

8-3-2020

3D Flight Simulation System Visualization and Study of Google Earth

Junyu Wang

The Unit 95934 of PLA, Cangzhou 061736, China;

Bin Cheng

The Unit 95934 of PLA, Cangzhou 061736, China;

Chuan Wang

The Unit 95934 of PLA, Cangzhou 061736, China;

Ren Jian

The Unit 95934 of PLA, Cangzhou 061736, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

3D Flight Simulation System Visualization and Study of Google Earth

Abstract

Abstract: Through the secondary development of Google Earth, flight training simulation system for visualization of realization, the system used B/S structure, the client browser using Google Earth, all the development on the server side. *Mathematical model of aircraft was constructed; 3D modeling software SketchUp was used to establish a realistic fighter jets, missiles, high and low speed flame and other 3D model; the established 3D models was imported into Google Earth; by Microsoft VC ++ 6.0, the secondary development on Digital Earth was achieved, and the control of aircraft and other 3D models was realized; Matlab was used to verify the validity of the mathematical model.* The result shows that the simulation system has good visual effects and interactive features, scalability of the system is to meet the diverse needs of the Air Force's technical and tactical training, with good practical significance and promotional value.

Keywords

Google Earth, flight simulation, visualization, control

Recommended Citation

Wang Junyu, Cheng Bin, Wang Chuan, Ren Jian. 3D Flight Simulation System Visualization and Study of Google Earth[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8): 1824-1830.

数字地球下三维飞行仿真系统的可视化研究

王浚羽, 程斌, 王川, 任健

(中国人民解放军 95934 部队, 河北 沧州 061736)

摘要:通过对数字地球的二次开发,对飞行训练仿真系统进行了可视化的实现,系统采用 B/S 结构,客户端采用 Google Earth 浏览器,全部开发都在服务器端。构建飞机的运动模型;通过三维建模软件 SketchUp 建立了逼真的战斗机、导弹、高低速火焰等三维模型;将所建立的三维模型导入到数字地球中;通过 Microsoft VC++6.0 实现对数字地球的二次开发,对系统中的战斗机等三维模型进行控制;通过 matlab 对所建数学模型进行了验证。运行结果表明:该仿真系统具有良好的可视化效果和人机交互功能,系统的可拓展性可满足空军部队的技战术训练的多样化需求,具备较好的实际意义和推广价值。

关键词: 数字地球; 飞行仿真; 可视化; 控制

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 08-1824-07

3D Flight Simulation System Visualization and Study of Google Earth

Wang Junyu, Cheng Bin, Wang Chuan, Ren Jian

(The Unit 95934 of PLA, Cangzhou 061736, China)

Abstract: Through the secondary development of Google Earth, flight training simulation system for visualization of realization, the system used B/S structure, the client browser using Google Earth, all the development on the server side. *Mathematical model of aircraft was constructed; 3D modeling software SketchUp was used to establish a realistic fighter jets, missiles, high and low speed flame and other 3D model; the established 3D models was imported into Google Earth; by Microsoft VC ++ 6.0, the secondary development on Digital Earth was achieved, and the control of aircraft and other 3D models was realized; Matlab was used to verify the validity of the mathematical model.* The result shows that the simulation system has good visual effects and interactive features, scalability of the system is to meet the diverse needs of the Air Force's technical and tactical training, with good practical significance and promotional value.

Keywords: Google Earth; flight simulation; visualization; control

引言

新世纪新阶段,面对复杂多变的国际局势,建立一支“能打仗,打胜仗”的强大人民空军变得异

常迫切,因而通过改变传统低效训练方式开展实战化飞行训练事关重大。以军事训练需求为牵引,航空兵作战仿真系统得到快速发展,有利于节约作战时机,便于日常训练。利用先进的计算机仿真技术开展航空兵战术战法演练,是和平时期提高飞行训练效果的最有效手段之一,各国空军都十分重视。但是当前航空兵部队所用的飞行训练系统大多由飞行模拟器组成,成本高,不易于日常对抗训练使



收稿日期: 2015-05-13 修回日期: 2015-06-15;
作者简介: 王浚羽(1990-),男,内蒙古通辽人,硕士,助工,研究方向飞行仿真等;程斌,男,高工,研究方向为视景仿真等;王川,男,工程师,研究方向为计算机仿真技术等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1824 •

