

文章编号: 1672-8785(2017)10-0025-06

基于 Vega Prime 的光电经纬仪 CCD 图像仿真系统

杨 帅

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 针对靶场经纬仪设备操作手实战经验少、训练成本高的问题, 设计并实现了基于 Vega Prime 的光电经纬仪电荷耦合传感器 (Charge Coupled Device, CCD) 图像仿真系统。对任务弹道数据进行了分析, 建立了地心直角坐标系与仿真系统坐标系之间的转换关系, 获得了目标在仿真场景中的理论位置, 并通过解算得到了姿态数据。根据 CCD 传感器的光学系统参数, 计算了仿真图像的理论视场角。实践结果表明, 该仿真系统从目标仿真和视场仿真两方面渲染图像, 可确保目标的轨迹与姿态更符合真实任务的情况。对操作手进行了针对性训练, 使其熟悉了任务流程, 从而提高了训练效率。

关键词: Vega Prime ; 坐标转换; 图像仿真; 光电经纬仪

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.10.005

CCD Image Simulation System for Photoelectrical Theodolite Based on Vega Prime

YANG Shuai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: Since the operators of a certain photoelectric theodolite lack of actual operation experience and have high training cost, a Charge Coupled Device (CCD) image simulation system for the photoelectric theodolite based on Vega Prime is designed and realized. After analyzing the trajectory data of a mission, the conversion relationship between the geocentric coordinate and the simulation coordinate is established. The theoretical position of a target in the simulated scene is obtained. The attitude data of the target are calculated. The theoretical field-of-view angle of the simulated image is calculated according to the parameters of the optical system for the CCD sensor. The experimental results show that because the simulation system renders images both by target simulation and by field-of-view simulation, it can assure the trajectory and attitude of the target to be more consistent with the real mission. The operators of the photoelectric theodolite are trained. Their understanding of the operation flow is enhanced. The training efficiency is improved.

Key words: Vega Prime; coordinate conversion; imaging simulation; photoelectrical theodolite

收稿日期: 2017-04-29

作者简介: 杨帅 (1988-), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 主要从事光电经纬仪图像仿真方面的研究。

E-mail: yangshuai65535@163.com

0 引言

随着虚拟仿真的快速发展,图像仿真技术由于其场景模拟逼真、实现成本低的特点,在军事、医疗、影视等领域得到了广泛的应用^[1]。在靶场光测领域,光电经纬仪设备的造价成本高,布阵设备少,导致设备操作手的训练成本高,且实战操作机会少,在测量任务执行时压力较大。因此,针对光电经纬仪任务图像的特点,采用图像仿真的手段对操作手进行训练,可以有效提高其技术水平,降低训练成本。

以往的图像仿真系统更多地注重画面仿真,过分强调目标模型与特效渲染的逼真程度^[2]。而在目标的运动控制方面,轨迹数据直接基于画面的二维坐标系进行生成,忽略了空间目标运动的三维特性,导致仿真目标只是在图像中做平面运动,与现实场景中目标的运动方式不一致^[3]。另外在仿真图像的成像比例方面,现有系统往往忽略了传感器参数与光学系统参数对视场角度的决定性作用^[4],导致仿真图像比例失真,最终影响操作手的训练效果。

鉴于此,本文开发了基于三维仿真开发平台 Vega Prime 的光电经纬仪 CCD 图像仿真系统。通过加载任务弹道数据,仿真不同种类目标(包括弹、飞机、火箭等)的真实运动轨迹,并依据光学系统参数计算理论视场角、接收设备测角状态,随动调整仿真图像的视角,最大程度地模拟实际任务的场景。

1 关键技术

1.1 Vega Prime

Vega Prime 是由 Presages 公司发布的基于开源图形库(Open Graphics Library, OpenGL)的三维视景仿真平台^[5],搭配三维建模工具 Creator 和图形化配置工具 Lynx,能为用户提供方便快捷的仿真实现方案。相比其他仿真工具,Vega Prime 不但具备易用的图形化环境控制界面,而且提供了完整的 C++ 语言的应用程序编程接口(Application Programming Interface, API)、多种扩展库和选配模块,能够满足各个领域的仿真需求

