

6-16-2022

Design and Realization of 6-DOF Parachuting Simulation Training System

Xiaoguang Zhou

Naval Aviation University, Huludao 125001, China; zhouxiaoguanghf@163.com

Peng Zhu

Naval Aviation University, Huludao 125001, China; 1499029789@qq.com

Yuanyuan Zhang

Naval Aviation University, Huludao 125001, China;

Huan Lu

Naval Aviation University, Huludao 125001, 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 6-DOF Parachuting Simulation Training System

Abstract

Abstract: Aiming at restoring the 6-DOF motion process of each stage during parachuting, a 6-DOF parachuting simulation training system is designed and implemented. The architecture of the simulator is designed, and the realization of the sub-systems such as the motion calculation, 6-DOF motion platform, control loading system, virtual reality scene, somatosensory system and management console is explained. *Compared with the same type of parachute simulator, this system has introduced a 6-DOF motion platform which can drive the trainees to simulate the various postures of parachuting. It can also help the trainees master the control methods of parachute and enhance the ability of keeping position stabilization. At the same time, it uses the virtual reality technology is used to restore the immersive and vivid three-dimensional scene during parachuting, which is of great significance to improve the quality and efficiency of the parachuting training and promote the fighting capacity.*

Keywords

parachuting simulator, six degrees of freedom, virtual reality, simulation training

Authors

Xiaoguang Zhou, Peng Zhu, Yuanyuan Zhang, Huan Lu, and Yuan Zhou

Recommended Citation

Xiaoguang Zhou, Peng Zhu, Yuanyuan Zhang, Huan Lu, Yuan Zhou. Design and Realization of 6-DOF Parachuting Simulation Training System[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(6): 1320-1329.

六自由度跳伞模拟训练系统设计与实现

周晓光, 朱鹏*, 张源原, 路欢, 周媛

(海军航空大学, 辽宁葫芦岛 125001)

摘要: 针对当前的跳伞模拟平台无法全方位还原跳伞各阶段六自由度运动过程的问题, 设计并实现了六自由度跳伞模拟训练系统。设计了模拟器的体系结构, 并说明了跳伞运动解算、六自由度运动平台、操纵负荷、虚拟现实视景、体感营造、教员控制台等分系统的实现。该系统通过引入六自由度电动平台, 带动受训者模拟跳伞各种姿态, 帮助受训人员掌握跳伞操纵动作, 增强姿态保持能力; 利用虚拟现实技术, 还原三维跳伞场景, 训练临场感强、效果逼真, 对提高跳伞训练质效、促进部队战斗力建设具有重要意义。

关键词: 跳伞模拟器; 六自由度; 虚拟现实; 模拟训练

中图分类号: V242.4; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)06-1320-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0051

Design and Realization of 6-DOF Parachuting Simulation Training System

Zhou Xiaoguang, Zhu Peng*, Zhang Yuanyuan, Lu Huan, Zhou Yuan

(Naval Aviation University, Huludao 125001, China)

Abstract: Aiming at restoring the 6-DOF motion process of each stage during parachuting, a 6-DOF parachuting simulation training system is designed and implemented. The architecture of the simulator is designed, and the realization of the sub-systems such as the motion calculation, 6-DOF motion platform, control loading system, virtual reality scene, somatosensory system and management console is explained. Compared with the same type of parachute simulator, this system has introduced a 6-DOF motion platform which can drive the trainees to simulate the various postures of parachuting. It can also help the trainees master the control methods of parachute and enhance the ability of keeping position stabilization. At the same time, it uses the virtual reality technology is used to restore the immersive and vivid three-dimensional scene during parachuting, which is of great significance to improve the quality and efficiency of the parachuting training and promote the fighting capacity.

Keywords: parachuting simulator; six degrees of freedom; virtual reality; simulation training

引言

当前我军军事训练进入大发展、大跨越阶段, 实战化标准不断提高, 跳伞作为飞行员与伞兵基本训练科目, 具有训练强度大、训练难度高的特点, 而现有训练手段主要以高台试跳与实地伞降为主, 不仅组织保障困难, 且存在极大的危险性,

急需扩宽训练手段, 提升训练效果^[1-2]。

跳伞模拟训练系统是以人伞系统动力学为基础, 将训练者悬挂于运动平台下方, 结合人机交互技术, 为训练者提供逼真跳伞环境的一种模拟训练装置^[3-4]。由于其在降低训练危险系数、增强训练环境适应性和降低训练成本等各方面的优势, 逐渐获得各国青睐。欧美国家在跳伞模拟器

收稿日期: 2021-01-18

修回日期: 2021-02-25

第一作者: 周晓光(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为军事仿真建模。E-mail: zhouxiaoguanghf@163.com