用, 并且难以快速装备到各基层部队, 针对这样的实际, 对基于 PC 的航空兵作战仿真系统进行了初步设计, 并对系统中的可视化技术进行了研究。

近年来随着科学技术的快速发展, 仿真技术的应用研究日益深入, 利用计算机系统模拟飞行训练, 在数字世界中利用数字和现实结合完成飞行训练在各国空军部队已经相当普遍, 并且训练效果很好, 比如近几场局部战争, 像海湾战争、伊拉克战争等, 美军在战争前均匀用了模拟训练系统进行事先演练, 极大地增强了战斗准备能力, 有效提高了战斗力。

飞机在三维环境下的六自由度飞行仿真在飞行训练、飞行冲突研究、飞行事故调查、航迹规划、空域规划和战术战法研究等方面都具有重要意义。通常的飞行仿真, 一般会运用 Creator, 3Dmax, Maya 等软件创建三维模型, 以 Vega, FlightGear, OpenGL 等软件未开发平台进行仿真, 在这些平台下, 需要构建相关地形地景数据, 并且地域范围一般都很有有限, 对于开发而言, 较为费时, 不利于提高效率, 并且可拓展性相对较弱。当前飞行仿真依然是世界各国在科学研究探索当中的热门领域, 但已不只是局限在仿真的功能实现上, 而是旨在向更高的实时性、更好的仿真效果、更接近真实情况发展。

数字地球是 Google 公司推出的一款虚拟地球软件^[1]。它把卫星照片、航空照相和 GIS 布置在一个三维的地球模型上。它使用了公共领域的图片、受许可使用的航空照相图片、KeyHole 间谍卫星的图片和很多其他卫星所拍摄的照片, 甚至还包含了实时天气信息, 通过 Google Earth API 可对数字地球进行二次开发。SketchUp 作为一款三维建模软件, 虽然不比专业的建模软件, 但其功能已足够本系统开发使用, 并且易学易用, 同时, 它同数字地球具有很好的兼容性, 其文件也较小, 传输速率较快^[2-5], 利用二者进行飞行仿真系统的开发不仅可以构建大区域条件下的飞行仿真, 同时 Google Earth API 的可拓展性使系统具有巨大的拓展性和可发前景。

1 数学模型构建

1.1 假设条件

本文在建模过程中作如下假设:

将地球视为平面, 忽略飞机飞行过程中对地球所产生的离心加速度及地球旋转和飞机的线速度合成的科氏加速度所带来的影响;

将重力加速度视为恒值, 忽略高度变化带来的重力加速度的变化;

由于旋转部件产生的陀螺力矩与飞机的惯性力矩相比很小, 本文忽略旋转部件的陀螺力矩;

将固连于地球的地面坐标系视为惯性坐标系;

忽略飞机燃料的流动、机内活动部件的运动和发动机“喷流效应”对飞机运动产生的影响;

忽略飞机弹性变形的影响, 将飞机视为刚体进行研究;

在上述假定基础上, 本文就把飞机当做刚体来处理, 即运用刚体动力学和运动学的理论来研究本文仿真系统中战机的运动。

1.2 坐标系选择与转换

不同坐标系下建立的数学模型略有不同, 选取恰当的坐标系, 不仅便于数学模型的建立, 并且便于分析计算。如在本文中, 需要对飞机飞行过程中当前所处地理位置进行研究, 此时选取地面坐标系就较为方便; 在对飞机当前飞行姿态进行研究时, 机体坐标系则更为便利。也就是说, 不同坐标系下着重研究不同的状态量, 并且在计算过程中, 还涉及到不同坐标系之间的转换。

飞机的运动参数包括气流角、姿态角和航迹角等。在对运动学方程进行研究时, 通常涉及到不同坐标系的运动分析, 就需要用飞机运动参数来完成不同坐标系之间的转换, 确定转换关系, 本文主要用到了机体坐标系和地面坐标系之间的转换, 主要涉及到了飞机运动参数中的姿态角。

