Journal of System Simulation

Volume 27 | Issue 5

Article 7

9-1-2020

Hardware-in-the-Loop Test-bed for Testing of Lunar Rover GNC Based on Vision-in-the-Loop

Zhiping Li 1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;;

Zhang Zhi 1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;;

Jianxin Chen 1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;;

Wang Lei 1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, 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.

Hardware-in-the-Loop Test-bed for Testing of Lunar Rover GNC Based on Visionin-the-Loop

Abstract

Abstract: A hardware-in-the-loop and vision-in-the-loop test-bed for the testing of the lunar rover guide navigation control (GNC) subsystem was introduced. The composition of the test-bed and its dataflow were delicately designed. *Then the vision-in-the-loop concept was designed. To overcome the problem of matching between the hazard-camera's focus and the images' distortion parameters, the distortion computation on the edge of the image pixels was ignored. Furthermore, to fulfill the closed-loop testing, the stereo vision function was accomplished by using multiple processes that made the images rapidly generated and the cameras' position and attitude parameters were supplied from rover's dynamics. Many testing instances can be constructed by using this test-bed. That will improve the effectiveness and coverage of subsystem testing. The CE-3 lunar rover has been working on the moon flawlessly, which implicates that the test-bed is very effective for the subsystem's grounding test.*

Keywords

lunar rover, hardware-in-loop simulation, vision-in-loop, GNC

Authors

Zhiping Li, Zhang Zhi, Jianxin Chen, Wang Lei, and Hehua Ju

Recommended Citation

Li Zhiping, Zhang Zhi, Chen Jianxin, Wang Lei, Ju Hehua. Hardware-in-the-Loop Test-bed for Testing of Lunar Rover GNC Based on Vision-in-the-Loop[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 965-972.

第 27 卷第 5 期	系统仿真学报©	Vol. 27 No. 5
2015年5月	Journal of System Simulation	May, 2015

基于视觉闭路的月球车 GNC 半实物仿真测试平台

李志平1,张志1,陈建新1,王磊1,居鹤华2

(1.北京控制工程研究所,北京 100190; 2.北京工业大学电子信息与控制工程学院,北京 100022)

摘要:提出一种基于视觉闭路的月球车 GNC(导航制导与控制)分系统测试的半实物仿真平台。对平 台的构成与数据流进行设计,完成平台的视觉闭路设计,*针对避障相机图像畸变的参数与实际避障* 相机焦距之间的匹配性问题,对投影图像边缘点的畸变忽略。避障相机成像时接收动力学仿真生成 的相机位置、姿态参数,利用多线程方式完成双目视觉模拟,解决了图像与规划路径匹配及快速生 成问题,满足闭环测试的需求。该平台可构建多种测试工况,提高分系统测试的覆盖性和测试效率。 嫦娥三号巡视器在轨长时间的月面正常行走,表明该测试平台在分系统测试中的有效性。 关键词:月球车;半实物仿真;视觉闭路;GNC 中图分类号:V442 文献标识码:A 文章编号:1004-731X (2015) 05-0965-08

Hardware-in-the-Loop Test-bed for Testing of Lunar Rover GNC Based on Vision-in-the-Loop

Li Zhiping¹, Zhang Zhi¹, Chen Jianxin¹, Wang Lei¹, Ju Hehua² (1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

2. School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: A hardware-in-the-loop and vision-in-the-loop test-bed for the testing of the lunar rover guide navigation control (GNC) subsystem was introduced. The composition of the test-bed and its dataflow were delicately designed. *Then the vision-in-the-loop concept was designed. To overcome the problem of matching between the hazard-camera's focus and the images' distortion parameters, the distortion computation on the edge of the image pixels was ignored. Furthermore, to fulfill the closed-loop testing, the stereo vision function was accomplished by using multiple processes that made the images rapidly generated and the cameras' position and attitude parameters were supplied from rover's dynamics. Many testing instances can be constructed by using this test-bed. That will improve the effectiveness and coverage of subsystem testing. The CE-3 lunar rover has been working on the moon flawlessly, which implicates that the test-bed is very effective for the subsystem's grounding test.*

Keywords: lunar rover; hardware-in-loop simulation; vision-in-loop; GNC

引言

嫦娥三号巡视器于 2013-12-02 成功发射, 2013-12-15 开始月面行走与勘察, 截至目前已经完



收稿日期:2014-04-22 修回日期:2014-09-08; 基金项目:国家中长期科技发展规划重大专项项目; 作者简介:李志平(1984-),男,湖南邵阳人,博士 生,工程师,研究方向为卫星控制系统总体设计及 测试。 成了月面工作的既定任务。GNC(导航制导与控制) 分系统的激光探测避障算法在巡视器月面自主行 走探测过程中,成功进行障碍物识别与规避,按 GNC 分系统的技术要求和设计,圆满完成了月球 车的自主行走控制。