^[6]。Vega Prime 简化了三维场景的仿真调用,使用者可更加专注于核心架构和控制逻辑的开发,极大地提高了编程效率。

1.2 目标位置的仿真

在经纬仪 CCD 图像仿真的过程中,仿真目标在模拟场景中的运动轨迹不仅是体现仿真效果的逼真程度^[7],更关系到对真实任务流程的模拟和还原,因而会直接影响以此仿真图像为基础的跟踪器调试与操作手训练。为保证仿真目标的位置与姿态数据在运动过程中的有效性,目标仿真模块选择真实任务中使用的理论弹道文件作为数据源,通过在弹道文件中建立空间坐标系数据与仿真场景坐标系数据的转换关系,得到仿真目标在虚拟场景中的理论位置的序列,并利用插值方法得到平滑的运动轨迹。

通常,外弹道测量任务中的理论弹道数据的形式为 84 坐标系(World Geodetic System 1984, WGS84)或 2000 坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000)。根据预先设定测量设备的大地坐标位置纬度 B 、经度 L 、高程 H ,可以计算每一时刻目标相对于测量设备的理论观测方位角、俯仰角和距离值,通过转换得到目标在仿真场景 Vega 坐标系中的坐标位置。上述过程中涉及到的坐标系转换的数学模型如下:

(1) 已知测量设备的大地坐标系位置,计算其点位在地心直角坐标系中的坐标^[8]:

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{aligned} \quad (1)$$

式中, B 、 L 、 H 为测量设备的大地纬度、大地经度、大地高程; X 、 Y 、 Z 为测量设备在地心直角坐标系中的坐标; N 为卯酉圈曲率半径, $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$; e 为当前坐标系下地球椭圆模型的第一偏心率, $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$ (a, b 为当前坐标系下地球椭圆模型的长短半径值)。

(2) 地心直角坐标系到局部测量坐标系的转换过程

不同三维空间直角坐标系之间的转换可以通过坐标系三轴的旋转和坐标系原点的空间平移来实现^[9]。若将空间直角坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标点 $P(X, Y, Z)$ 转换到坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中, 可以通过将 $O-XYZ$ 的 X 轴旋转 α 角来实现, 则 P 点在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中可以表示为

$$P'(X', Y', Z') = R_x(\alpha)P(X, Y, Z) \quad (2)$$

式中, 旋转矩阵公式 $R_X(\alpha)$ 为

$$R_X(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

同理, 旋转 Y 轴的旋转矩阵公式 $R_Y(\beta)$ 和旋转 Z 轴的旋转矩阵公式 $R_Z(\gamma)$ 分别为

$$R_Y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

和

$$R_Z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

如果两个坐标系原点之间的位置存在偏差, 偏差量用 $\Delta P(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 表示, 则两者之间的转换公式表示为

$$P'(X', Y', Z') = P(X, Y, Z) + \Delta P(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \quad (5)$$

综上, 任意两个空间直角坐标系的坐标转换矩阵为

$$P'(X', Y', Z') = R_X(\alpha)R_Y(\beta)R_Z(\gamma)P(X, Y, Z) + \Delta P(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \quad (6)$$

图 1 为地心直角坐标系向局部测量坐标系转换的示意图, 局部测量坐标系的坐标原点即为测量设备在地心直角坐标系中的坐标点。测站的大地经纬度分别用 L 和 B 表示, 依次将地心系 Y 轴旋转 90° , X 轴旋转角度 B , Z 轴

旋转角度 L , 平移原点偏差量 ΔO , 可以实现将地心直角坐标系中的坐标点向局部测量坐标系的转换。

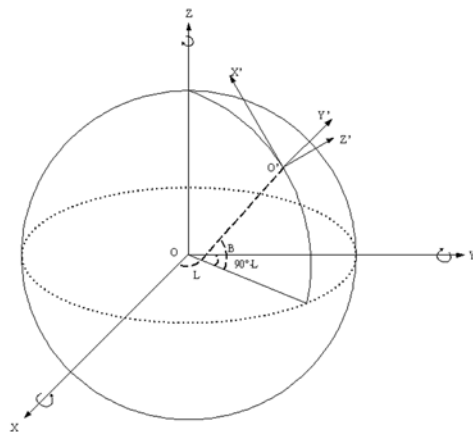


图 1 地心直角坐标系与局部测量坐标系的转换关系

因此, 地心直角坐标系下 P 坐标点转换为局部测量坐标系后得到的坐标结果 P' , 转换公式为

$$P'(X', Y', Z') = R_X(B)R_Y(90^\circ)R_Z(-(90^\circ - L)) (P(X, Y, Z) - \Delta O'(X, Y, Z)) \quad (7)$$