飞行器的姿态角是通过机体坐标系与地轴坐标系之间的关系确定的, 包括俯仰角 θ 、偏航角 ψ

和滚转角 ϕ 。这 3 个角度描述了飞行器的空间姿态。

本文中主要用到机体坐标系与地面坐标系之间的转换, 机体坐标系与地面坐标系的转换关系可以通过俯仰角 θ 、偏航角 ψ 、滚转角 ϕ 来确定。机体坐标系依次经过 3 次转动与地面坐标系重合,

$$L_{td}(\psi, \theta, \phi) = L_3(\phi)L_2(\theta)L_1(\psi) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ -\sin \theta \sin \phi \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \theta \sin \psi \sin \phi + \cos \phi \cos \psi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \sin \theta \cos \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.3 数学模型建立

根据假设条件, 将地球看作惯性空间中的一个“静止平面”, 将飞机看作是具有对称平面的质量不变的刚体。飞机在空间作六自由度刚体运动, 包括三个自由度绕质心转动和三个自由度的线运动。下面开始建立飞行动力学和运动学数学模型, 以便于求解出飞机的位姿信息。

飞行动力学方程包括力方程和力矩方程, 其中包含了三个描述飞机绕质心转动规律的力矩方程, 和三个描述飞机质心移动规律的力方程。通过这 2 组方程即可唯一确定在外力矩和外力作用下飞机的运动规律。

力方程为:

$$\begin{cases} m \left(\frac{dV_{xt}}{dt} + \omega_y V_{zt} - \omega_z V_{yt} \right) = \sum F_x \\ m \left(\frac{dV_{yt}}{dt} + \omega_z V_{xt} - \omega_x V_{zt} \right) = \sum F_y \\ m \left(\frac{dV_{zt}}{dt} + \omega_x V_{yt} - \omega_y V_{xt} \right) = \sum F_z \end{cases} \quad (2)$$

力矩方程为:

$$\begin{cases} I_x \dot{p} - I_{xz}(\dot{r} + pq) + (I_z - I_y)qr = \sum M_x \\ I_y \dot{q} - I_{xz}(r^2 - p^2) + (I_x - I_z)rp = \sum M_y \\ I_z \dot{r} - I_{xz}(\dot{p} - qr) + (I_y - I_x)pq = \sum M_z \end{cases} \quad (3)$$

其中: $F_x, F_y, F_z, v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z, M_x, M_y, M_z$ 分别为外力 F , 飞机质心速度 v , 质心角速度 w , 力矩 M 在机体坐标系 3 个坐标轴上的

可以先绕 Z 轴转过角 ψ , 然后绕 Y 轴转过角 θ , 再绕 X 轴转过 ϕ , 达到与地面坐标系重合, 按照此方法, 绕各轴的旋转变换矩阵依次为:

所以, 可求得地面坐标系到机体坐标系的旋转变换矩阵为:

分量, I 为转动惯量。

飞机所受的外力和外力矩使飞机的位置和姿态发生变化, 通过前面对力和力矩的分析及动力学方程推导, 可推得飞机的运动方程如下。

$$\begin{cases} [V_{dx}, V_{dy}, V_{dz}] = [V_{tx}, V_{ty}, V_{tz}] \cdot L_{td}(\phi, \theta, \psi) \\ V_{dx} = V_{tx} \cos \theta \cos \psi + V_{ty} (\sin \phi \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \cos \psi) + \\ V_{tz} (\sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi) \\ V_{dy} = V_{tx} \sin \theta + V_{ty} \cos \phi \cos \theta - V_{tz} \sin \phi \cos \theta \\ V_{dz} = V_{tx} (-\cos \theta \sin \psi) + \\ V_{ty} (\cos \phi \sin \theta \sin \psi + \sin \phi \cos \psi) + \\ V_{tz} (-\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi) \\ \dot{\phi} = p + q \sin \phi \cdot \operatorname{tg} \theta + r \cos \phi \cdot \operatorname{tg} \theta \\ \dot{\theta} = q \cos \phi + r \sin \phi \\ \dot{\psi} = q \sin \phi \cdot \operatorname{sec} \theta + r \cos \phi \cdot \operatorname{sec} \theta \end{cases} \quad (4)$$

其中: θ, ψ, ϕ 为飞机在地面坐标系下的姿态, 分别为俯仰角、偏航角和滚转角; V_g 为飞机在地面坐标系中飞机执行位移的线速度。

2 可视化关键技术

2.1 三维模型创建

相比于同类软件如 AutoCAD、3ds Max 等的复杂性和专业性, SketchUp 操作简单方便直观, 尽管其很难达到专业建模软件的效果, 但其建模效率较高, 且能真实地表现三维模型, 加上其兼容性好、