通讯作者: 朱鹏(1994-), 男, 硕士, 研究方向为军事仿真建模。E-mail: 1499029789@qq.com

研制方面起步较早, 基于虚拟现实技术的跳伞模拟机已在军事训练中得到普及^[5-6]。例如英国国防部购置的VRPT2跳伞模拟训练系统及美国空军引入的ParaSim5跳伞模拟训练系统。而随着VR虚拟仿真技术的发展, 国内也开展了有益的尝试, 包括空降兵学院、上海埃飞电子、北京华如科技等军内外单位纷纷推出各类型号的跳伞模拟训练系统, 并相继部署部队, 取得了不错的训练效果^[7-8]。

然而, 分析国内外技术方案, 现有跳伞模拟训练系统普遍采用气缸驱动平台, 通过气缸的上下运动控制训练者的姿态, 进而模拟跳伞过程。一方面, 由于气缸体积庞大, 运动迟缓, 其所模拟的伞降运动往往与运动结算结果不匹配。另一方面, 现有平台只能实现前后、上下与左右3个方向运动的控制, 无法全方位还原跳伞各阶段六自由度的实际运动过程, 跳伞姿态控制训练严重缺失。因此, 改进跳伞模拟器载人运动平台, 解决新平台的控制问题, 通过实时采集受训者对降落伞的操纵, 动感地模拟训练中人员全自由度运动过程, 已成为现有跳伞模拟训练系统亟需解决的技术问题。

针对以上问题, 本文结合某型跳伞模拟训练系统工程研制背景, 阐述了该模拟器的整体设计方案, 描述了各分系统的组成功能。该系统将六自由度运动平台应用于跳伞模拟器, 解决了跳伞过程中人员姿态模拟问题, 极大地提高了跳伞模拟的逼真度。

1 跳伞模拟器系统构建

1.1 需求与功能

某型跳伞模拟器主要以满足飞行员跳伞训练为需求, 因此跳伞模拟训练系统需尽可能贴近训练实际, 并针对飞行员跳伞训练的要求, 能够进行不同科目、不同伞型的伞降模拟训练; 可以满足受训人员舱内准备、离机、降落伞操纵、特情

处置、着陆全过程的模拟训练; 可按训练要求生成训练方案, 能对训练情况进行记录、重演和评估训练成绩。具体功能包括: 训练方案选择、训练过程监视、录取和回放、舱内准备模拟、伞具操控模拟、训练效果评估、三维头盔场景仿真、机舱半实物仿真、各种气象条件对伞具操控的影响模拟等。具体如下:

(1) 特定伞型。根据某跳伞训练特定伞型建立降落伞模型, 伞型模块预留扩展接口, 可为后续添加新伞型提供支持;

(2) 提供与降落伞相一致的操纵感受和位移变化。为跳伞人员提供实物的操纵背带系统, 实现“人一伞”结合, 跳伞员通过操纵棒控制降落伞, 改变降落伞气动力, 控制运动过程, 同时训练者也将有操纵力感。在跳伞模拟训练过程中, 伞降动力学系统根据码盘所检测的伞兵对操纵棒的控制状态(操纵棒的位移量、位移速度), 计算操纵棒的操纵力, 再由加载驱动程序控制力矩电机产生与操纵力相符合的操纵棒负荷力, 使训练者感受操纵手感;

(3) 提供与操纵相一致或同步的视觉变化图像。跳伞员通过头盔显示器观察伞降过程中视景的相对运动。由运动跟踪接收器得到头盔传感器相对于基准位置发射器的位置、姿态, 双目同步控制系统根据降落伞动力学系统计算的空降兵位置, 确定立体图像视点, 根据头盔的位置、姿态, 确定对立体图像的视角, 并控制双目图像同步;

(4) 模拟跳伞的视景环境, 通过创设多种地形, 实时输入气象数据、姿态参数, 通过改变条件让跳伞员感受与特殊情况处置相一致的变化, 掌握不同特殊情况的处理方法;

(5) 对操纵方法及对错进行实时评估, 并给出正确的操纵方法;

(6) 对跳伞员的操纵过程按步骤和情况进行最终评估, 具有对练习全过程进行回放评估及动作考核功能, 判断操纵是否正确及带来的影响;

(7) 多视角的视图效果。除训练者视角外,用跳伞伴随视角(空中)和指挥员视角(地面)2个视角展示跳伞整个过程;

(8) 系统设计具有可扩展性,能对平台进行二次开发,并预留接口以期将来实现模拟编队跳伞训练。

1.2 跳伞模拟训练系统构建

1.2.1 系统硬件组成

系统硬件主要由教员控制台和模拟跳伞区2部分组成,整体外观如图1所示。

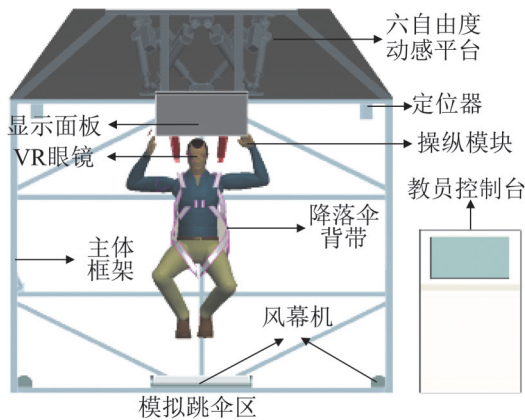


图1 整体外观

Fig. 1 Overall appearance

(1) 模拟单元框架。包括位于下部的底座、位于上部的顶盖,以及位于底座和顶盖之间的2个立柱,模拟单元框架构成跳伞模拟单元的支撑主体,并安装有跳伞模拟单元的其他部件;

