

1-3-2019

Evaluation on Pilot Performance of Detecting Runway Incursion Based on Visual Simulation

Kun Yang

Civil Aircraft Airworthiness Certification Technology and Management Research Center, Tianjin 300300, China;

Xiangyu Ge

Civil Aircraft Airworthiness Certification Technology and Management Research Center, Tianjin 300300, China;

Pengfei Ju

Civil Aircraft Airworthiness Certification Technology and Management Research Center, Tianjin 300300, China;

Bai Jie

Civil Aircraft Airworthiness Certification Technology and Management Research Center, Tianjin 300300, 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.

Evaluation on Pilot Performance of Detecting Runway Incursion Based on Visual Simulation

Abstract

Abstract: In order to evaluate the performance of pilots using HUD and PFD to detect runway incursion under approach and landing circumstances, *a visual simulation system for transport category airplanes is designed by visual simulation technology*. The system includes models of head up display (HUD), primary flight display (PFD), cockpit of transport category airplanes, 3-D terrain of airport. And a program is written to read flight joystick data to control flight. On this visual simulation system, *performance experiment of pilots using HUD and PFD to detect runway incursion is carried out*. Analysis results show that the response time of pilots using HUD to detect runway incursion lags 5.06s and miss rate outnumbers 13 percent compared with PFD. On attention allocation, pilots paid much attention to area of interest: heading and pitch-horizon detector-outside window with using HUD; when using PFD, attention is allocated to area of interest: pitch- horizon detector and outside the window.

Keywords

transport category airplanes, visual simulation, runway incursion, performance evaluation

Recommended Citation

Yang Kun, Ge Xiangyu, Ju Pengfei, Bai Jie. Evaluation on Pilot Performance of Detecting Runway Incursion Based on Visual Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1967-1973.

基于视景仿真的飞行员探测跑道入侵的绩效评估

杨坤, 葛祥雨, 鞠鹏飞, 白杰

(民用航空器适航审定技术与管理研究中心, 天津 300300)

摘要: 为评估进近着陆情景下飞行员分别使用平视显示器(HUD)和主飞行显示器(PFD)探测跑道入侵的绩效, 利用视景仿真技术搭建了运输类飞机视景仿真系统, 并基于该系统, 完成了进近着陆情景下飞行员分别使用HUD和PFD探测跑道入侵的绩效实验。系统包括HUD、PFD、运输类飞机驾驶舱和机场三维地形等模型的开发和飞行场景的制作及USB飞行操纵杆操控数据读取。实验分析结果表明: 进近着陆情景下, 与使用PFD相比, 飞行员使用HUD探测跑道入侵的反应时间慢5.06s, 遗失率高13%; 飞行员注意力分配上, 使用HUD时, 飞行员的注意力主要集中于俯仰-地平仪-窗外视景和航向兴趣域; 使用PFD时, 被试的注意力主要集中于俯仰姿态-地平仪和窗外场景兴趣域。

关键词: 运输类飞机; 视景仿真; 跑道入侵; 绩效评估

中图分类号: V328

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)05-1967-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805044

Evaluation on Pilot Performance of Detecting Runway Incursion Based on Visual Simulation

Yang Kun, Ge Xiangyu, Ju Pengfei, Bai Jie

(Civil Aircraft Airworthiness Certification Technology and Management Research Center, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to evaluate the performance of pilots using HUD and PFD to detect runway incursion under approach and landing circumstances, a visual simulation system for transport category airplanes is designed by visual simulation technology. The system includes models of head up display (HUD), primary flight display (PFD), cockpit of transport category airplanes, 3-D terrain of airport. And a program is written to read flight joystick data to control flight. On this visual simulation system, performance experiment of pilots using HUD and PFD to detect runway incursion is carried out. Analysis results show that the response time of pilots using HUD to detect runway incursion lags 5.06s and miss rate outnumbers 13 percent compared with PFD. On attention allocation, pilots paid much attention to area of interest: heading and pitch-horizon detector-outside window with using HUD; when using PFD, attention is allocated to area of interest: pitch- horizon detector and outside the window.