(3) 局部测量坐标系到仿真场景 Vega 坐标系的转换过程

根据具体任务情况的不同, 目标相对于当前测量设备的距离变化范围从 1 km 到几百千米不等。当要仿真的目标距离当前观察点超过 30 km 时, 由于 Vega Prime 渲染的限制, 对于超出这一边界的目标将不再进行渲染显示, 故无法满足整个任务段的仿真需求。为解决上述问题, 建立仿真场景 Vega 坐标系与局部测量坐标系的映射关系, 即坐标轴相重合。对于距离坐标系原点超过 30 km 的坐标点, 将其统一映射到渲染的临界值位置, 并通过缩放目标尺寸来达到图像上的透视效果。图 2 显示的就是局部测量坐标系与仿真场景 Vega 坐标系的转换关系的示意图。

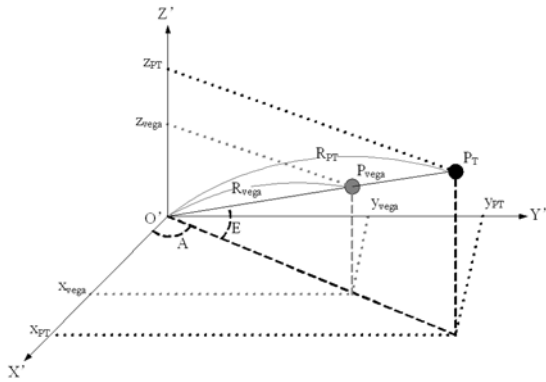


图 2 局部测量坐标系与仿真场景 Vega 坐标系的转换关系

图 2 中, $P_T(x_{PT}, y_{PT}, z_{PT})$ 表示待仿真的目标在局部测量坐标系中的坐标点位置, $P_{vega}(x_{vega}, y_{vega}, z_{vega})$ 表示其变换映射到仿真场景 Vega 坐标系中的坐标点位置, 其具体转换过程如下:

根据局部测量坐标系计算得到站心极坐标系, 公式为

$$\begin{aligned} R_{PT} &= \sqrt{x_{PT}^2 + y_{PT}^2 + z_{PT}^2} \\ A &= \arctan\left(\frac{y_{PT}}{x_{PT}}\right) \\ E &= \arctan\left(\frac{z_{PT}}{\sqrt{x_{PT}^2 + y_{PT}^2}}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

针对极坐标值的距离分量 R_{PT} 做临界值 R_{vega} 限制, 保持方位 A 和俯仰 E 分量不变, 并得到尺寸缩放系数 $c = \frac{R_{vega}}{R_{PT}}$ 。

根据缩放映射后的站心极坐标 $P_{vega}(R_{vega}, A, E)$ 计算得到最终仿真场景 Vega 坐标系的坐标值 $P_{vega}(x_{vega}, y_{vega}, z_{vega})$, 公式为

$$\begin{aligned} x_{vega} &= R_{vega} \cos E \cos A \\ Y_{vega} &= R_{vega} \cos E \sin A \\ z_{vega} &= R_{vega} \sin E \end{aligned} \quad (9)$$

1.3 目标姿态仿真

三维空间中的目标姿态主要包括偏航角和纵摇角。由于理论弹道文件中不包含目标姿态信息, 需要根据目标的轨迹运动方向来实时解算姿态数据。

$$\begin{aligned} H &= \arctan\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right) \\ P &= \arcsin\left(\frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, H 为偏航角, P 为纵摇角, Δx 、 Δy 、 Δz 分别为仿真目标运动序列在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴三个分量的位置变化。

1.4 图像视场仿真

视场仿真包括视场方向仿真与视场角度仿真。视场方向完全依赖于当前设备通讯发送来的测角状态数据, 即方位测角和俯仰测角。仿真图像根据实时更新的方位和俯仰, 动态地调整当前视场方向, 达到图像与经纬仪转动的随动效果。在视场角度仿真方面, 为确保仿真图像的目标成像比例与真实图像相一致, 在渲染图像之前, 仿真系统从配置文件中读入当前待仿真传感器的水平分辨率 HR 、高低分辨率 VR 、单像元尺寸以及镜头的焦距长度 f , 通过以下公式计算得到当前合理的仿真图像水平视场角度 $HFov$ 和高低视场角度 $VFov$ 。

$$\begin{aligned} HFov &= \frac{\mu \cdot HR}{f} \\ VFov &= \frac{\mu \cdot VR}{f} \end{aligned} \quad (11)$$