(2) 六自由度动感平台。倒立悬挂于单元框架之上,为跳伞员提供跳伞过程中的动感模拟。运动平台的平面上留有系留接口,用于安装拉力传感器和伞绳等设备;

(3) 伞绳及操纵带。通过拉力传感器安装于六自由度运动平台之上,下系背带系统;

(4) 背带系统。背带模块部分连接在操纵控制平台上,部分穿设在受训者身上,一方面将受训者悬吊在空中,另一方面利用背带系统上的相应拉环,对受训者进行不同伞型的操作训练;

(5) 操纵模块。主要实现对操纵绳、操纵带控制输入的数据采集和传输,主要包括手持操纵部分、传感器、电源,以及数据采集系统等;

(6) 头盔模块。头盔模块佩戴在受训者的头部,包括虚拟现实眼镜和数据线,为受训者提供连续动态的大视角三维伞降环境显示;

(7) 送风装置。送风装置用于模拟伞降过程中的垂直方向风和侧向风,包括下方送风装置和环绕送风装置,下方送风装置安装在底座上,环绕送风装置安装在顶盖上;

(8) 教员控制台。内含一系列控制软件,为模拟跳伞管理平台,用于为跳伞模拟单元设定训练项目,接收模拟器的各项操纵数据,控制跳伞模拟单元模拟整个跳伞过程。

1.2.2 系统功能模块

跳伞模拟训练系统功能模块由跳伞运动解算分系统、六自由度运动平台分系统、操纵负荷分系统、视景分系统、体感营造分系统、教员控制台、信号采控分系统,以及电源和辅助分系统等组成。

跳伞模拟训练系统功能原理如图2所示。受训者通过伞绳和操纵带悬挂于六自由度动感平台之下,操纵伞绳拉环或者操纵带,为操纵负荷系统提供输入信号,操控负荷系统采集控制信号输入跳伞运动解算系统,其在六自由度“人一伞”系统动力学模型的基础上进行数值解算,输出“人一伞”系统运动状态信息到视景系统、六自由度运动平台系统和体感营造系统。视觉显示模块接收到“人一伞”系统运动状态信息后,更新视景信息,反馈为受训者视觉。六自由度运动平台接收到“人一伞”系统运动状态信息后,产生相应的动感模拟,驱动平台带动受训者运动,反馈给受训者触觉。体感营造系统接收到“人一伞”系统运动信息后,通过风幕机和音响产生相应的风效与音效,反馈给飞行员听觉及触觉。进而实现一个人在环路中的虚拟仿真系统。

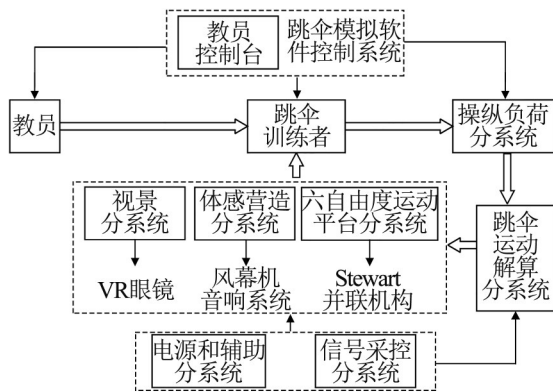


图2 系统功能框图

Fig. 2 System function block diagram

模拟器运行过程中, 教员控制台通过内设的一系列控制软件完成任务管理、条件参数设置、数据记录、仿真再现、数据输出, 及评估等功能, 教员可通过控制台实时监测受训者运动状态, 也可通过计算机对训练过程进行干预。

2 跳伞模拟器各分系统实现

2.1 跳伞运动解算分系统

跳伞运动解算是跳伞模拟训练系统运行的大脑。根据人伞系统动力学特性, 依据环境因素, 结合跳伞训练员操纵数据, 解算“人—伞”系统六自由度非线性全量运动方程, 计算出系统各时刻速度及角加速度, 反解出实时位移量与姿态角等运动参数, 并反馈至模拟器其他分系统, 以便为受训者提供跳伞过程中相应的视觉、听觉、触觉和动感等信息。

跳伞运动解算分系统主要由气动参数模型、跳伞运动方程模型、跳伞操纵模型与环境扰动模型组成, 如图3所示。

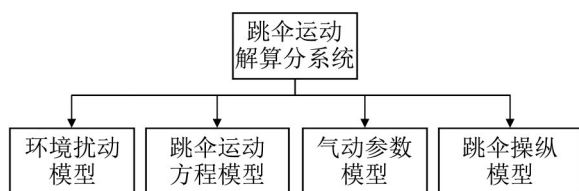


图3 运动解算分系统

Fig. 3 Motion solution subsystem

该系统的状态解算精度将直接决定跳伞模拟训练系统的仿真性能, 其建模过程需要注意以下几个方面:

(1) 气动参数模型的精确性是跳伞运动仿真的关键, 应以各实际训练伞型为对象, 分别建立不同降落伞系统的气动参数表。同时, 针对跳伞训练的不同阶段, 气动数据还应按照开伞、充气、拉直3种模式进行分类。

(2) 跳伞运动方程模型。为了实现高保真还原跳伞运动过程, 为系统运动平台输入一一对应的状态信息, 需要建立六自由度“人—伞”系统运动方程。体坐标系下系统动力学方程为

$$F_x = (m + A_{11})(\dot{u} - vr) + (m + A_{33})qw + (J_1 + A_{15})(\dot{q} + rp)$$

$$F_y = (m + A_{11})(\dot{v} + ur) - (m + A_{33})pw - (J_1 + A_{15})(\dot{p} - qr)$$

$$F_z = (m + A_{33})\dot{w} - (m + A_{11})(uq - vp) - (J_1 + A_{15})(p^2 + q^2)$$

$$M_x = (I_{xx} + A_{55})\dot{p} - (J_1 + A_{15})(\dot{v} - pw + ur) - (I_{yy} + A_{55} - I_{zz})qr + (A_{33} - A_{11})vw$$

$$M_y = (I_{yy} + A_{55})\dot{q} + (J_1 + A_{15})(\dot{u} + qw - rv) + (I_{xx} + A_{55} - I_{zz})pr - (A_{33} - A_{11})uw$$

$$M_z = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq$$

$$\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]^T$$

$$\mathbf{M} = [M_x, M_y, M_z]^T$$

式中: \mathbf{F} 、 \mathbf{M} 分别为作用在降落伞系统上的外力和外力矩; u 、 v 、 w 和 p 、 q 、 r 分别为速度和角速度矢量在体坐标系三轴分量; 式中其他参数定义与推导过程可见文献[9]。

运动学方程以确定系统的姿态与位置:

$$\dot{\phi} = p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta$$

$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi$$

$$\dot{\psi} = q \sec \theta \sin \phi + r \sec \theta \cos \phi$$

$$\dot{x} = u \cos \psi \cos \theta + v (\cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi) + w (\cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi)$$

$$\dot{y} = u \sin \psi \cos \theta + v (\sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi) + w (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi)$$

$$\dot{z} = u \sin \theta - v \cos \theta \sin \phi - w \cos \theta \cos \phi$$

式中: ϕ 、 θ 、 ψ 分别为“人—伞”系统的滚转角、俯仰角、偏航角; x 、 y 、 z 分别为“人—伞”系统在地

理坐标系中的位置。

(3) 跳伞操纵模型。跳伞过程中，影响人伞系统运动轨迹的主要为系统外力 F 与外力矩 M ，其中外力包括重力、降落伞所受的气动力、跳伞员操纵产生的控制力；外力矩包括重力矩、降落伞的气动阻尼力矩、跳伞员操纵产生的控制力矩。考虑到跳伞操纵包括拉拽伞绳操纵棒与操纵背带2种方式，建立操纵模型：

$$\Delta F_{x_s} = K_x [1 - e^{-(\Delta t)/\tau}] [(LF + RF + \alpha_x \cdot LF \cdot RF) - (LB + RB + \alpha_x \cdot LB \cdot RB)]$$

$$\Delta F_{y_s} = K_y [1 - e^{-(\Delta t)/\tau}] [(RF + RB + \alpha_y \cdot RF \cdot RB) - (LF + LB + \alpha_y \cdot LF \cdot LB)]$$

$$\Delta F_{z_s} = K_z [1 - e^{-(\Delta t)/\tau}] [(LF + RF + \alpha_z \cdot LF \cdot RF) + (LB + RB + \alpha_z \cdot LB \cdot RB)]$$

$$M_z = K_D [1 - e^{-(\Delta t)/\tau}] [(LF + RB) - (RF + LB)] + K_S [1 - e^{-(\Delta t)/\tau}] [RZ - LZ]$$

式中：LF、RF、LB、RB $\in \{0, 1\}$ 分别为拉左前背带、右前背带、左后背带、右后背带；拉左右操纵棒分别记为 LZ、RZ $\in \{0, 1\}$ ，当受训者进行降落伞操纵时，相应操纵方式输入值为1，其余为0。 Δt 为操纵效果延时时间。 ΔF_{x_s} 、 ΔF_{y_s} 、 ΔF_{z_s} 为操纵产生的体坐标3个方向的受力； M_z 为操纵产生的偏航力矩。其他参数为可调的操纵增益参数^[3]。