Keywords: transport category airplanes; visual simulation; runway incursion; performance evaluation

引言

飞行中飞行员需要随时掌握飞机的高度、速



收稿日期: 2016-07-05 修回日期: 2016-10-21;
基金项目: 民用飞机专项科研项目(MJ-2014-J-73);
作者简介: 杨坤(1980-), 女, 天津, 硕士, 副教授, 研究方向为航空人为因素; 葛祥雨(1990-), 男, 山东临沂, 博士生, 研究方向为航空人为因素; 鞠鹏飞(1987-), 男, 山东东营, 博士, 讲师, 研究方向为航空人为因素。

度、姿态和航向等信息。在平视显示器(HUD)出现之前, 这些信息是通过安装在仪表板上的主飞行显示器(PFD)来显示的, 需飞行员保持低头姿势监视。HUD 则通过新型的投影技术将飞行信息显示在飞行员正前方的透明显示器上, 使飞行员以平视的姿势观察外部视界的同时读取飞行信息。中国民航HUD应用路线图指出, 2016-2018年航空运营人在

订购新飞机时考虑安装双套 HUD 设备。2018 年底以前, 航空运营人在 50% 的飞机上加改装双套 HUD^[1]。尽管 HUD 能够降低飞行员负荷、延长持续观察时间和增加飞行精度, 但引入注意力资源分配不均、检测失效/故障的效率降低^[2-3]及情景意识丧失^[4]等问题。

绩效表示特定时间内的可描述的工作行为和可测量的工作结果。民航飞行员的绩效研究大多在较为稳定的巡航阶段开展, 对飞行员识别处理突发事件(空中发动机停车、发动机失火、鸟击和跑道入侵等)的绩效的研究相对较少, Wickens 等利用实验和元分析方法分析了 HUD 和 PFD 对飞行员探测跑道入侵的影响。国际民用航空组织将在机场中发生的任何涉及错误的出现在用于飞机起飞和降落保护区表面的飞机, 车辆以及行人的事件定义为跑道入侵, 其严重威胁起降航班和机场的安全, 影响机场运营。据美国联邦航空管理局(FAA)统计, 2016 年 1 月 1 日~8 月 24 日全美运输类飞机发生 1331 起跑道入侵事件^[5]。Prinzel 等研究指出飞行员不合理的注意力分配会导致跑道入侵、坠机等航空事故^[6]。

在我国运输类飞机上大规模应用 HUD 和跑道入侵事件频繁发生的背景下, 飞行员利用 HUD 能否有效识别和规避跑道入侵事件值得进一步研究。

在真实的环境下开展飞行员使用 HUD 探测跑道入侵的实验, 成本高, 实施较为困难。借助视景仿真技术搭建模拟实验环境可解决这一问题。航空领域, 国内利用视景仿真技术进行军机驾驶舱布局及视景的研究^[7-8], 而在民用运输类飞机的应用相对较少, 且国内大多利用成熟的商用视景仿真系统进行驾驶舱布局等方面的研究, 而商用系统成本过高。国外视景仿真技术应用于民航运输类飞机研究较为成熟, 如商用 Microsoft Flight Simulator, 但对硬件要求高, 源码未开放无法进行二次开发。

HUD 与 PFD 的安装位置和显示信息等方面存在差异, 导致飞行员使用两种显示器时注意力分配存在差别, 使得飞行员使用两种显示器探测跑道入侵事件的绩效存在差异。

针对上述问题, 本文基于 Vega Prime 搭建运输类飞机视景仿真系统。基于该系统, 开展进近着陆情景下飞行员分别使用 HUD 和 PFD 探测跑道入侵的实验, 以评估飞行员探测跑道入侵的绩效。

1 运输类飞机视景仿真系统

为开展进近着陆情景下飞行员分别使用 HUD 和 PFD 探测跑道入侵的绩效的研究, 对运输类飞机视景仿真系统的设计提出如下要求: ①能够逼真模拟驾驶舱、机场、地形等环境; ②可提供 HUD 和 PFD 显示系统; ③可使用外部 USB 飞行摇杆控制飞行; ④可呈现跑道入侵场景; ⑤系统运行流畅, 可进行二次开发, 硬件要求低。

