

12-12-2019

Design and Realization of UAV Inspection and Evaluation Simulation System

Xue Jiang

Education Training and Evaluation Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510520, China;

Junfeng Li

Education Training and Evaluation Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510520, China;

Wang Peng

Education Training and Evaluation Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510520, China;

Xiong Shan

Education Training and Evaluation Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510520, China;

See next page for additional authors

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.

Design and Realization of UAV Inspection and Evaluation Simulation System

Abstract

Abstract: Aiming at the large-scale application of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the power grid, *the simulation system of UAV is developed, including flight control module, visual simulation module and training evaluation module. The flight control module based on the flight dynamics, is a simulation platform of UAV combining physical remote controller and simulation of the formation. The visual module consists of two parts, modeling the topography of Guangdong Province and automatically modeling the transmission lines. The training evaluation module contains training system of tower acceptance, tree barrier survey, tower survey and evaluation system of winding flight, overtaking defect search.* The experimental results show that the system can effectively improve the training effect and increase the passing rate of AOPA certification.

Keywords

unmanned aerial vehicle, patrol line evaluation simulation system, flight control module, visual simulation module, training evaluation module

Authors

Xue Jiang, Junfeng Li, Wang Peng, Xiong Shan, and Weixia Feng

Recommended Citation

Xue Jiang, Li Junfeng, Wang Peng, Xiong Shan, Feng Weixia. Design and Realization of UAV Inspection and Evaluation Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1852-1859.

无人机巡线考评仿真系统设计与实现

薛江, 李军锋, 王鹏, 熊山, 冯伟夏

(广东电网有限责任公司 培训与评价中心, 广东 广州 510520)

摘要: 针对无人机在电网中大规模应用的现状, 开发了无人机巡线考评仿真系统, 包含飞控模块、视景仿真模块和培训考评模块。飞控模块是以飞行动力学为基础, 结合物理遥控器和仿真云台形成的无人机仿真操控平台; 视景仿真模块包括两部分, 一是对广东省地形地貌进行建模, 二是对全省输电线路进行自动建模。培训考评模块包含杆塔验收、树障勘查、杆塔勘查的培训系统和绕杆飞行、超视距缺陷查找的考评认证系统。实际应用表明, 该系统可以有效的提升机巡作业培训效果, 提高 AOPA 认证通过率。

关键词: 无人机; 巡线考评仿真系统; 飞控模块; 视景仿真模块; 培训考评模块

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 09-1852-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0309

Design and Realization of UAV Inspection and Evaluation Simulation System

Xue Jiang, Li Junfeng, Wang Peng, Xiong Shan, Feng Weixia

(Education Training and Evaluation Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510520, China)

Abstract: Aiming at the large-scale application of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the power grid, the simulation system of UAV is developed, including flight control module, visual simulation module and training evaluation module. The flight control module based on the flight dynamics, is a simulation platform of UAV combining physical remote controller and simulation of the formation. The visual module consists of two parts, modeling the topography of Guangdong Province and automatically modeling the transmission lines. The training evaluation module contains training system of tower acceptance, tree barrier survey, tower survey and evaluation system of winding flight, overtaking defect search. The experimental results show that the system can effectively improve the training effect and increase the passing rate of AOPA certification.

Keywords: unmanned aerial vehicle; patrol line evaluation simulation system; flight control module; visual simulation module; training evaluation module

引言

仿真培训系统是我国电网专业技术人员提高专业技能必不可少的现代工具^[1-2], 大量应用于变

电站仿真培训^[3]、输电线路带电作业仿真培训^[4]、电网调控仿真培训^[5]等。近年来电网中无人机巡线的规模不断扩大^[6], 导致无人机操控手培训需求急增, 而国内尚无专业的无人机仿真培训考评系统^[7]。在此背景下, 广东电网教育培训评价中心开展了无人机仿真培训与考评认证的研究。