(4) 环境扰动模型。降落伞系统在大气环境中易受风场的影响，不同形式的风场对降落伞系统的轨迹、运动速度、姿态等都有不同程度的影响。本系统采用风场模型来模拟实际的风扰动，包括平均风场模型、紊流风场模型和突风风场模型等^[10]。

2.2 六自由度运动平台分系统

六自由度运动平台是本系统实现高精度跳伞运动模拟的核心，采用的是 Stewart 并联结构，由6条电动缸通过虎克铰链或球铰将上、下2个平台连接而成。下平台固定在基座上，借助6条电动缸的伸缩运动，完成下平台在三维空间6个自由

度(即 $x, y, z, \theta, \phi, \psi$) 的运动以及这些自由度的复合运动，并通过下平台悬挂的方式带动训练者进行高速度、高行程、高精度的跳伞运动模拟，能够真实还原跳伞过程的失重感、冲击感、操纵感、坠落感，以及特殊情况触发时的眩晕感等运动体感。

Stewart 平台是六自由度并联机构的基础平台，具有刚度大、负荷自重比高、载荷分布均匀、运动平稳的特点。在高精度、大载荷且对工作空间要求相对较小的场合得到了很广泛的应用。该平台采用的驱动方式是电机驱动滚珠丝杠驱动方式，如图4所示。

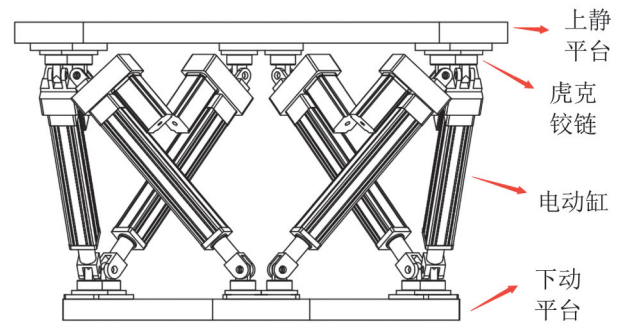


图4 六自由度运动平台
Fig. 4 6-DOF motion platform

平台包含以下功能模块：

(1) 人机界面(human machine interface, HMI)控制软件。它是平台控制系统的操作平台，功能主要包括：平台运动轨迹监视、数据管理、系统参数设定、运行模式设定，以及各缸当前运行状态显示等，可通过该软件对平台进行多自由度的测试、振动测试，还可以完成平台状态的检测、振动频谱、故障处理等；

(2) 伺服控制系统。利用 STM32 系列芯片内部网络模块进行外部 phy 扩展，实现网络通信硬件电路。在 $\mu C/OS-III$ 操作系统上进行相关程序开发，内置自主研发的“六自由度平台洗出算法”可以根据不同模拟软件进行数据处理，结合 Stewart 反解算法实现对平台的精准控制，也能完

成平台的自检、预位、复位, 以低速自动运行至零位或中位的功能;

(3) 伺服驱动模块。伺服驱动模块主要包含伺服驱动器与伺服电机, 它是控制系统中直接与机械部分相连的模块, 控制系统通过伺服驱动模块执行相应的动作, 驱动机械结构完成规定空间运动轨迹;

(4) 安全检测模块。为了规范平台的使用以及保障人员安全, 平台增加一个安全检测模块, 即当使用流程规范没有达到安全指标时, 平台不能运行。例如使用人员未佩戴安全带、平台电缸超过限位点、平台未到达启动点等一系列安全规范;

(5) 紧急制动模块。当平台出现紧急故障状态时, 可以通过紧急制动模块快速停止平台的运动, 从而达到保护人员和平台的目的;

(6) 故障检测模块。当平台运行时, 控制系统通过 Modbus RTU 协议与伺服控制器及其他控制部件进行数据的对联, 实时监控平台的运行状态, 能及时对出现的故障做出响应, 同时停止平台的运动, 保障人员与平台的安全;

(7) 状态检测模块。通过在平台安装姿态传感器和振动传感器, 实时获取平台的运行状态, 获取的数据经过控制系统的清洗, 解算出平台的姿态与振动数据, 通过网络通信方式将数据发送到 HMI 模块进行平台状态的显示与对比。

2.3 操纵负荷分系统

操纵负荷分系统包括一套降落伞背带系统及2个降落伞拉环, 如图5所示。其中背带系统利用真实的训练伞背带进行改装, 可保证模拟训练的穿戴过程、操作方式和触摸手感与实际训练相同。而拉环则主要以现役降落伞拉环为基础, 经过数字化改造, 可实时采集拉环的操作状态, 并反馈给运动解算系统, 为降落伞操纵提供硬件支持。



图5 伞背带及降落伞拉环
Fig. 5 Strap and parachute pull ring

为了实现操纵数据的采集, 操纵负荷分系统同时配备2套传感器装置。包括4个拉力传感器和2个位移传感器, 4个拉力传感器一端安装于运动平台, 一端留有卡扣可以方便安装训练伞伞绳, 可实现对操纵背带操控数据的采集。2个位移传感器采用弹力自动恢复初始状态, 将拉绳式传感器的主体设备通过钢材固定在六自由度平台的动平台端, 拉绳式传感器的拉绳与降落伞的拉环进行对接, 操纵者拉动拉环即可带动传感器数据的变化, 可实现对操纵绳操控数据的采集。