该仿真系统达到的目标: 在机场及周边地形所包围的空间中, 操纵者在屏幕上以“飞行员视角”观察舱外视景并读取 HUD 或 PFD 显示的实时飞行姿态数据, 同时操控 USB 飞行操纵杆, 完成模拟飞行。在此系统基础上拟开展研究中, 使用眼动仪采集被试眼动数据, 以评估飞行员飞行过程中分别使用 HUD 和 PFD 的绩效。

利用视景仿真技术, 制作 HUD/PFD 模型、三维模拟驾驶舱模型和三维机场地形图, 通过编程读取 USB 飞行操纵杆数据并控制系统运行, 最后将上述模型和数据通过 Vega Prime 集成到仿真系统, 该系统结构如图 1 所示。

该系统设计按照功能构成划分为 4 个模块: 显示系统模块、视景模块、摇杆数据采集模块和系统集成模块。图 1 中蓝色代表显示功能模块, 黄色代表遥感数据采集模块, 绿色代表视景功能模块, 红色虚线代表系统集成模块。显示系统模块由 HUD 和 PFD 显示系统构成, 利用 GL Studio 进行开发, 使用 C++编程将显示系统的.gls 文件编译转换成动态链接库。在视景模块中利用 Multigen Creator 制作三维驾驶舱模型和三维机场地形图的, 但两者运用的开发方式不同, 前者进行静态实体建模, 而后者进行地形建模。摇杆数据采集模块利用 DirectInput 接口^[9]读取外部 USB 飞行操纵杆数据, 并将该数据

传递给 HUD/PFD 定义的变量, 实现显示系统的实时显示飞行数据的功能, 并控制驾驶舱模型的运动。

系统集成模块利用 Vega Prime 将上述模块生成的 HUD、PFD、飞机驾驶舱模型、机场地形图和 USB 飞行操纵杆集成并进行飞行姿态信息、驾驶舱位置、转换及观察者等参数配置, 并基于 MFC 对话框编程控制系统的运行^[10-11]。

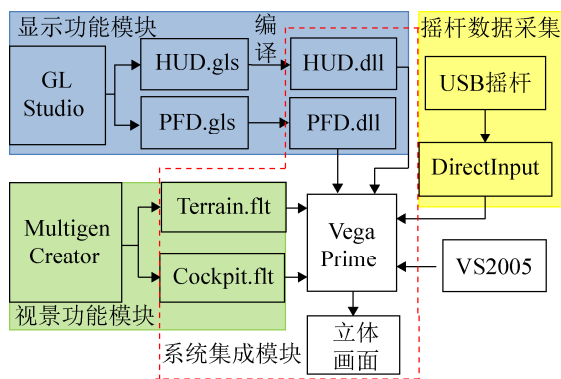


图 1 运输类飞机视景仿真系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of visual simulation system of transport category airplanes

1.1 显示系统开发

HUD 主要由空速刻度带、高度刻度带、航向刻度带、横滚刻度带和俯仰-地平仪等构成^[12]。

HUD 的开发, 首先依据某型 HUD 的构成和布局, 使用 GL Studio 软件绘制 HUD 静态模型; 其次根据各构成元素的性质配置编程接口中特定的变量, 以定义指示量随飞行参数的实时变化规律; 最后使用 VS2005 将 GL Studio 生成的 .gls 文件编译为 .dll 文件^[13]。

PFD 构成与 HUD 的基本相同, 主要在图形布局 and 运动方式上存在差别。使用 GL Studio 按照制作 HUD 的步骤制作 PFD, 对各图形和变量的属性修改, 调整航向刻度带和横滚刻度带的控制语句, 生成 PFD 静态模型。