作为我国首个地外天体表面巡视器,与典型在 轨飞行的航天器相比较,月球车的 GNC 的自主性 要求较高,需要根据避障相机对月球表面地形的图 像,自主完成障碍检测与识别,进行自主避障的路

第 27 卷第 5 期	系统仿真学报	Vol. 27 No. 5
2015年5月	Journal of System Simulation	May, 2015

径规划,实现月面行走过程中的避障功能。因此, 在地面进行 GNC 软件设计和分系统验证时,需要 对基于双目视觉的自主避障算法进行充分的测试 和验证。

在 GNC 方案设计阶段可以通过一些软件工 具,采用数学仿真技术完成视觉算法的设计与验 证,但在系统实现与验证过程中,软件是运行在实 际的硬件平台中,而且与其他外部实际输入的参数 和时序有关。在航天器设计领域,为了保证分系统 测试过程的真实性与有效性,一般是通过构建真实 场景或采用半实物仿真的方式进行产品的测试和 验证^[1-4]。

采用真实场景,针对月球车而言,需要人工模 拟月面环境,包括地形与光照条件等,另外还得需 要除了综合电子单元之外的巡视器各分系统配合, 对巡视器整器而言,有必要进行真实场景下的整器 试验^[5]。但对分系统产品研制而言,采用真实场景 进行测试主要受几个方面的制约:首先分系统建造 整个巡视器、人造月面环境工程量大、成本高;此 外,利用真实场景,不同月面测试工况设置难度大, 时间长。

采用半实物仿真平台进行 GNC 分系统测试, 是航天器分系统级产品工程测试行之有效的方式。 半实物仿真是指将部分实际被控对象或系统(巡视 器、避障相机等)用高速运行的实时仿真模型来代 替,而控制器(综合电子单元、GNC 软件算法)则采 用真实产品。将分系统真实产品与仿真系统相连, 构成一个半实物仿真系统(Hardware-in-the-Loop Simulation System, HILSS)。由于在回路中接入了 真实的软硬件产品,半实物仿真的试验结果比数学 仿真更接近实际,用部分模型代替了实际被控对 象,半实物仿真降低了对控制器进行测试的成本^[1]。 基于此优势,大部分航天器的分系统级和系统级测 试及试验都采用了半实物仿真技术^[6-8]。

本文针对嫦娥三号巡视器 GNC 视觉导航控制 算法(器)测试,构建了一套基于视觉闭路的半实物 仿真平台。GNC 软件算法运行在真实硬件平台(综 合电子单元)中,采用虚拟现实技术构造出不同环 境工况的月面地形,结合巡视器动力学模型与避障 相机虚拟成像技术,将视觉输入引入控制闭路,完 成 GNC 算法在真实部件运行的测试。一方面,真 实部件的引入,提高了巡视器 GNC 算法测试的真 实性,另一方面,通过对避障相机鱼眼畸变图像的 模拟以及月面环境的仿真模拟,可以构造任意测试 工况(如不同畸变参数图像模型、不同高度、不同 类型的障碍模型等),完成 GNC 视觉算法能力的充 分性测试,提高分系统产品测试效率的同时,降低 测试成本。

1 平台设计约束条件

巡视器不同于以往在轨飞行航天器,要在未知 月球表面完成行走与探测功能,需要巡视器 GNC 分系统在设计时,具备充分的自主能力。GNC 在 自主导航算法设计时,通过避障相机(双目)作为视 觉传感器,实现巡视器的自主探测障碍与自主避障 行走功能,这对中国航天领域来说,是一项崭新的 技术。因此,在分系统产品研制过程中,需要完成 GNC 视觉导航算法的可靠性与充分性测试。

测试过程中,需要将 GNC 视觉导航算法运行 于巡视器综合电子单元,接收外部避障相机图像激 励完成算法的真实运行环境测试。因此,半实物仿 真平台的设计需满足如下功能要求:

(1) 完成 GNC 视觉导航算法的闭环测试;

(2) 避障相机模拟图像输入激励满足星上算 法时序设计与图像畸变要求;

(3) 完成 GNC 视觉导航算法的覆盖性测试(如 障碍大小不同、障碍位置不同工况的测试);

(4) 具备 GNC 故障模式的测试能力。

2 半实物仿真测试平台

巡视器 GNC 算法运行在综合电子单元的中心 计算机模块中,为了保证 GNC 算法测试的有效性 与真实性,降低分系统产品研制成本,提高分系统 产品研制效率,在测试过程中,测试对象采用真实