界面简洁、功能强大以及其直接面向设计过程等优点, 应用非常广泛, 用户可根据需要将 SketchUp 创建的模型交给其它具备高级渲染能力的软件进行二次渲染, 增加逼真度。另外, SketchUp 和 Google Earth 之间具有良好的兼容性, 可通过“添加影像”将 Google Earth 中的待建模区域的遥感影像导入到 SketchUp 中, 这样可在 SketchUp 环境中, 在遥感影像上进行建筑物模型的构建; 同时 SketchUp 所建三维模型也可通过“上传到 Google Earth”功能导入到 Google Earth 之中。SketchUp 文件默认保存为 skp 格式, 导入到 Google Earth 中后变为 kmz 格式, 还可通过更改扩展名保存为 kml 文件, kmz 和 kml 格式的文件为文本形式, 具有文件小、传输快的特点, 有利于提升系统性能。

在本文对三维飞机模型进行构建的过程中, 需要根据真实飞机模型首先绘制线条等基本形状, 然后通过推拉等操作使基本形状变为立体模型, 进而建立组成飞机的基本构件, 最后通过装配等操作将各部分构件组合成一个完整的飞机模型。

构建完模型之后, 为了获得较具真实感的视觉效果, 需要对建成的模型进行渲染, 渲染就是将已经建好的模型赋予纹理和材质, 加入光照效果等, 使模型逼真度更高, 具有良好的质感和光影效果等, 进而获得较好的视觉效果。以本文所建立的飞机三维模型为例, 在初步建好三维模型以后, 对飞机模型进一步渲染, 通过阴影、软化/平滑边线等处理。

本系统主要建立了战斗机、导弹以及高低速火焰的三维模型, 如图 1 所示。

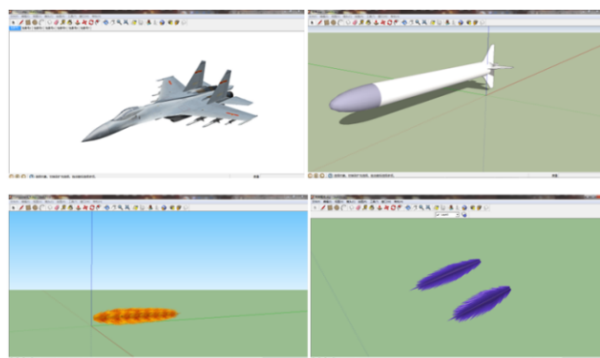


图 1 三维模型组图

2.2 可视化实现

飞行训练仿真系统的可视化效果一定程度上直接决定了系统的推广使用价值, 本系统的可视化分为三维模型库构建、战场环境生成和作战态势观察几个部分, 如图 2 所示。

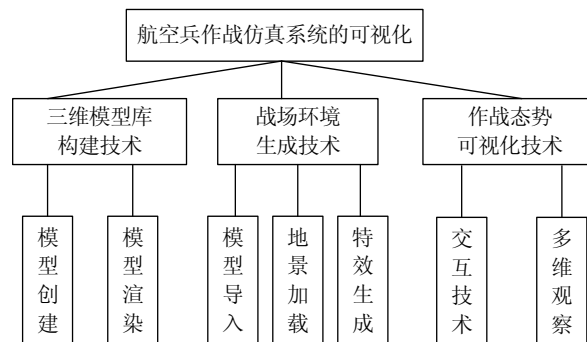


图 2 系统的可视化关键技术划分图

本系统的开发平台为数字地球, 其显示窗口也是飞行训练过程中进行视觉交互的关键部分。在系统的可视化实现中, 主要是用对数字地球的进行二次开发。为满足飞行训练的多样化需求, 数字地球为开发者提供了两种可用于扩展不同应用功能的开发接口, 第一种是 KML 文件形式, KML 基础上的开发方法多用于生成地理要素, 实现数据的不断更新等具体功用; 第二种是组件 API 形式, 对于组件 API 基础上的开发方法主要用于控制 Google Earth 画面中的观察视角、实现画面的动态效果等功能。为了获得较为理想的交互和多维观察等训练效果, 本系统同时运用了 KML 文件形式和组件 API 形式^[6-8]。