1.2 飞机驾驶舱模型与地形图的制作

驾驶舱模型主要由仪表盘、风挡、座椅、脚踏及油门杆等组成。飞机驾驶舱三维模型的制作, 利用 Multigen Creator 软件读入驾驶舱位图, 以便精

确的刻画驾驶舱模型的边线, 保持模型几何尺寸的精确比例, 使模型更加逼真; 利用几何体工具箱对位图中的仪表盘、控制面板、方向舵、操纵杆和座椅等进行拉伸调整; 调整完成后, 使用多细节层次 LOD (Levels of Detail) 技术优化模型数据库^[14-15], 提高系统运行效率; 最后映射材质纹理, 提高三维集合物体表面的真实感效果。

三维地形图为驾驶舱显示系统仿真系统提供外部视景, 其逼真程度影响仿真系统运行效果。地形图的制作基于地理空间数据云下载的包含经纬度、地形高度、坡度和坡向等地形数据信息的 DEM (数字地貌模型) 格式的某地区数字高程卫星图像, 使用 Multigen Creator 将 DEM 格式地形数据转换为 ded 格式数据^[16], 并配置与地形相关的色彩、材质和纹理等文件, 生成 .flt 格式的地形数据库^[17-19]。

1.3 系统集成

使用 Vega Prime 进行系统集成时, 主要进行创建场景, 添加操作对象, 创建运动模式, 建立转换和设置通道等工作。创建场景是添加制作的机场三维地形图作为系统运行的外部视景。添加场景相对简单, 在 Vega Prime 的 myScene 模块添加对象 object, 配置对象的路径和名称即可^[20]。该系统中需要添加飞机驾驶舱、HUD 和 PFD 三个对象, 作为系统的控制或观察对象。完成 Vega Prime 实例配置, 基于 MFC^[21]对话框编程控制系统运行。为实现手动操控飞行, 引入了 USB 飞行操纵杆, 通过 C++ 编程使用 DirectInput 接口, 以轮询的方式读取摇杆数据^[22-23]。

1.4 跑道入侵场景搭建

搭建跑道入侵场景的难点在于同一场景下控制两架飞机的运动, 一架进近着陆, 另一架滑行通过跑道接地端, 如图 2 所示。

入侵飞机的运动通过 Vega Prime 中的 Pathing 和导航器 Navigator^[24]控制。按照设计的入侵路径, 完成路径点的插入, 调整路径点在地形中位置和姿态; 在导航器中设置导航器类型和加速度等参数,

完成设置将该路径应用于入侵飞机。

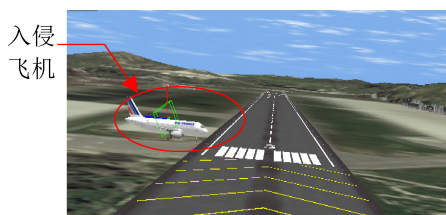


图2 跑道入侵场景

Fig. 2 Runway incursion scenario

2 探测跑道入侵实验

2.1 实验方法

该实验采用控制变量法,不同显示设备(HUD与PFD)和不同进近着陆场景(正常情景和跑道入侵)都会影响飞行员的绩效。故设计实验内容时,控制单一变量进行实验,分析每种影响因素对实验结果的影响。实验自变量:①PFD/HUD,②正常进近着陆/跑道入侵进近着陆。因变量:①被试探测跑道入侵的反应时间RT及遗失率MR,②被试的注意力分配,即不同兴趣域触发的眼动注视点数。

2.2 实验设计与内容

为探讨PFD/HUD对进近着陆阶段飞行员探测跑道入侵的绩效的影响,共设计4组实验,实验内容如表1所示。

表1 实验内容
Tab. 1 Experiment content

实验	跑道入侵	显示仪表	飞行阶段
一	否	PFD	手动进近着陆
二	有	PFD	手动进近着陆
三	否	HUD	手动进近着陆
四	有	HUD	手动进近着陆

实验一、三组作为对照试验,分别使用PFD和HUD,不发生跑道入侵,以分析不同飞行显示器对正常进近着陆时飞行员的绩效的影响;实验二、四分别使用PFD和HUD,发生跑道入侵,以分析不同飞行显示器对进近着陆时发生跑道入侵时的飞行员绩效的影响。实验一、二使用PFD,但进近着陆场景不同,以分析使用PFD时,飞行员针对不同场