第 27 卷第 5 期		Vol. 27 No. 5
2015年5月	李志平, 等: 基于视觉闭路的月球车 GNC 半实物仿真测试平台	May, 2015

的综合电子单元产品(控制器),其他传感器激励信 号及控制对象(巡视器),则利用测试设备的模拟器 和测试软件实现。

2.1 测试平台组成

巡视器 GNC 算法半实物仿真测试平台主要包括综合电子单元(星上真实产品,运行 GNC 算法), 巡视器运动学与动力学仿真,视觉图像模拟设备及 测试监控设备。具体组成框图如图 1 所示。



其中测试输入表示根据测试任务与用例形成 的指令计划;测试对象则为综合电子分系统与 GNC 算法软件等器上软硬件产品;动力学仿真系 统完成巡视器动力学仿真,包括巡视器构型模拟 (巡视器机械机构尺寸、各部分的相对安装位置 等)、移动分系统运动学与动力学模拟、结构机构 分系统电机运动模拟(仿真模型见图 2);图像仿真 系统中月面环境模拟采用虚拟现实技术完成不同 月表地形的仿真,如月面陨石障碍、坑型障碍等地 形,视觉图像模拟,则根据仿真动力学输出的避障 相机位置姿态,对模拟的月面地形进行软件成像, 成像参数符合真实避障相机的设计参数,如:视场、 焦距和畸变等,具体实现方式见 3.2 节视觉闭路实现。



图 2 巡视器构型仿真模型

2.2 工作原理及测试流程

由图 1 可知,整个测试平台分为综合电子单元 真实产品与仿真模拟平台两个部分,仿真模拟平台 包括动力学仿真系统与图像仿真系统。仿真模拟平 台与真实综合电子单元产品之间通过 CAN 总线与 LVDS 进行指令和图像传输。测试平台各部分之间 通信接口拓扑如图 3 所示。



图 3 测试平台各系统间数据通讯接口示意图

图 3 中各部分之间的信号传输内容、方式及路 径如表 1 所示。

发送端	接收端	通信方式	内容及响应方式	备注
综合电子单元	动力学仿真系统	CAN	巡视器所有	动力学仿真系统仅响应电机控制指令、电机数
			CAN 消息	据请求指令以及避障相机拍照与下传指令
动力学仿真系统	综合电子单元	CAN	移动分系统电机状态	图像仿真系统接收到综合电子单元电机数据请
			(如速度、角度等)	求指令后,将电机状态进行返回
综合电子单元	图像仿真系统	CAN	巡视器所有 CAN 消息	图像仿真系统仅监听避障相机拍照消息与响应
				图像下传消息
图像仿真系统	综合电子单元	LVDS	图像数据	图像仿真系统监听到下传 CAN 消息后,将准备
				好的图像数据传给综合电子
动力学仿真系统	图像仿真系统	以太网	避障相机当前位置、姿	图像仿真系统接收到该消息后,按照当前状态
			态及拍照标志	进行避障相机成像模拟

表1 测试平台各系统之间信号传输详表

第 27 卷第 5 期	系统仿真学报	Vol. 27 No. 5
2015 年 5 月	Journal of System Simulation	May, 2015

以 GNC 自主规划避障测试任务为例,在测试 进行准备阶段,首先设置好图像仿真系统避障相机 内部参数,确认各系统正常运行后,发送"自主规 划避障指令";综合电子单元通过上行遥控接口接 收到"自主规划避障"指令后(指令内容为巡视器 下一个目标点坐标),运行于综合电子单元的软件 根据接收到的指令,控制 GNC 进入自主规划避障 模式:

(1) 综合电子单元通过 CAN 总线广播发送拍 照指令,图像仿真分系统监听该指令,但不响应。 动力学仿真系统监听到该指令后,将此时避障相机 的位置、姿态与拍照指令信息打包后,通过以太网 通讯,发送给图像仿真分系统。

(2)图像仿真分系统接收到该网络消息后,根据相机的位置、姿态对月面环境成像,等待综合电子单元发送图像下传 CAN 指令。

(3) 图像仿真分系统收到图像下传指令后,将 准备好的避障相机图像通过 LVDS 接口传递给综 合电子单元。

(4) 综合电子单元接收到图像后,GNC 算法进行处理,规划出下个目标点的路径,并进行轮系运动分解,通过 CAN 总线将轮系控制指令发送给动力学仿真系统,动力学仿真系统完成巡视器移动轨迹及轮系状态的输出。