2.4 视景分系统

视景分系统为训练者提供有效的视觉信息, 作为整个系统的重要组成部分, 视景的真实性、合理性会直接影响训练者的体验, 对跳伞训练的适用性、可靠性产生极大的影响。本系统基于虚拟现实技术搭建跳伞模拟训练视景环境, 其采用虚实结合的方式, 利用数据头盔、数据操纵器与传感器等实现人机交互, 构建具有沉浸感的训练视景环境, 包括建筑物模块、天气模块、飞行器模块和地景模块4个部分, 视景效果图如图6所示。



图6 视景效果图
Fig. 6 Visual scene graph

视景系统首先运用 3Ds Max 等建模软件制作人员、装备、环境的 3D 模型，在对模型进行渲染与修改后导入 Unity3D 互动平台，使用 World Terrain 插件制作地貌地形，并通过 Unity 的地形系统和 World Machine 软件完成地景的制作。在此基础上，使用 C# 语言编写了基于 UDP 协议的端口数据传输模块，完成了 Unity3D 平台与运动解算分系统之间的信息传输，并通过实时三维渲染，对跳伞训练的整体环境以及训练人员对降落伞的操纵进行实时动态渲染，使视景系统接收受训者的运动数据，并映射到受训者所佩戴的 VR 虚拟现实眼镜。

视景系统提供虚拟现实眼镜、框架显示器、集中监控屏 3 种显示方式。其中，虚拟现实眼镜设备为 HTC VIVE，佩戴于受训者头部，包括 1 个头戴式显示器(HMD)、2 个空间追踪定位器和 1 个串流盒，通过头部跟踪技术改变受训者观察视角，可呈现无延时、全方位的三维跳伞训练场景，使受训者视觉系统与运动感知系统有机结合，进而产生操纵降落伞下落的沉浸式体验；框架显示器安装于模拟单元框架外侧，用于参加训练的其他人员同步观察受训者跳伞训练情况，可通过软件设置，分别显示第一人称视角、第三人称视角、地面视角与自由视角，也可多视角同时显示；集中监控屏安装于教员控制台，主要用于实时显示人员信息、训练场景及综合数据，使组训教员对跳伞训练进行全程跟踪，掌握训练者跳伞姿态、操纵动作。

2.5 体感营造分系统

体感营造分系统根据跳伞训练中运动解算模块生成的系统状态值转换为相应体感营造参数，以控制跳伞模拟单元中的体感设备的运行，系统设备包括着陆模拟传送带、风机送风装置和音效设备。

着陆模拟传送带安装于模拟器下端，具有可升降特性，在训练开始后可将受训者抬升至较高

起跳位置，后下降至着陆高度并与六自由度运动解算模块实时配合，在训练者伞降最后阶段与人员接触，同时开启传送模式，生成着陆冲击体感。

风机送风装置安装于模拟器四周，由多个大口径风机组成，环形围绕受训人员，风向角度可调整。当运动解算模块中风场模型发生变化，可通过不同风机组合开关的形式，自动调整合成相应风向与风力的风场，为受训者提供真实的风力体感。

音效设备包括受训者佩戴的耳机及安装于模拟器框架上的一组音响，在模拟训练中，通过真实的再现受训者周围各个方位的各种声源，使处于不同空间方位的声源在虚拟场景中产生不同的声像位置感，获得与临场相似的方位感、距离感、环境感的听觉感受，进而提升模拟训练系统的逼真度和沉浸感。

2.6 教员控制台

教员控制台用于模拟训练过程中的教学管理与状态显示，主要包括训练控制模块和训练管理考评模块等。

(1) 训练控制模块，具备教学、练习、考核 3 种模式，用于设置训练的初始条件、跳伞特情，监控各跳伞模拟单元训练过程和实时状态。具备实时控制模拟软件的功能，包括环境干预、特殊情况干预、集中监控功能等，并能对各模拟训练单元进行语音指挥；具备实时控制硬件设备的功能，包括六自由度平台的控制、风幕机的功率控制、平台的响应速度调节及紧急制动等。

(2) 训练管理考评模块，包括数据存储模块，支持学员信息存储，可以直接保存于数据库，也可生成信息文件；考评回放模块，具备练习过程回放功能。包括练习态势采集、回放数据生成及保存、回放展现、速度控制；考核评估模块，具备仿真运行数据的记录和分析评估能力。包括练习数据统一管理、处理分析、综合展现等。

3 跳伞模拟器训练分析

3.1 训练流程

训练按如下步骤进行:

(1) 初始状态, 体感平台带动跳伞服降到最低点, 跳伞人员通过松紧跳伞服进行穿戴, 保证站立时跳伞服为收紧状态, 同时佩戴好 VR 眼镜;