Google Earth 中的地图数据、地物地标及其他一些附加的信息图层大多是通过 KML/KMZ 文件来组织的。比如按经度、纬度、高度的顺序, 以一个起始点坐标为(125m, 43m, 500m), 终点坐标为(125.2m, 43.9m, 500m)的三维地标为例, 其文件的组织形式为:

```
<kml>
<Folder>
<name>三维平面地标</name>
```

```

<open>1</open>
<Placemark>
<LineString>
<extrude>1</extrude><tessellate>1</tessellate>
<altitudeMode>relativeToGround</altitudeMode>
<coordinates>125,43,500 125.5,43.5,500
</coordinates>
</LineString>
</Placemark>
</Folder>
</kml>

```

本文中在对飞机飞行的姿态控制上也使用到了 KML 文件,对 KML 文件的操作可通过本系统程序中 file.Open()、file.Read()、cs.Format()等完成,读取可通过 IApplication 类的 2 个方法来实现,OpenKmlFile()需要 KML 文件路径作为参数,读取 KML 文件加载到 GE 中,或者通过 LoadKmlData()将 KML 文件加载到 Google Earth 中。

2.3 控制方式

本系统设置了人工控制和网络控制 2 种工作模式。人工控制模式下模拟战机的运动根据人为操作的键盘鼠标决定;网络控制模式下,由预先设定的程序或目标点,进行有规划的飞行。

2.3.1 人工控制

人工控制,即通过人为的操纵进行控制的方式。如表所示,通过键盘上定义键盘上的功能键,可以完成飞机的动力控制、飞行控制,导弹的发射等功能。

动力控制部分。为了增进仿真效果,在动力控制部分引入了飞机尾焰控制,当模拟战机处于低速状态时,飞机尾焰成黄色,当战机逐渐提速,地面的视景变化逐渐加快,超过设定的尾焰变色的速度“阈值”时,尾焰变为蓝色。高低速尾焰效果如图 3 所示。

姿态控制部分主要控制飞机的俯仰、偏航和转滚等运动。飞行训练中的操纵对应模拟战机的状态可见图 4。

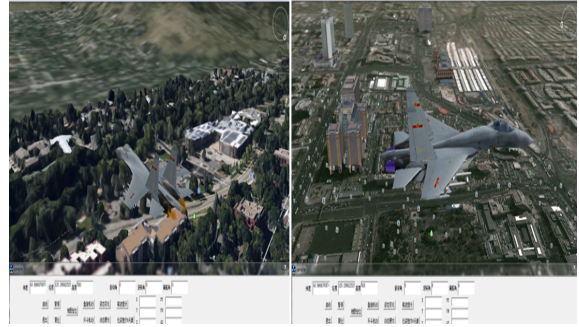


图 3 低高速状态模拟战机尾焰效果图

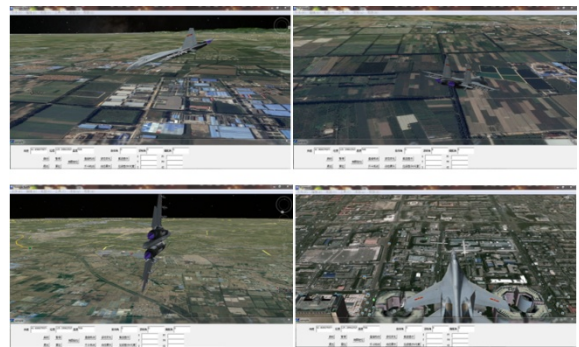


图 4 人工控制下飞机状态图

武器控制部分。本文所述的系统是面向空军飞行训练的,因而需要进行模拟空战的武器,比如导弹,本文所设计可视化系统,对导弹发射攻击初步实现,见图 4。

2.3.2 网络控制

通过人机交互界面选择网络控制方式时,仿真系统进入网络控制状态,系统进入网络控制模式时,人工控制不起作用。飞机全程的飞行过程按照预设的程序或设定的目标点执行,此部分主要用于战术研究和测试工作等。网络控制过程中飞机的实时位姿信息显示,如图 5 所示。