电网中无人机主要运用于线路巡视、竣工验收、电力施工中的展放导线、自然灾害之后的灾情



收稿日期: 2017-06-30 修回日期: 2018-07-21;
基金项目: 中国南方电网公司重点科技项目 (K-GD2013-0248);

作者简介: 薛江(1986-), 男, 山西, 博士, 研究方向为图像识别、仿真培训系统开发; 李军锋(1979-), 男, 河南, 硕士, 高工, 研究方向为控制理论和控制工程。

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

• 1852 •

勘察、应急抢修以及故障清除等^[8]。目前广东电网无人机操控手在上岗前都要进行大量的实操培训, 并通过 AOPA(中国航空器拥有者及驾驶员协会)认证考试之后才能持证上岗。电网中现存的仿真培训系统主要针对业务逻辑和安全意识进行培训, 而无人机的培训既需要对机巡作业的业务逻辑和安全意识进行培训, 又需对无人机的操控技能进行培训。

目前无人机仿真系统主要用于对飞行模型和控制算法的验证, 未实现无人机实操培训, 缺乏实用性。无人机作业增长迅速, 传统的无人机实操培训存在受场地限制、成本高、效率低等问题。市面上主流的无人机操控模拟器包括国内的凤凰模拟器和国外的 RealFlight 模拟器^[9], 但都存在一定的缺陷。首先它们的培训场景采用全景摄像生成, 并没有进行真实的实景建模, 其次缺少电网业务培训和针对无人机考试的特殊培训。针对上述问题, 本文开发了无人机巡线考评仿真培训系统, 首先进行无人机的飞控模块的开发, 其次对广东全省地形地貌和输电线路建模, 最后结合 DL/T1482-2015《架空输电线路无人机巡检作业技术导则》和《广东电网有限责任公司架空输电线路多旋翼无人机作业技术导则(试行)》实现了杆塔验收、树障勘察、杆塔勘察的无人机巡线业务仿真及自动考评。

与国内外无人机仿真培训系统相比, 本系统主要有以下几方面的创新:

- 1) 实现包含遥控器输入和云台拍照的无人机飞控仿真系统, 逼真模拟了无人机的飞控操作;
- 2) 实现了覆盖范围广、数据精确的省级输电线路 3D 建模, 包括 1285 条、共计 28270 公里输电线路和 79732 个输电杆塔;
- 3) 实现了电网场景典型无人机巡线业务仿真培训, 包括杆塔验收、树障勘察、杆塔勘察等;
- 4) 实现了无人机自动考评, 根据《2016 年南方电网公司“创先杯”多旋翼无人机操作技能竞赛实施方案》结合 AOPA 考试规则, 设置了自动评分模块, 进行实时自动评分和错误提示。

本文研究成果已在广东电网有限责任公司培训中心投入运行, 并在江门局和惠州局进行了试点部署。下文将重点介绍无人机巡线考评仿真系统的系统架构、关键技术和应用情况。

1 系统总体设计

无人机巡线考评仿真系统包含飞控模块、视景仿真模块和培训考评模块, 如图 1 所示。其中, 培训考评模块分为两部分, 一是用于机巡作业人员日常训练的培训系统, 二是用于参加 AOPA 考前培训以及无人机竞赛前培训的考评认证系统。

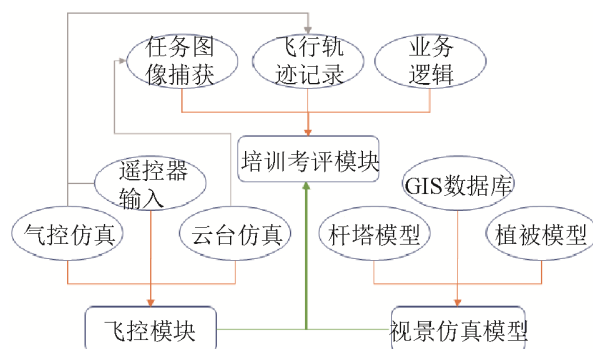


图 1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

1.1 飞控模块

飞控模块^[10-11]主要是根据遥控器的遥控指令(包括无人机自主控制和操纵杆控制的切换指令, 无人机油门和方向控制杆指令, 机载设备控制等指令), 经过飞控仿真算法^[12]计算出无人机的实时飞行参数(位置、速度、姿态)和云台参数(是否拍摄、对焦、方向)。