2 仿真系统的设计

仿真系统采用多线程技术进行开发, 主要包括数据处理线程、场景刷新线程以及数据通讯线程。仿真系统程序启动之后, 依次完成配置信息载入和 Vega Prime 环境初始化。加载场景文件 (.acf) 和目标模型文件 (.flt), 生成仿真 CCD 图像场景中的环境信息 (包括云层布局、地势环境、能见度和气候等) 和目标的模型。通讯线程负责接收外部测量数据, 包括绝对时间和当前测量设备的方位角度值和俯仰角度值, 并将这部分数据交由数据处理线程和场景刷新线程使用。数据处理线程对理论弹道数据进行坐标转换, 得到仿真目标的理论位置并解算得到姿态数据; 通过将仿真目标的理论位置和实测数据做差, 计算得到目标跟踪的脱靶量数据, 即设备跟踪偏差。场景刷新线程利用从数据处理线程得到的目标理论位置数据, 在仿真场景中渲染生成模拟目标; 同时, 利用从通讯线程得到的当前设备测量状态数据, 来调整仿真图像的视场方向。所有线程协同工作, 实现光电经纬仪的 CCD 图像仿真, 具体的工作流程如图 3 所示。

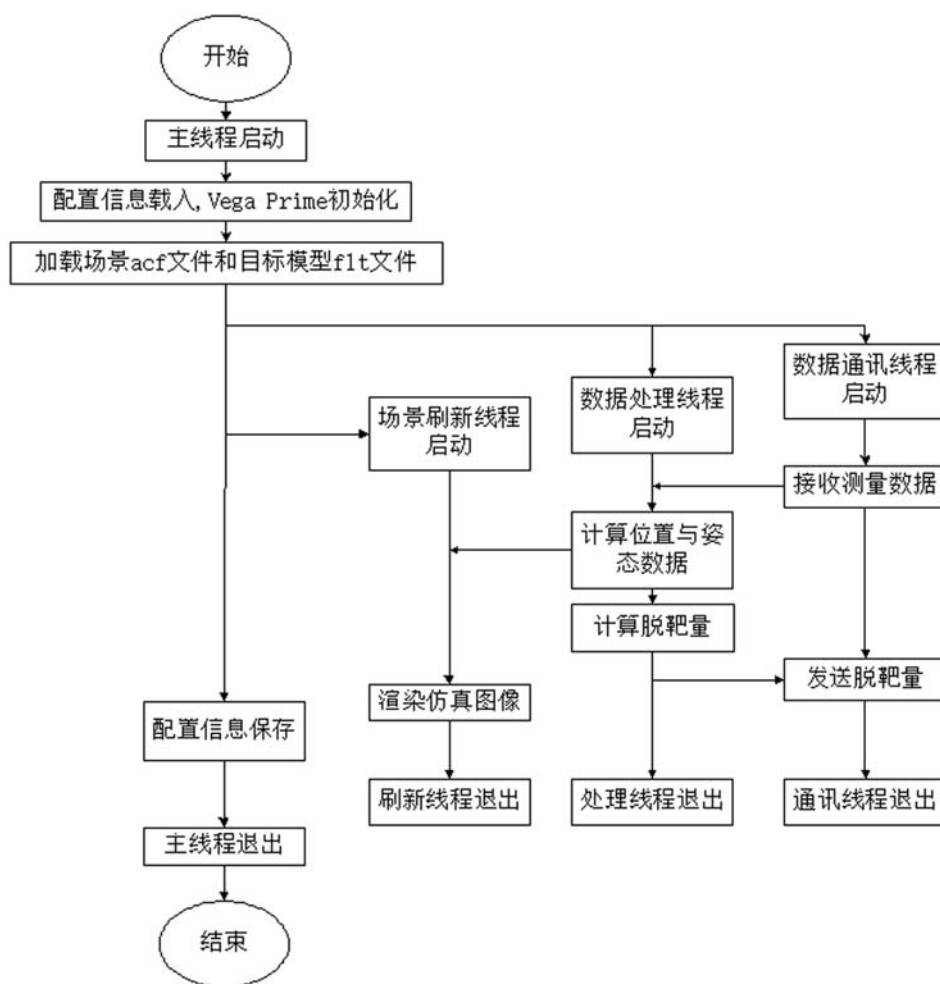


图 3 仿真系统的多线程工作流程图

3 仿真系统的实现

仿真系统采用 Visual Studio 2010 环境进行开发, 结合建模工具 MultiGen-Paradigm Creator3.2 和场景渲染平台 Vega Prime 2.2.1 对模拟场景进行渲染仿真。仿真系统作为独立的图像仿真单元, 其接口与光电经纬仪内部分系统的通讯接口保持一致, 在不影响其他设备正常工作的情况下, 可动态接入通讯网络并向操作手提供仿真图像。图 4 为不同能见度条件下不同观测角度的 CCD 仿真图像。