景时的绩效;实验三、四使用HUD,但进近着陆场景不同,以分析使用HUD时,飞行员针对不同场景时的绩效。为保证被试能够反映飞行员的特性,选用23名矫正视力达到1.2以上的具有航空理论知识的研究生;利用仿真系统,按照飞行员的操作及扫视仪表的方式训练被试,使其能够依据1类仪表着陆程序完成进近着陆。为消除实验顺序对实验的结果的影响,利用拉丁方^[25]设计实验顺序。

实验假设开始进近着陆前的仪表、襟翼副翼、无线电频率等已设置完成,实施HUD的1类仪表着陆程序。从1000 m开始进近着陆,决断高度60 m,保持速度140节,0<垂直下降速度保持<1000 ft/min,以3度下滑角着陆。在决断高度以上发现跑道入侵,且严重影响飞行安全(入侵的飞机停留在跑道上或在跑道上滑行或即将滑入跑道),实施复飞;当入侵飞机滑离跑道,正常实施降落。未发生跑道入侵继续着陆。实验过程中采集被试眼动数据,以分析飞行员注意力分配和工作绩效。

2.3 实验步骤

实验正式开始前,被试练习使用仿真飞行系统,至被试可熟练的完成进近着陆。具体实验步骤如下:①阅读实验指导语,明确实验目的;②被试练习飞行,适应实验环境;③每位被试依据拉丁方设计的实验顺序进行实验,每次实验前不告知被试此次试验是否发生跑道入侵,只告知使用何种显示器,实验过程中记录被试眼动数据;④每结束一个实验,被试休息3 min后,继续下一次实验;⑤所有实验结束,汇总实验数据。

实验环境,保持恒定光照400lx,噪音<20db,温度控制在26±0.5℃,被试视野内无与飞行无关的干扰物。

3 实验数据分析

基于该仿真系统完成此次试验,分析进近着陆时被试分别使用HUD和PFD发现跑道入侵的反应时间和遗失率,结果如表2所示。

表 2 被试使用 HUD 和 PFD 探测跑道入侵的反应时间 RT
Tab. 2 Response time of pilots using HUD to detect runway incursion

被试编号	1	2	3	4	5	6
HUD	12.87	19.33	14.75	6.54	18.25	11.67
PFD	15.42	15.00	4.58	12.21	8.96	17.79
被试编号	7	8	9	10	11	12
HUD	21.25	19.68	21.42	31.21	8.46	27.10
PFD	10.01	12.92	5.37	8.15	5.64	22.58
被试编号	13	14	15	16	17	
HUD	16.71	18.25	--	--	--	
PFD	7.04	25.21	13.62	11.58	18.46	

虽然记录了 23 组被试眼动数据, 但是使用 PFD 探测跑道入侵的有效数据为 17 组, 其中有 6 名被试未发现跑道入侵; 使用 HUD 的有效数据为 14, 其中有 9 名被试未发现跑道入侵。

对表 1 实验数据进行 K-S 和 Q-Q 图正态分布检验, 结果表明数据符合正态分布, T 检验分析结果得被试使用 HUD 探测跑道入侵事件的反应时间 RT 为 17.68 s (SD=6.701), 使用 PFD 探测跑道入侵事件的反应时间 RT 为 12.62 s (SD=5.977)。因此, 相比于 PFD, 被试使用 HUD 探测跑道入侵事件的反应时间慢 5.06 s, 该结果与元分析结果一致^[26-27]。

23 名被试使用 HUD 探测跑道入侵事件时有 9

名被试未发现跑道入侵, 遗失率 MR 为 0.39; 使用 PFD 时, 有 6 名被试未发现跑道入侵, 遗失率 MR 为 0.26, 由此知, 与使用 PFD 相比, 被试使用 HUD 探测跑道入侵事件的遗失率要高 0.13, 与元分析结果一致^[26]。