1.2 视景仿真模块

视景仿真模块^[13]是对整个广东省的地形地貌以及输电线路进行三维建模^[14]。在无人机仿真视景中, 主流的大规模绘制技术采用高清贴图等简单处理, 仅支持固定视角的三维体验。而本文采用多数据源的卫星影像图和数字高程模型图(DEM)进行全过程、多视角输电线路场景的三维模拟, 并支持数据交互, 设计了全新的视景实时仿真引擎。

1.3 培训考评模块

在飞控模块和视景仿真模块的基础上, 培训考评模块增加了无人机飞行轨迹的记录和云台拍照照片的记录。依据巡线和考评的业务逻辑, 对上述记录进行实时分析, 最终实现了杆塔验收、树障勘查、杆塔勘查、绕杆飞行、超视距缺陷查找等业务技术和操作技能的培训与考评。

2 关键技术的实现

2.1 四旋翼无人机飞行控制仿真

由于无人机在实际飞行中受到风力、地磁、重力和阻力变化等因素的影响, 故而建立精确的动力学模型十分困难^[15]。飞控模块是基于电力巡检中常见的四轴旋翼无人机设计而成, 其结构如图 2 所示, 无人机可绕 x 轴做横滚角运动, 绕 y 轴做俯仰角运动, 绕 z 轴做偏航运动。

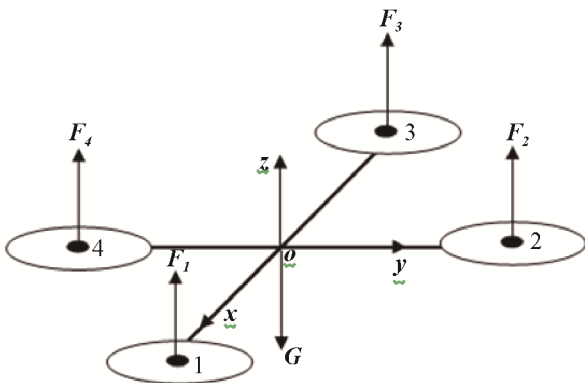


图 2 无人机结构图
Fig. 2 Structure diagram of UAV

定义 m 为无人机模型的质量, v 是无人机模型的线速度, F 为作用在无人机模型上的外力和, 定义 F_x, F_y, F_z 为 F 在飞行器坐标系上的 3 个坐标轴上的分量。

四旋翼无人机模型的运动分为线运动和角运动两种, 一般来说在计算线运动时采用地面坐标系, 在计算角运动时采用机体坐标系, 再将结果通过矩阵变换到地面坐标系。根据牛顿定律以及飞行动力学方程, 可整理如下向量形式:

$$[F \quad M]^T = [m\dot{V} \quad \dot{H}]^T$$

式中: M 为无人机模型所受外力力矩之和; H 为无人机模型相对于地面坐标系的绝对动量矩。

根据螺旋桨机械运动原理, 单个旋翼的升力可以表述为:

$$F = 1/2\rho C_t A R^2 \Omega^2$$

式中: ρ 为空气密度; C_t 为拉力系数; A 为桨盘面积; R 为螺旋桨半径; Ω 为转速。

为了简化计算, 在仿真中, ρ, C_t, A 和 R 均为常量, 因此螺旋桨产生的升力和阻力满足: $F_l = C_l \Omega_i^2; F_z = C_z \Omega_i^2$, 其中 C_l 为升力常量, C_z 为阻力常量。