(2) 软件启动, 教员控制台通过训练软件设置好模拟训练场景, 跳伞人员通过开始按钮启动跳伞, 并做出跳跃动作, 在跳伞人员跳起瞬间, 体感平台马上将跳伞人员拉离地面 10 cm(脚尖离地距离);

(3) 模拟跳伞, 跳伞人员通过 VR 眼镜查看整个模拟训练所处的场景, 并通过固锁牵引器来控制降落方向与地点, 同时模拟软件会将姿态数据实时传输到体感模拟平台, 体感平台做出相应的动作, 让跳伞人员能感受到侧滑、重力加速以及开伞时的拉扯感;

(4) 降落时, 平台会通过软件反馈回来的高度信号做出相应下降动作, 当软件中着陆时, 跳伞人员的脚刚好着地;

(5) 训练管理考评模块通过模拟训练软件自动给出训练成绩。

实际训练场景如图 7 所示。



图 7 模拟训练实景
Fig. 7 Simulation training scene

3.2 训练结果分析

为证明本系统训练效果, 以某风场扰动为训练条件, 设置跳伞起跳高度为 1 200 m, 出舱即开伞且初始速度 $u_0 = 8 \text{ m/s}$, $w_0 = 20 \text{ m/s}$, 其余值为 0。训练结果如图 8~9 所示。图 8 中圆形区域为预定降落区域。图 9 中 u_a 、 v_a 、 w_a 和 u_w 、 v_w 、 w_w 分别为人伞系统体坐标系原点处的空速三轴分量与风速三轴分量; α_T 、 α 、 β 为系统总攻角、迎角和侧滑角。

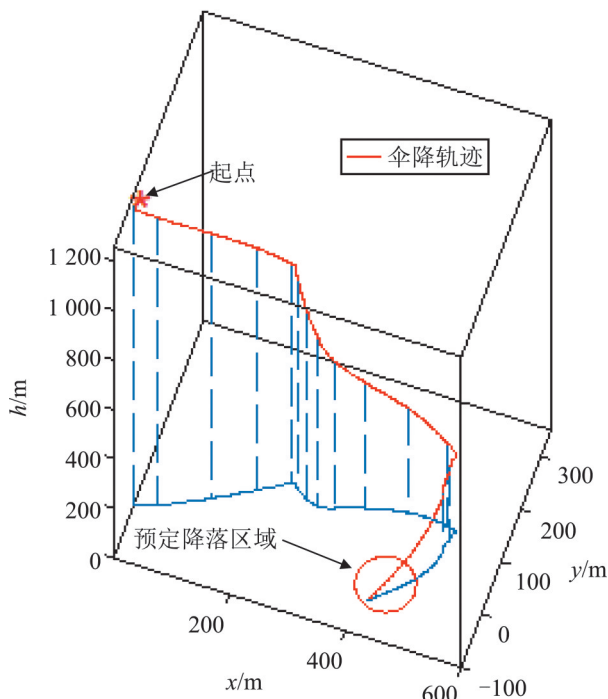
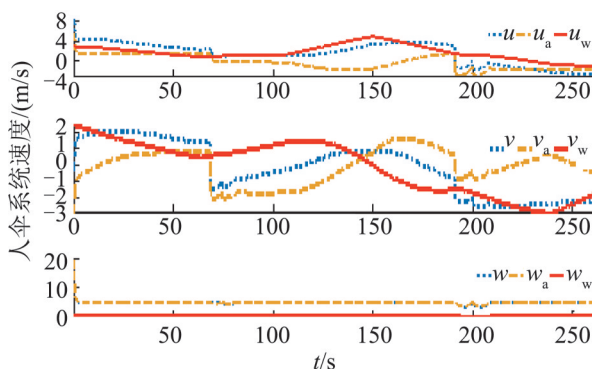


图 8 伞降三维轨迹图
Fig. 8 3D trajectory of parachuting



(a) “人-伞”系统三轴速度

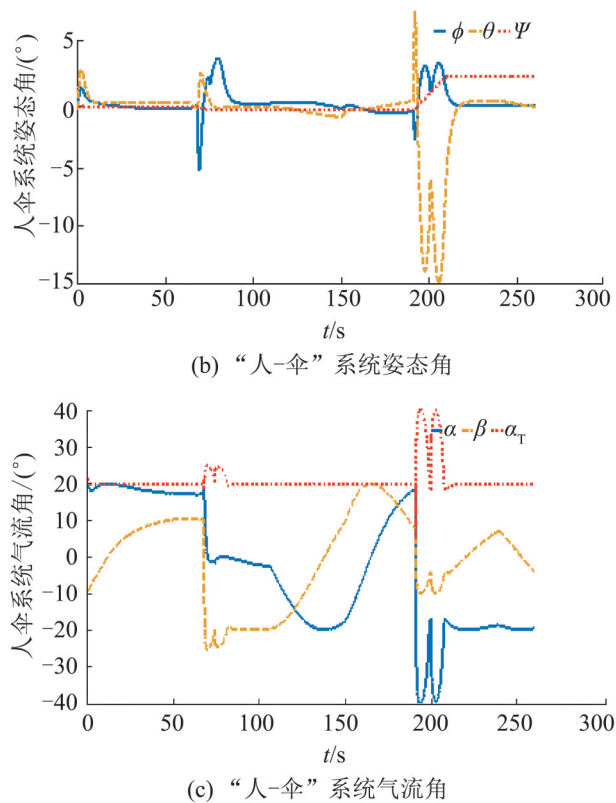


图9 人伞系统参数仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve of Human-parachute system