分析被试的扫视轨迹, 得出进近着陆时被试分别使用 HUD 和 PFD 探测跑道入侵的眼动热势图和注视点图, 如图 3 所示。

依据驾驶舱飞行视景划定兴趣域, 将使用 HUD 飞行的场景划分为空速、高度、航向、俯仰-地平仪-窗外场景、横滚和垂直下降速度 6 个兴趣域; 将使用 PFD 飞行的场景划分为空速、高度、航向、俯仰姿态-地平仪、窗外场景、横滚和垂直下降速度 7 个兴趣域。因 HUD 和 PFD 的安装位置及显示特性导致两种显示器的兴趣域划分存在差异。

K-S 正态分布检验表明, 各兴趣域眼动注视焦点百分比符合正态分布检验, 以上兴趣域眼动注视焦点数的百分比 T 检验结果如表 3、表 4 所示。由表 3 知, 使用 HUD 探测跑道入侵时, 被试的注意力主要集中于俯仰-地平仪-窗外视景和航向兴趣域, 所占比例分别为 59.98% 和 10.35%。

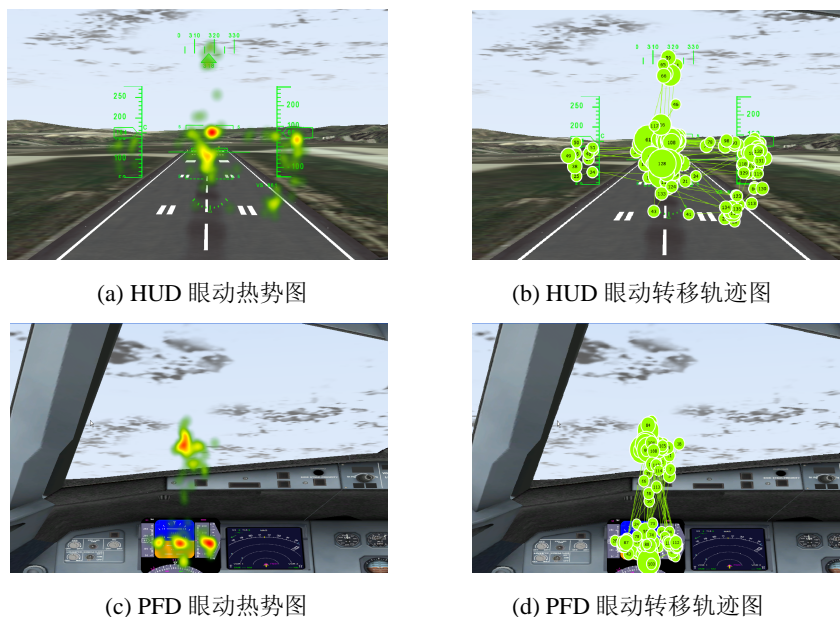


图 3 某被试使用 HUD 和 PFD 探测跑道入侵的眼动热势图和转移轨迹图

Fig. 3 Eye movement thermal maps and metastatic traces of a subject using HUD and PFD to detect runway incursion

表 3 使用 HUD 探测跑道入侵注视焦点百分比 T 检验
Tab. 3 T test results of gaze focus percentage using HUD to detect runway incursion

兴趣域	N	均值	标准差
航向	14	0.103 5	0.089 8
空速	14	0.074 6	0.053 4
高度	14	0.075 7	0.034 1
横滚	14	0.029 3	0.023 1
俯仰-地平仪-窗外视景	14	0.599 8	0.140 0
垂直速度	14	0.050 3	0.036 0

表 4 使用 PFD 探测跑道入侵注视焦点百分比 T 检验
Tab. 4 T test results of gaze focus percentage using PFD to detect runway incursion

兴趣域	N	均值	标准差
空速	17	0.070 0	0.029 3
航向	17	0.079 3	0.052 4
高度	17	0.085 4	0.068 4
横滚	17	0.016 1	0.012 4
俯仰姿态-地平仪	17	0.357 6	0.115 2
垂直速度	17	0.058 2	0.053 2
窗外场景	17	0.288 2	0.113 6

使用 HUD 进近着陆, 飞行信息和外部视景叠加会干扰飞行员探测跑道入侵。被试使用 HUD 时注意俯仰-地平仪-窗外视景的眼动注视百分比达到 59.98%, 某种程度说明 HUD 引起飞行员的过分关注, 而不利于探测跑道入侵。

