005, 24(12): 46-48.  
Zhao Huanfang, Zhu Donghua. Enabling application of information visualization on technology monitoring [J]. Journal of Information, 2005, 24(12): 46-48. (in Chinese)
- [2] 李春香. 飞行数据可视化技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(1): 166-171.  
Li Chunxiang. Research on the visualization technology of flight data [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(1): 166-171. (in Chinese)
- [3] 阎楚良,高镇同. 飞机高置信度中值随机疲劳载荷谱的编制原理[J]. 航空学报, 2000, 21(2): 118-123.  
Yan Chuliang, Gao Zhen tong. Compilation theory of median stochastic fatigue load spectrum with high confidence level for airplane [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(2): 118-123. (in Chinese)
- [4] 阎楚良,张书明,叶舸,等. 中值随机载荷谱数据处理专家系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(4): 428-431.  
Yan Chuliang, Zhang Shuming, Ye Ge, et al. Data treatment expert system for median stochastic load-spectrum [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(4): 428-431. (in Chinese)
- [5] Shreiner D, Woo M, Neider J, et al. OpenGL programming guide[M]. 5th ed. Ontario, Canada: Addison-Wesley Professional, 2005: 1-2.
- [6] Edward A. OpenGL 编程基础[M]. 3版. 段菲,译. 北京:清华大学出版社,2008: 1-3.  
Edward A. OpenGL: a primer[M]. 3rd ed. Duan Fei, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 1-3. (in Chinese)
- [7] 李丽荣,沈春林,陆宇平,等. 基于 OpenGL 的飞行器超低空追击/拦截三维可视化仿真系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(3): 269-273.  
Li Lirong, Shen Chunlin, Lu Yuping, et al. 3D visualization simulation system based on OpenGL of low altitude chase/interception [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(3): 269-273. (in Chinese)

- [8] 吴慧欣, 毋建宏, 薛惠峰. 基于 OpenGL 的交互式三维建模仿真应用研究[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(3): 376-378.  
Wu Huixin, Wu Jianhong, Xue Huifeng. Application research for interactive 3D modeling based on OpenGL [J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(3): 376-378. (in Chinese)
- [9] 常进, 何援军, 田海山. 基于 OpenGL 的机载图形生成算法[J]. 工程图学学报, 2008, 29(3): 50-55.  
Chang Jin, He Yuanjun, Tian Haishan. Graphics generation algorithm for aircraft platform based on OpenGL[J]. Journal of Engineering Graphics, 2008, 29(3): 50-55. (in Chinese)
- [10] 何进. 计算机图形学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 10-11.  
He Jin. Computer graphics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 10-11. (in Chinese)
- [11] 陈俊涛, 肖明, 郑永兰. 用 OpenGL 开发地下结构工程三维有限元图形系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1016-1020.  
Chen Juntao, Xiao Ming, Zheng Yonglan. Development of 3D graphics system of finite elements for underground engineering using OpenGL[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1016-1020. (in Chinese)
- [12] 杨双华, 王以伦, 张立勋, 等. MFC 构架下的 OpenGL 动画技术[J]. 应用科技, 2001, 28(3): 31-32.  
Yang Shuanghua, Wang Yilun, Zhang Lixun, et al. OpenGL animation technique based on MFC[J]. Applied Science and Technology, 2001, 28(3): 31-32. (in Chinese)
- [13] 胡伟, 王弘. 如何在 VC++ 中用 MFC 进行 OpenGL 编程[J]. 计算机应用, 2001, 21(8): 87-89.  
Hu Wei, Wang Hong. OpenGL programming by MFC based on VC++[J]. Computer Applications, 2001, 21(8): 87-89. (in Chinese)
- [14] George Shepherd, David Kruglinski. Microsoft Visual C++. NET 技术内幕[M]. 6 版. 潘爱民, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007: 78-84.  
George Shepherd, David Kruglinski. Programming with Microsoft Visual C++. NET core reference[M]. 6th ed. Pan Aimin, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 78-84. (in Chinese)
- [15] 陈其, 刘国良, 曾航, 等. OpenGL 三维图形系统开发与实用技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003: 16-24.  
Chen Qi, Liu Guoliang, Zeng Hang, et al. Development of three-dimension graphics system and technology using OpenGL[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2003: 16-24. (in Chinese)
- [16] 高颖, 黄罗军, 许志国, 等. 基于 OpenGL 的某导弹视觉仿真技术研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(1): 125-128.  
Gao Ying, Huang Luojun, Xu Zhiguo, et al. Designing and implementing of a missile's visual simulation system based on OpenGL[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(1): 125-128. (in Chinese)

#### 作者简介:

叶舸(1971—) 男, 博士, 研究员. 主要研究方向: 数据库与网络工程。

Tel: 010-64883969

E-mail: jacky@caams.org.cn

田兆锋(1975—) 男, 博士, 高级工程师. 主要研究方向: 数据库与网络工程。

Tel: 010-64883423

E-mail: tian.zhaofeng@hotmail.com

闫楚良(1947—) 男, 博士, 研究员, 博士生导师. 主要研究方向: 飞机结构可靠性。

Tel: 010-64882254

E-mail: yancl@sina.com

# Flight-test Data Visualization of Aircraft's Flight Course Based on OpenGL

YE Ge<sup>1</sup>, TIAN Zhaofeng<sup>1,2,\*</sup>, YAN Chuliang<sup>1</sup>

1. *The Open Laboratory of the State Administration of Machinery Industry for Mechanical Structural Security and Reliability, Beijing 100083, China*
2. *School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

**Abstract:** To realize flight-test data visualization of aircraft's flight course to solve the difficulty that whether the flight-test data meet the need of flight-test outline. Aircraft's three-dimensional model and flight scene are generated by using open graphics library (OpenGL), modeling method of three-dimensional objects and its flight data driven method. The multi-view data visualization of flight course reappears from flight-test data. And according to the system, whether the flight-test data meet flight-test outline can be determined. The data visualization system provides an intuitive way to prove the validity of flight-test data and aircraft load state can be judged by the reproduced scene. The system could be applied to any type of aircraft as long as data description file and model configuration file are configured correctly.

**Key words:** OpenGL; flight course; driven by flight-test data; data visualization; three-dimensional modeling