图 4 中仿真跟踪图像采用的 CCD 传感器模拟参数见表 1, 目标弹道为预设的正弦轨迹弹道, 目标与测站点的距离在 10~15 km 之间。从仿真结果上看, 目标的姿态变化符合弹道, 仿真成像合理。



图 4 不同观测角度的 CCD 仿真图像

表 1 模拟参数

模拟量	参数
焦距 /mm	2000
分辨率	1920×1080
CCD 单像元尺寸 /mm	0.005

操作手通过掰动控制台上的单杆来控制经纬仪的转动, 仿真系统实时接收到经纬仪当前的测角状态, 调整仿真场景的视场朝向, 达到随动效果。

4 结论

本文设计并实现了光电经纬仪的 CCD 图像仿真系统。从实际应用效果看, 仿真系统以真实的任务弹道作为仿真目标的数据源, 并依据光学系统参数确定仿真视场角。相比传统的图像仿真系统, 无论是目标的轨迹与姿态仿真, 还是图像的尺寸比例仿真, 该系统在仿真效果方面上都更加贴近任务的真实情况, 可帮助操作手在执行任务前充分熟悉流程, 提高了任务执行的成功率。下一步将对仿真图像的外送进行研究, 为目标提取功能提供图像源, 使测试图像更加多样化, 从而提高跟踪器的调试效率。这是后续工作的重点方向。

参考文献

- [1] 薛雪东, 徐兵, 洪光, 等. 基于 Creator/Vega Prime 的某导弹发射设备模拟训练系统 [J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(6): 307-310.
- [2] 徐恩, 李学军, 邹红霞, 等. 基于 Creator/VP 的三维虚拟环境建模 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(S1): 121-123.
- [3] 李正炜, 王建立, 王斌. 光电跟踪设备视景仿真系统设计 [J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(Z1): 181-183.
- [4] 于正林, 谭微, 姜涛. 基于视景仿真的光电经纬仪模拟训练器 [J]. 吉林大学学报 (工), 2011, 41(2): 509-513.
- [5] 王孝平, 董秀成, 郑海春, 等. Vega Prime 实时三维虚拟现实开发技术 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012.
- [6] 张乐, 韩佳盈, 张蛟. MFC 框架下的 Vega Prime 三维视景程序开发技术 [J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(3): 159-162.
- [7] 李亚臣, 胡健, 黎远忠, 等. 基于 Vega Prime 的航天器视景仿真中的多坐标系问题 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 575-578.
- [8] 李延兴, 张静华, 张俊青, 等. 一种由地心直角坐标到大地坐标的直接转换 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(4): 37-42.
- [9] 党亚民, 成英燕, 薛树强. 大地坐标系统及其应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- [9] 萧如珀, 杨信男. 1926 年 12 月 18 日: 刘易斯在给《自然》的信中造了“光子”一词 [J]. 现代物理知识, 2013, 24(6): 55-56.
- [10] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [11] Wikipedia. Optical Computing [DB/OL]. [2016-12-17]. https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_computing.
- [12] Wikipedia. Optical Communication [DB/OL]. [2016-12-17]. https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_communication.
- [13] Wikipedia. Light [DB/OL]. [2016-12-17]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Light>.
- [14] 犬石嘉雄, 滨川圭弘, 白藤纯嗣著. 张志杰, 郝小林, 雷京贵, 等译. 周绍康校. 半导体物理 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [1] 王忆锋, 黄江平. 试论光子的分裂 [J]. 红外, 2014, 35(2): 1-6.
- [2] 王忆锋. 论可分裂的光子模型 [J]. 云光技术, 2015, 47(2): 1-17.
- [3] 王忆锋. 关于可分裂的光子模型的进一步分析和探讨 (上) [J]. 红外, 2016, 37(11): 1-5.
- [4] 王忆锋. 关于可分裂的光子模型的进一步分析和探讨 (下) [J]. 红外, 2016, 37(12): 10-12.
- [5] 王忆锋. 论光子分裂视角下的宇宙观 [J]. 红外, 2017, 38(3): 1-5.
- [6] 王忆锋. 论超光速量子纠缠的不可能性 [J]. 云光技术, 2016, 48(2): 52.
- [7] 吴长锋. 非局域量子模拟器让信息以 1.9 倍光速传输 [N]. 科技日报, 2016-08-19(1).
- [8] 沈乃. 基本物理常数 1998 年国际推荐值 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2004.

(上接第 12 页)

参考文献