由表 4 知, 使用 PFD 探测跑道入侵时, 被试的注意力主要集中于俯仰姿态-地平仪和窗外场景兴趣域, 所占比例分别为 35.76% 和 28.82%。

PFD 与外部视景分离, 飞行员可清晰的观察外部视景, 探测跑道入侵, 并避免了对某个兴趣域的过分关注, 有利于探测跑道入侵。

4 结论

为评估进近着陆时飞行员分别使用 HUD 和 PFD 探测跑道入侵的绩效, 基于 Vega Prime 搭建了运输类飞机视景仿真系统, 并完成了跑道入侵场景的测试。基于该仿真系统, 完成了探测跑道入侵实验, 实验分析结果表明: 进近着陆情景下, 飞行员分别使用 HUD 和 PFD 探测跑道入侵事件时, 反应时间 RT 分别为 12.62 s 和 5.06 s, 相比于 PFD,

使用 HUD 探测跑道入侵事件的反应时间慢 5.06 s; 遗失率 MR 分别为 0.39 和 0.26, 相比于 PFD, 使用 HUD 探测跑道入侵事件的遗失率 MR 高 0.13。实验数据表明, 使用 HUD 探测跑道入侵时, 被试的注意力主要集中于俯仰-地平仪-窗外视景和航向兴趣域; 使用 PFD 探测跑道入侵时, 被试的注意力主要集中于俯仰姿态-地平仪和窗外场景兴趣域。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 中国民航平视显示器 HUD 应用路线图[R]. 2011. CAAC. The Application Roadmap of Head up Display[R]. 2011.
- [2] Prinzel, Lawrence J. Head-Up Displays and Attention Capture[R]. NASA Technical Memorandum (NASA/TM-2004-213000). USA: Langley Research Center, 2004.
- [3] Wickens C D. Attentional issues in head-up displays[M]. In D. Harris (Ed.), Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Transportation Systems. 1997.
- [4] SAE ARD50016. Head-Up Display Human Factor Issues[S]. SAE 1998.
- [5] http://www.faa.gov/airports/runway_safety/statistics/year/?fy1=2016&fy2=2015.
- [6] Prinzel Lawrence J. Head-Up Displays and Attention Capture[J]. NASA Technical Memorandum (NASA/TM-2004-213000), 2004, 62(4): 273-273.
- [7] 黄旭, 何传易, 杨德辉. 基于 Vega Prime 和 GL Studio 的某型飞机虚拟座舱系统研究与实现[J]. 科技视界, 2015, 32: 116-117. Huang Xu, He Chuanyi, Yang Dehui. Research and Implementation of an Aircraft Virtual Cockpit System Based on Vega Prime and GL Studio[J]. Science & Technology Vision, 2015, 32: 116-117.
- [8] 邓勇. 虚拟座舱显示与视景仿真技术[D]. 西安电子科技大学, 2013. Deng Yong. Virtual Cockpit Display and Visual Simulation Technology[D]. Xidian University, 2013.
- [9] Microsoft Corporation. DirectInput C/C++ Reference[M]. USA: Microsoft Corporation. 2002.
- [10] 张乐, 韩佳盈, 张蛟, 等. 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(3): 159-162. Zhang Le, Han Jiaying, Zhang Jiao, et al. Research of