由图8(b)(c)可以看到,在 $t = 68 \sim 76$ s和 $t = 191 \sim 202$ s时,系统姿态角与气流角变化明显,这是由于受训者为了到达指定区域,分别在这2段时间进行了拉左侧背带与左拉环、拉右侧背带与左拉环的降落伞操纵。当操纵动作发生后,人伞系统平衡攻角的方向首先改变,进而改变降落伞气动力与力矩,随后系统力与力矩快速达到平衡状态,因此系统姿态角与气流角呈现短时间内快速而少量变化的结果。训练结果表明,本文设计的跳伞模拟训练系统符合实际人伞系统运动过程,通过训练可练习伞降操纵方法以应对不同情况,极大提高跳伞训练质效。

4 结论

本文从整体系统构建、分系统实现、训练流程设计等方面,描述了某型六自由度模拟跳伞训练系统的设计需求、软硬件配置与功能特点。该

系统通过引入六自由度电动平台,实现了跳伞过程全姿态模拟,并通过体感模拟、操纵反馈、姿态控制、虚拟视景使受训人员完全沉浸在模拟的训练环境中,可帮助受训人员掌握跳伞中的基本动作,增强姿态保持能力,大大弥补了传统跳伞训练手段的不足,提高了跳伞训练质量。下一步,将根据实际跳伞流程建立更加完善的模拟训练评估系统,针对跳伞动作和训练成绩进行分类打分,提升跳伞模拟训练的针对性。

参考文献:

- [1] 赵迎珺,尚宏伟.提高跳伞技能练习效果的基本途径[J].现代交际,2015(7):254.
Zhao Yingjun, Shang Hongwei. Basic Ways to Improve the Practice Effect of Parachuting Skills[J]. Modern Communication, 2015(7): 254.
- [2] Li G, Wang J Y, Han L. Dynamics Model of Landing Process for Parachute Simulator[C]// Asian Simulation Conference Scs Autumn Simulation Multi-Conference. Singapore, Singapore: Springer, 2016: 782-789.
- [3] 张宝,龚光红,王江云,等.面向伞降模拟器的跳伞质量评估体系[J].系统仿真学报,2017,29(增1):82-90,97.
Zhang Bao, Gong Guanghong, Wang Jianguyun, et al. Parachute Quality Evaluation System for Parachute Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29 (S1): 82-90, 97.
- [4] 韩亮,公璇,王江云,等.跳伞模拟器人机交互可视化功能研究[J].系统仿真学报,2017,29(8):1747-1752.
Han Liang, Gong Xuan, Wang Jianguyun, et al. Study on Visual Function of Human Computer Interaction in Parachuting Simulator [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1747-1752.
- [5] 侯学隆,范雪扬.基于VR和VWT的跳伞综合模拟训练系统设计[J].系统仿真技术,2014,10(1):42-48.
Hou Xuelong, Fan Xueyang. Synthetical Parachuting Simulation Training System Design Based on VR and VWT [J]. System Simulation Technology, 2014, 10(1): 42-48.
- [6] 徐加存.虚拟现实技术在跳伞动作训练中的应用研究[J].现代交际,2015(7):256.
Xu Jiacun. Research on the Application of Virtual Reality Technology in Parachute Jump Training[J]. Modern Communication, 2015(7): 256.
- [7] 北京华如科技股份有限公司.一种用于伞降模拟训练的伞降模拟器[P].CN:201911095451.7,2020-02-10.
Beijing Huaru Technology Co., Ltd. a Parachute

- Simulator for Parachute Training[P]. CN: 201911095451.7, 2020-02-10.
- [8] 中国人民解放军空军空降兵学院. 一种基于真实地形模拟的跳伞着陆训练系统及方法 [P]. CN: 201610636094.0, 2016-12-13.
The Airborne Troops College of Air Force Parachute Landing Training System and Method Based on Real Terrain Simulation [P]. CN: 201610636094.0, 2016-12-13.
- [9] Dobrokhodov V N, Yakimenko O A, Junge C J. Six-Degree-of-Freedom Model of a Controlled Circular Parachute[J]. Journal of Aircraft(S0021-8669), 2013, 40 (3): 482-493.
- [10] 宁雷鸣. 物-伞系统动力学高保真数值仿真技术及流固耦合算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Ning Leiming. Research on High Fidelity Numerical Simulation Technology and Fluid Structure Coupling Algorithm of Object Parachute System Dynamics[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.