根据牛顿第二定律及飞行器动力学方程可以得到简化的线加速度方程, 表述如下:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (\cos\psi \cos\phi \sin\theta + \sin\phi \sin\psi) F / m \\ \ddot{y} = (\cos\phi \sin\psi \sin\theta - \sin\phi \cos\psi) F / m \\ \ddot{z} = (\cos\phi \cos\theta) F / m - g \end{cases}$$

式中: ψ 为偏航角 $(-\pi, \pi)$; ϕ 为横滚角 $(0, \pi/2)$; θ 为俯仰角 $(0, \pi/2)$; g 为重力加速度。

根据欧拉角与无人机模型角速度之间关系, 以及角运动方程可得^[16]:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [IC_1(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) + \dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_z)] / I_x \\ [IC_1(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) + \dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x)] / I_y \\ [C_2(\Omega_3^2 + \Omega_1^2 - \Omega_4^2 - \Omega_2^2) + \dot{\phi}\dot{\theta}(I_x - I_y)] / I_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I_x, I_y, I_z 为 3 个轴向的转动惯量, l 为四旋翼无人机模型到螺旋桨中心的距离。

无人机仿真培训中主要通过控制遥控器的操作杆杆量来控制无人机仿真模型的飞行参数, 左杆上下为油门通道输入量 U_1 , 左杆左右为偏航通道输入量 U_2 , 右杆上下为俯仰通道输入量 U_3 , 右杆左右为横滚通道输入量 U_4 , 根据受力分析可得:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ F_1 - F_2 + F_3 - F_4 \\ F_3 - F_1 \\ F_4 - F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \\ C_2(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \\ C_1(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ C_1(\omega_4^2 - \omega_2^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

将控制输入变量 U_i 带入式(1)和式(2), 整理可得:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (\cos\psi \cos\phi \sin\theta + \sin\psi \sin\phi)U_1 / m \\ \ddot{y} = (\sin\psi \cos\phi \sin\theta - \cos\psi \cos\phi)U_1 / m \\ \ddot{z} = (\cos\phi \cos\theta)U_1 / m - g \\ \ddot{\phi} = [IU_4 + \dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_z)] / I_x \\ \ddot{\theta} = [IU_3 + \dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x)] / I_y \\ \ddot{\psi} = [C_2U_2 + \dot{\phi}\dot{\theta}(I_x - I_y)] / I_z \end{cases} \quad (3)$$

为了便于仿真运算, 采用类似于 LPV (Linear Parameter Varying)^[17] 的近似方法, 对式(3)的数学模型进行进一步的线性化。在无人机操控仿真演练的情况下, 可以认为无人机的线速率和角速率比较小, 因此姿态角的变化率也比较小, 从而可以得到简化线性模型:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (\cos\psi \cos\phi \sin\theta + \sin\psi \sin\phi)U_1 / m \\ \ddot{y} = (\sin\psi \cos\phi \sin\theta - \cos\psi \cos\phi)U_1 / m \\ \ddot{z} = (\cos\phi \cos\theta)U_1 / m - g \\ \ddot{\phi} = IU_4 / I_x \\ \ddot{\theta} = IU_3 / I_y \\ \ddot{\psi} = C_2U_2 / I_z \end{cases}$$

式中: 阻力常量 C_2 的变化可以模拟在不同风力等级下无人机的操控状态。实际仿真运算过程中, 具体参数的选取可以参照常用的培训用无人机型号及相关参数测量结果, 如表 1 所示。

表 1 无人机飞行仿真模型相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of UAV flight simulation model		
类别	大小	单位
m	0.8	kg
l	0.28	m
g	9.8	$m \cdot s^{-2}$
I_x	0.014	$kg \cdot m^2$
I_y	0.014	$kg \cdot m^2$
I_z	0.016	$kg \cdot m^2$
C_2	0.4-1.2	\