- Program Development Technology of Vega Prime Based on MFC Framework[J]. Fire Control & Command Control. 2014(3): 159-162.
- [11] 赵月, 王建华. 基于 MFC 的 Vega Prime 场景漫游驱动框架的设计[J]. 电子设计工程, 2013, 21(2) : 31-33.
Zhao Yue, Wang Jianhua. Research on designing the virtual scene-driven framework of Vega Prime based on[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(2) : 31-33.
- [12] AC 25. 11B, Electronic Flight Display[S].
- [13] 于辉, 赵经成, 付战平, 等. GL Studio 虚拟仪表技术应用与系统开发[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
Yu Hui, Zhao Jingcheng, Fu Zhanping, et al. GL Studio Virtual Instrument Technology Application and System Development[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [14] 孟晓梅, 刘文庆. MultiGen Creator 教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
Meng Xiaomei, Liu Wenqing. MultiGen Creator Tutorial[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [15] MultiGen Creator Creating Models/Terrain for Simulations Version 3. 0 for Windows[M]. MultiGen- Paradigm, Inc. 2004.
- [16] MultiGen Creator User's Guide Version 3.0 for Windows[M]. MultiGen- Paradigm, Inc. 2004.
- [17] 吕慧芳, 鲁徐, 张皖峰, 等. 基于 Vega Prime 的大规模地形仿真研究[C]//中国系统仿真技术及其应用学术年会. 2011: 479-482.
Lü Huifang, Lu Xu, Zhang Wanfeng, et al. Research on Large-Scale Terrain Simulation Based on Vega Prime[C]// System Simulation Technology & Application. 2011: 479-482.
- [18] 左健. 基于 Multigen Creator 和 Vega Prime 的航标船驾驶视景仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 32-35.
Zuo Jian. Research on The Visual Simulation of Beacon Inspection Ship's Driving Based on Multigen Creator and Vega Prime[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 32-35.
- [19] 钟文武, 周新力, 金慧琴, 等. 基于 Vega Prime 的飞行视景仿真研究与应用[J]. 指挥控制与仿真, 2015(6): 90-93.
Zhong Wenwu, Zhou Xinli, Jin Huiqin, et al. Research and Application of Flight Visual Simulation Based on Vega Prime[J]. Command Control & Simulation, 2015(6): 90-93.
- [20] 孙桂兰. 基于 Multigen Creator/Vega Prime 的轮轨运动虚拟仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 57-72.
Sun Guilan, The Visualization Virtual Simulation of Wheel-Rail Movement Based on Multigen Creator / Vega Prime[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014: 57-72.
- [21] 胡梓楠, 于劲松. 基于 MFC 编程框架的 Vega Prime 软件集成技术的研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(14): 4291-4299.
Hu Zinan, Yu Jinsong. Research of Software Integrated Technology of Vega Prime Based on MFC Programming Framework[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(14): 4291-4299.
- [22] 胡少军, 何东健, 郭亚红, 等. Vega 中基于 DirectInput 的 USB 操纵杆的控制研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(2): 492-494.
Hu Shaojun, He Dongjian, Guo Yahong, et al. Control of USB joystick in Vega based on DirectInput[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(2): 492-494.
- [23] 吴政, 陈喜春, 佟绍禹. 基于 Vega 和 DirectInput 技术实现的虚拟校园漫游[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(8): 1886-1887.
Wu Zheng, Chen Xichun, Tong Shaoyu. Implementation of Virtual Campus Tour Based on Vega and DirectInput[J]. Computer Knowledge and Technology, 2010, 6(8): 1886-1887.
- [24] 姜光焱, 张伟, 段昶. 基于 Vega Prime 的导弹仿真系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 645-649.
Jiang Guangyan, Zhang Wei, Duan Chang. Research of Missile Simulation System Based on Vega Prime[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 645-649.
- [25] 刘晓路, 陈英武, 荆显荣, 等. 优化拉丁方试验设计方法及其应用[J]. 国防科技大学学报, 2011(5): 73-77.
Liu Xiaolu, Chen Yingwu, Jing Xianrong, et al. Optimized Latin Hypercube Sampling Method and Its Application[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011(5): 73-77.
- [26] 白杰, 葛祥雨, 杨坤. 基于 N-SEEV 模型的飞行员探测跑道入侵绩效的研究[J]. 民航科技, 2016(4): 25-30.
Bai Jie, Ge Xiangyu, Yang Kun. Research on Pilot's Performance of Detection Runway Incursion Based on N-SEEV Model[J]. Civil Aviation Science & Technology, 2016(4): 25-30.
- [27] Wickens C D, Hooey B L, Gore B F, et al. Predicting Pilot Performance in Off-Nominal Conditions: A Meta-Analysis and Model Validation[J]. Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings (S1071-1813), 2009, 53(1): 86-90.