图 5 模拟战机位姿信息实时显示

2.3.3 多维观察

为了便于观察飞行器飞行状态, 本系统设定了几种观察模式, 便于全方位地观察飞行器当前的作战态势, 包括侧视视角观察模式、俯视视角观察模式、后视视角观察模式和自由视角观察模式共 4 种, 训练人员可以根据需要切换观察视角和显示方式, 全方位观察飞机的作战态势。见名可知其意, 侧视视角观察模式, 也就是在战机侧面跟随观察, 是将视点和观察位置设置在战机侧方一定距离, 可以便于查看飞机飞行过程中俯仰姿态的改变; 后视视角观察模式, 就是在战机后方跟随观察的一种方式, 是将视点和观察点设置在战机后方一定距离处, 便于观测飞机飞行过程中滚转变化情况; 俯视视角就是在战机上方跟随观察, 是将视点和观察点设置在战机上方一定距离, 便于对飞机航向进行观察; 自由视角观察模式, 就是通过手动控制使用户可以鼠标实现在三维场景内的任意位置进行观察。不同的观察模式所关注的重点有所不同, 用户可根据需要使用不同的观察方式, 方便用户根据需要调用不同观察模式, 便于观察战场态势和战机的飞行状态, 有利于作战指挥人员的指挥调度。

在 Google Earth COM API 中 ICameraInfoGE 类主要用来控制客户端视图, 因此成为本系统重点使用的一个类。ICameraInfoGE 类和 IApplicationGE 类中的函数 SetCameraParams() 所实现的功能相近。二者又有所区别, 在对视高、视底点、方位角等进行相关操作时, SetCameraParams() 函数仅能设置当前条件下视图的这些属性, 而 ICameraInfoGE 类对这些属性的操作则是分开进行的, 因而 ICameraInfoGE 类在对视图的控制方面更加灵活、方便, 但在某些情况下使用 SetCameraParams() 函数会较为方便。另外, 本系统中的视图观察方面, 综合运用了 ICameraInfoGE 类和 SetCameraParams() 函数, 通过二者配合共同完成本文中视图观察方面的工作。设置观察模式是由下 7 个属性来确定:

<longitude>: 镜头所观察的点的经度, 是相对

于本初子午线的角度。子午线以西的取值范围是 $-180^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 。子午线以东的取值范围是 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。

<latitude>: 镜头所查观察的点的纬度, 是赤道以北或以南的度数。取值范围从 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$;

<altitude>: 与地表的距离, 一般单位是 m。根据 LookAt 的海拔高度模式来设置;

<heading>: 镜头的朝向, 以角度表示。默认为 0° , 即表示朝向北, 取值为 90° , 180° 和 270° 时, 分别表示方向指向东、南和西, 取值范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$;

<tilt>: 摄像机镜头的方向与地面的法线方向的夹角。取值范围从 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$;

<range>: 从由 <longitude>, <latitude> 和 <altitude> 3 个元素所指定的被观察点到摄像机镜头位置的距离, 以 m 来表示, 并且这个属性在 KMLLookAt 对象中是必须被定义的;

<altitudeMode>: 该属性用于解释摄像机镜头位置点指定的 <altitude> 高度值的方式。此属性的取值主要有 2 种情况, 默认值为 clampToGround, 表示忽略 <altitude> 规范, 此时是将摄像机镜头的位置放置到地面; relativeToGround 是将 <altitude> 高度解释为地面以上的以地面为基准的离地位置高度值, absolute 则将 <altitude> 高度解释为在海平面以上的以海平面为基准高度值。如代码 m_geApplicationSetCameraParams(43, 8, 125, 3, 800, 1, 1, 1 000, 90, 0, 0.5) 就是本系统中使用 SetCameraParams() 函数的方式。

3 解算与验证

飞行器的运动方程为非线性一阶微分方程组, 不能求得解的解析表达式, 一般通过离散变量法, 用数值积分算法得到数值解。欧拉法和龙格-库塔法均属于迭代求解方法, 其中, 欧拉方法计算速度快, 不足之处是精度低; 龙格库塔法计算精度较高, 但计算速度相对欧拉法慢。综合考虑系统运行的速度和仿真的精度, 兼顾计算精度和实时性, 确定应用较为成熟、精度亦较高的四阶龙格-库塔方法为解算方法。