2.2 输电线路自动化建模

2.2.1 基于 GIS 信息的输电线路自动建模算法

视景仿真模块主要包括输电线路的建模^[14]和植被区域的建模^[18]。输电线路建模是指根据电网线路资产台账信息和已有的电力设备模型库中各种型号的铁塔模型, 通过设定一定的自动化建模规则, 将高精度的输电线路通道本体三维模型叠加到省级区域地形地貌模型中。本文提出了一种自动化建模算法来实现包括 1 285 条、共计 28 270 km 输电线路和 79 732 个输电杆塔的建模, 该算法包含以下关键判定流程:

1) 根据台账信息中的杆塔类型(耐张塔、转角塔、直线塔), 从模型库中选择相应的杆塔模型进行匹配, 塔的位置由台账信息中的经度(度、分、秒)、纬度(度、分、秒)确定, 摆放方向与该塔的进线和出线的角平分线一致。

2) 塔与塔之间的线路采用三角网格建立, 220 kV 采用的是二分裂模式, 500 kV 采用的是四分裂模式。线路轨迹的模拟分为静态模型和风偏模型^[19]。

静态模型中, 只受本身重力影响, 当两边悬挂点等高时, 输电线路满足:

$$\begin{cases} y = \frac{1}{u}(ch(ux) - 1) \Rightarrow y = \frac{L^2}{8H}(ch(\frac{8H}{L^2}x) - 1) \\ u \approx 8H / L^2 \end{cases}$$

式中: H 为悬链线弧垂, L 为悬链线的档距。

动态模型中, 要考虑风力引起的风偏角。如图 3 所示, 设导线风偏角 $\varphi = kv$, 其中 k 是固定系数,

v 是输入风力。导线在 X 轴、Y 轴、Z 轴的偏移量分别为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= f(x) \sin \varphi \sin \theta \\ \Delta y &= f(x) - f(x) \cos \varphi \\ \Delta z &= f(x) \sin \varphi \cos \theta \end{aligned}$$

式中: $f(x) = H - \frac{L^2}{8H} (ch(\frac{8H}{L^2}x) - 1)$, θ 为直线 AB 在 XZ 平面的投影与 X 轴的夹角。

对相邻杆塔的线路采用一次轨迹模拟会导致弧垂过大而失真,因此,本文采用分段模拟的方法。首先将相邻杆塔等分为 M 段(经测试,单段长度不超过 3 m 效果较好),再对每一段单独进行导线轨迹的模拟。最终完成输电线路的整体建模。

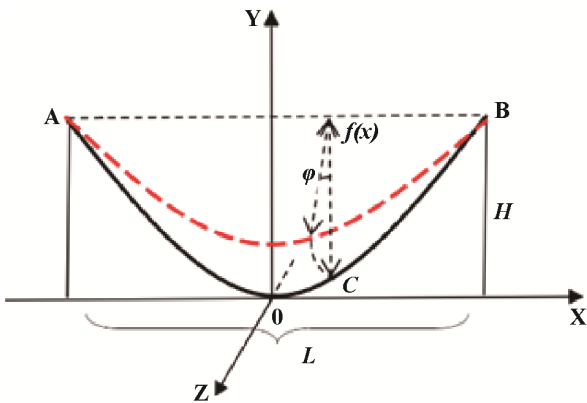


图 3 输电线路动态模型
Fig. 3 Dynamic model of transmission line

2.2.2 基于种子点蔓延的植被自动分割算法

视景仿真模块中,植被建模需要从卫星影像中分割出对应的植被区域,再使用预先建好的植被模型在区域内自动建模。本文采用基于种子点蔓延的植被自动分割算法^[20],首先选取严格种子点,再通过一定的蔓延准则算法进行蔓延,最终在图像中分割出植被区域,整个流程如图 4 所示。

(1) 初始种子点的选择

设 E 为植被像素集合, $A = \{A_1, A_1, \dots, A_m\}$ 为输入图像中 m 块不相交的植被区域, $R = \{(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)\}$ 为初始种子点集合,则理想的 R 应满足:

1) $R \subset E$, 即初始种子点必为植被点,以保证蔓延时植被区域识别的正确性;

2) $\forall A_i \in A, \exists r(x_j, y_j) \in R$ 满足 $r \in A_i$, 即图像中每一个植被区域中至少有一个植被点被选中。

本文首先建立了卫星影像中典型植被的(R, G, B)样本库,在初始种子点选取上采用遍历图像并严格比对的方法,只有图像中像素点的(R, G, B)值与样本库中的值完全一致时,才选为初始种子点,并形成初始种子点集合以及初始种子点图像。

(2) 种子点蔓延算法

在设计蔓延算法时要考虑三个问题:一是起始点,二是终止点,三是蔓延准则。本文首先将图像转换为灰度图像,采用初始种子点的灰度值的算术平均数作为起始点,使用最大类间方差法得到的阈值作为终止点,遍历它们间的每一个阈值得到序列图像,采用像素点的连通性作为蔓延准则,最终得到植被分割图像。

整个算法采用两次扫描实现,一次为正向扫描,一次为反向扫描。正向扫描过程中,判断当前种子点图像中每一个点的右邻接点、下邻接点在序列图像中是否为前景,若是则将该前景点加入种子点。反向扫描则判定当前种子点的左邻接点、上邻接点。扫描之后,更新种子点图像。最终得到完整的植被分割结果。

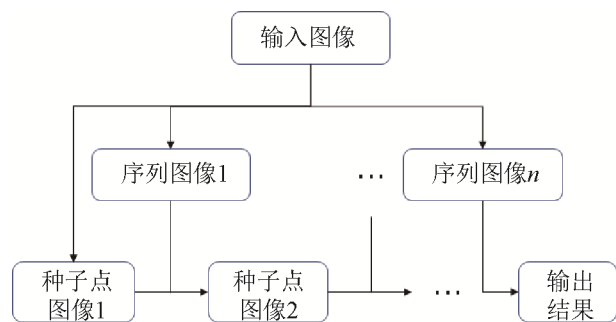


图 4 植被分割算法流程图
Fig. 4 Vegetation segmentation algorithm diagram

2.3 无人机考试及自动评判模块设计

无人机考试及自动评判包括了两个科目,科目一是绕杆飞行,科目二是超视距缺陷查找。绕杆飞行是 AOPA 考试的实操科目,而超视距缺陷查找是电网无人机巡线业务的核心,它们同时也是广东

电网无人机竞赛的两个科目。系统内置了自动评分功能, 可以根据考生的飞行路径和拍照结果进行实时的自动评判和错误提示。其中, 科目一为绕杆飞行, 满分 100 分, 通过记录无人机飞行轨迹, 主要的扣分点包括: 撞杆扣 100 分、飞行中轨迹偏离太远扣 10 分、绕杆中每错误绕杆一次扣 10 分。而科目二为超视距缺陷查找, 共 5 类随机缺陷(塔材缺失、均压环放电、绝缘子串放电、防震锤安装出错、绝缘子暴烈), 撞塔扣 100 分、不按作业航道飞行扣 10 分、缺陷查找过程每漏找一个缺陷扣 10 分、飞行距离输电铁塔或导线太近每次扣 10 分。

3 实验

3.1 无人机飞控仿真验证

为了验证无人机飞控仿真的准确性, 对仿真系统和真实无人机的各个操控通道进行了实验对比。每个通道都取最大杆量持续 3 s 后记录位移(单位为 m), 左转和右转是记录机头旋转角度(单位为 $^{\circ}$), 取 3 次操作的平均值记录, 结果如表 2 所示。其中上升通道中真机包含两个数值是由于真机在从地面上升 3 s 和从空中上升 3 s 飞行距离存在一定差异, 分别为 13 m 和 17 m。