将本系统中战机的性能曲线同作为参照的国内某型战机的飞行性能曲线进行对比。并从爬升和加两个方面的性能进行对比，如图 6 和图 7 所示。真实曲线与仿真曲线的误差较小，进而验证本文所建数学模型的真实性和科学性。

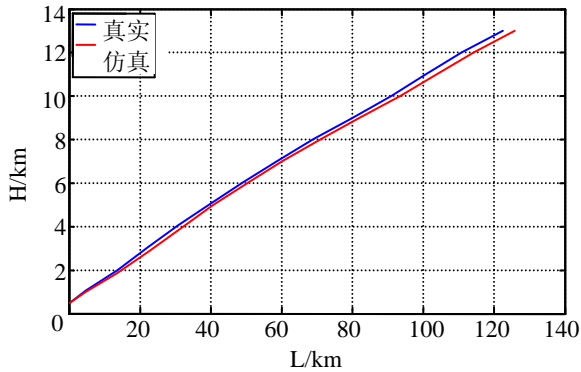


图 6 爬升高度与水平距离关系曲线

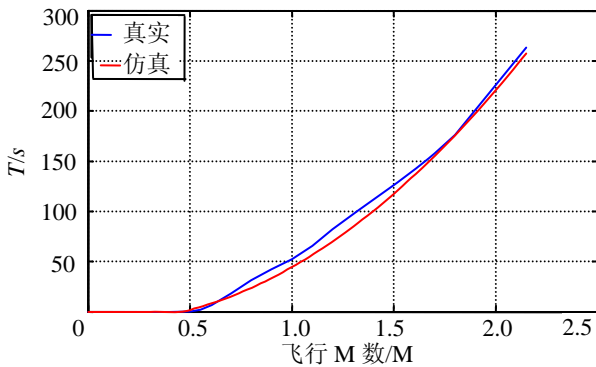


图 7 水平加速时间与飞行 M 数关系曲线

4 结论

介绍了一种通过数字地球二次开发能力设计实现六自由度飞行训练仿真系统，并主要研究了系统的可视化技术。本文建立了飞机的数学模型，并通过四阶龙格-库塔法进行了解算，还通过同真实飞行曲线对比，验证了所建数学模型的科学性；系统采用 B/S 结构，以 C++ 作为开发语言，提高了系统的通用性和可移植性。系统中的地景可通过在线

加载，或离线状态下加载缓存数据的方式得到；系统运用 SketchUp 建立了战机、导弹和高低速火焰等三维模型；通过 KML 文件和 API 两种方式结合对数字地球进行开发，实现了飞行训练过程中战机相关控制、多维视角下的观察、实时位姿显示等，基本完成了系统的人机交互功能。此系统还可用于六自由度飞行仿真、航迹研究、航迹监测等，能使飞行技战术训练在独立的个人计算机上完成，其便捷、高效的训练方式具有一定的实际意义^[9-10]。另外，数字地球的可拓展性为本系统进一步开发完善提高提供了无限的可能。

参考文献:

- [1] 江宽, 龚小鹏, 等. Google API 开发详解: Google Maps 与 Google Earth 双剑合璧(2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] 高彦丽, 刘建平, 贾云册. Google Earth 和 SketchUp 环境下三维场景建立方法研究[J]. 科技广场, 2012(5): 245-247.
- [3] 唐小桃, 陆元会. 基于 Google Earth 3D 原生 COM API 的二次开发[J]. 电脑编程技巧与维护, 2012(10): 85-89.
- [4] 欧阳溯, 洪陪钿. Google Earth KML 及在日本地震的应用初探[J]. 矿山测量, 2011(4): 40-43.
- [5] 吴肖, 彭璇, 高宇. 在 Google Earth 平台上的虚拟社区构建[J]. 地理空间信, 2010(4): 127-129.
- [6] 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(2): 59-62.
- [7] 刘磊, 仇菊香, 刘晓红. 基于 Google Earth API 的二次开发研究[J]. 测绘标准, 2011, 27(2): 17-19.
- [8] 王艳, 何凭宗. 基于 VC++ 的 Google Earth KML 地标文件的自动生成及应用[J]. 北京测绘, 2009(2): 32-34.
- [9] 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.
- [10] 刘杰. 基于 HLA 飞行仿真系统框架的构建[D]. 青岛: 山东大学, 2005. 4