表 2 仿真系统与真实无人机实验对比

类别	上升	下降	左转	右转	前进	后退	左移	右移
仿真	17.9	12.8	319	315	26.9	27.2	23.0	21.5
真机	17.0 13.0	13.5	365	371	24.8	33.2	24.0	21.3

通过实验发现, 在各个通道仿真系统都和真机表现基本一致, 但部分通道也存在一定差异。其中上升通道中, 由于真机在起飞时多了支撑架的收起操作, 导致在地面起飞时 3 s 的平均上升高度为 13 m, 但在起飞后从空中上升 3 s 的飞行距离和仿真系统的飞行距离一致。在前进和后退通道, 由于真实无人机受风速影响, 导致和仿真无人机的飞行距离有所偏差。在左转和右转上仿真

系统同样和真机存在一定偏差, 这是由于真实无人机存在转动惯性, 而仿真系统中没有考虑这一因素。从整体来看, 飞控仿真虽然存在着一定偏差, 但基本上实现了对真实无人机的近似模拟。

3.2 无人机仿真培训系统验证

为了验证无人机巡线考评仿真培训系统的有效性, 本文分别选择了 3 组成员进行无人机飞控考试, 第 1 组 3 人既无真机操控经验也无仿真系统培训经历, 第 2 组 3 人没有真机操控经验但经过仿真系统培训, 第 3 组是广东电网 2016 年无人机竞赛前十名中的 3 人, 但都未使用过仿真系统。每人对仿真系统中科目一和科目二分别进行 3 次考试, 取平均值, 得到的考试分数结果如表 3 所示。

表 3 仿真系统考评实验对比

科目	第一组	第二组	第三组
一	37	72	88
二	41	81	84

通过对比第 1 组和第 3 组的实验结果发现, 在均未经过仿真系统培训的情况下, 对真机操控熟练的人考评分数远远高于无任何操控经验的人, 一方面验证了仿真系统飞控模块逼真模拟了真机及场景, 另一方面验证了仿真系统考评模块的有效性。

通过对 3 组成绩对比分析发现, 第 2 组成绩明显高于第 1 组, 但稍低于第 3 组, 一方面验证了仿真系统培训的有效性, 另一方面表明通过仿真系统培训的员工可以达到合格以上水平, 但难以完全达到经过大量真机实训操控熟练的员工的水平。

综上所述, 仿真培训系统是真机实训的有效补充, 而不是完全替代。

4 结论

无人机巡线考评仿真系统实现了电网场景中的无人机巡线业务培训和考评认证, 提高了无人机的培训效率, 扩大了无人机在电网中的使用规模,

为广东电网“机器人”战略的推进打下了坚实的基础。与传统的无人机仿真系统相比,真实的电网场景建模提供了逼真的业务培训环境,自动化的考评系统有效的解决了传统培训成本高、效率低的问题。

无人机巡线考评仿真系统虽然明显优于传统培训仿真系统,但仍存在一定不足。如仿真场景是基于平面显示器进行显示,缺失深度信息,沉浸感不足,如何结合VR头盔等立体显示设备将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] Huang Y, Wang Y S, Li X P. System of simulation training for unmanned aircraft[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine (S0885-8985), 1998, 13(12): 11-13.
- [2] Song K, Xu H, Ding Y, et al. A target tracking realization method of UAV simulation training system[C]. 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). Phuket, Thailand: IEEE, 2016: 1-4.
- [3] 陈永波, 林昌年, 李军锋, 等. 沉浸式变电站仿真培训系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2034-2039.
Chen Yongbo, Lin Changnian, Li Junfeng, et al. Research and Development of Immersive Simulation Training System[J]. Power System Technology (S1000-3673), 2015, 39(7): 2034-2039.
- [4] Nouri B, Nakhla M S, Achar R. Efficient Simulation of Nonlinear Transmission Lines via Model-Order Reduction[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (S0018-9480), 2017, 65(3): 673-683.
- [5] 刘健, 谢旭, 牛四清, 等. 电网调控仿真培训系统设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 127-131.
Liu Jian, Xue Xie, Niu Siqing, et al. Design and Development of Dispatcher Training Simulator for Integrated Dispatching and Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 127-131.
- [6] 彭向阳, 钱金菊, 麦晓明, 等. 大型无人直升机电力线路全自动巡检技术及应用[J]. 南方电网技术, 2016, 10(2): 24-31, 76.
Peng Xiangyang, Qian Jinju, Mai Xiaoming, et al. Automatic Power Line Inspection Technology of Large Unmanned Helicopter and Its Application[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(2): 24-31, 76.
- [7] Shen X Y, Ding W R, Wei Z M, et al. Design of software for UAV Ground Control System based on VC++[C]. 2009 Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics (PrimeAsia). Shanghai, China: IEEE, 2009: 440-443.
- [8] 刘国嵩, 贾继强. 无人机在电力系统中的应用及发展方向[J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(1): 53-56.
Liu Guosong, Jia Jiqiang. UAV applications and development in the power system[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(1): 53-56.
- [9] 星辰. 航模电行的好帮手——遥控飞行模拟器(21)[J]. 航空模型, 2010(1): 56-58.
Xing Chen. A Good Helper of Model Electric —— Realfight R/C Glight Simulator[J]. Model Airplane, 2010(1): 56-58.
- [10] Santoso F, Garratt M A, Anavati S G. State-of-the-Art Intelligent Flight Control Systems in Unmanned Aerial Vehicles[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (S1545-5955), 2017, 15(2): 1-15.
- [11] 闫亚宾, 曾建平. 一种飞控系统不确定性建模方法及其鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(5): 580-584.
Yan Yabin, Zeng Jianping. Uncertainty modeling and robust stabilization for large envelope flight control systems[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(5): 580-584.
- [12] Yongliang W, Ying L, Jianmin L, et al. Proprioceptive Simulation Algorithm and Simulation Research in Flight Simulator[C]. 2013 International Conference on Computational and Information Sciences. Shiyang, China: IEEE, 2013: 1044-1047.
- [13] Wei S G, Liu X Y, Guo H Q, et al. Research on interactive visual simulation for Cooperative Vehicle Infrastructure System[C]. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao, China: IEEE, 2016: 1023-1028.
- [14] Coates A, Sasse H G, Coleby D E, et al. Validation of a Three-Dimensional Transmission Line Matrix (TLM) Model Implementation of a Mode-Stirred Reverberation Chamber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (S0018-9375), 2007, 49(4): 734-744.
- [15] 江杰, 冯旭光, 苏建彬. 四旋翼无人机仿真控制系统设计[J]. 电光与控制, 2015, 22(2): 27-30.
Jiang Jie, Feng Xuguang, Su Jianbin. Design of a Quad-Rotor UAV Simulation Control System[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 27-30.
- [16] Alaimo A, Artale V, Milazzo C, et al. Mathematical modeling and control of a hexacopter[C]. 2013

- International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Atlanta, USA: IEEE, 2013: 1043-1050.
- [17] Hoffmann C, Werner H. A Survey of Linear Parameter-Varying Control Applications Validated by Experiments or High-Fidelity Simulations[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2015, 23(2): 416-433.
- [18] Peña-Barragán J M, Ngugi M K, Plant R E, et al. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology[J]. Remote Sensing of Environment (S0034-4257), 2011, 115(6): 1301-1316.
- [19] Brancik L, Prokes A, Kolarova E. Simulation of random effects in transmission line models via stochastic differential equations[C]. 2012 2nd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA). Beirut, Lebanon: IEEE, 2012: 306-310.
- [20] 薛江, 王知衍. 序列图像种子蔓延肤色识别算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(11): 2094-2099.
- Xue Jiang, Wang Zhiyan. Skin Color Detection With Spread Seed in Sequence of Frames Based on Local Information Consistency[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic, 2015, 27(11): 2094-2099.