(5) 移动到位后,完成 GNC 视觉避障控制算法的一拍的测试,重新发送拍照指令,进入下一拍 的测试。

GNC 算法每处理一对图像数据,控制巡视器 往前走 0.5 m,直至走到指令规定的目标位置。如 果在行走过程中,图像数据处理显示有无法避过的 障碍,则进行停车。

3 视觉闭路实现

3.1 软硬件实现

视觉闭路主要完成避障相机成像模拟与图像实时生成下传至综合电子单元。硬件上采用一台 HP Z600 计算机与具备 USB 接口 CAN 卡及 PCI 接口的

LVDS 数据传输卡的方式实现,软件采用 VC6.0+OpenGL方式实现,运行在Windows系统下。

3.2 避障相机成像模拟

巡视器视觉自主避障图像采集由安装在车前 的左右两个避障相机完成,采用鱼眼相机镜头。

在地面测试阶段,需要完成避障相机图像的模 拟。避障相机的成像结果与相机位置、姿态以及巡 视器所处的月面地形密切相关。因此,在避障相机 成像模拟过程中,需要解决如下几个问题:

(1) 对模拟月面地形投影成像,并完成鱼眼相 机的畸变;

(2) 根据巡视器动力学模拟结果,计算出避障相 机投影成像时的位置与姿态,并据此位置姿态成像;

(3)为了满足闭路测试的时序要求,需要相机 模拟在规定的时间内完成图像的输出。

在避障相机图像模拟时,根据真实避障相机产 品的畸变模型和参数(主要是径向畸变),对模拟的 月面环境进行成像。利用 OpenGL 技术对月面地形 进行模拟,包括陨石、坑等障碍物的模拟。避障相 机在接收到成像指令后,根据当前的位置与姿态对 模拟地形进行拍照,包括投影成像、鱼眼畸变及图 像输出。避障相机鱼眼成像整个流程如图 4 所示。



图 4 避障相机成像流程

3.2.1 鱼眼成像

重点对相机鱼眼成像畸变过程进行描述。巡视 器避障相机采用的鱼眼镜头视场角 180°,避障相机 图像大小为 1 024×1 024,其成像方式使用等距投 第 27 卷第 5 期 2015 年 5 月

影的鱼眼成像模型。在图像仿真系统中,以附加畸 变改正的球面投影模型作为鱼眼相机的成像模型, 建立球面投影与透视投影的关系。由球面投影的性 质"空间直线在鱼眼图像中为椭圆弧"来计算球面 投影参数。利用球面投影参数,将球面投影图像转 换成针孔成像的透视投影图像。避障相机的具体成 像模型参见文献[9]。

鱼眼相机附加畸变参数得球面投影方程如下 所示:

$$\begin{cases} u' = \frac{\sqrt{f^2 - u'^2 - v'^2}}{f} \\ [-f\frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} + \\ u_0 - \Delta u] \\ v' = \frac{\sqrt{f^2 - u'^2 - v'^2}}{f} \\ [-f\frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} - \\ v_0 + \Delta v] \end{cases}$$

其中: u', v' 为像平面上畸变后的点坐标; u₀, v₀ 为 像平面上畸变之前的点坐标; Δu, Δv 为畸变模型 参数; f 为鱼眼相机焦距; X,Y,Z 为成像点在测 量坐标系中的标示; X_s,Y_s,Z_s 为物镜的中心在测 量坐标系下的标示。

 $\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}$ 为测量坐标系到像空间坐

标系之间的转换矩阵。

在鱼眼成像模型中,假定成像点为空间按任意 一点,考虑的是视场角达到 180°的镜头,对于一 个半球形的鱼眼镜头,成像在镜头边缘的像点对应 的地面点在无穷远处;如5 图所示,假设鱼眼镜头 的成像范围为圆 O,若要求仿真系统成像窗口中影 像部分充满整个画面,则得到的最大图像是鱼眼镜 头成像的内接矩形 ABCD,但此时根据上述公式可 知 A, B, C, D 4 个像点对应的地面点在无穷远处, 因此在球面投影矫正时,图像坐标大小是无穷大, 无法得到这4个点的矫正后坐标。



图 5 鱼眼镜头成像与窗口之间的关系示意图

根据实际避障相机图像大小为1024×1024 和 像元大小为15 μm,为了避免出现无穷大的坐标, 要求 *f* >10.86 mm 而实际相机的焦距为7.34 mm。 所以在进行相机图像模拟程序实现时,对畸变模型 在程序实现时进行简化,即图像的四角不进行像素 灰度的计算,允许图像的4个角出现黑色区域。图 像的效果应该是纵横方向都为1024 像素,以中心 为圆心,呈现一个圆形的分布状态。

避障相机视角及鱼眼最终成像结果如图6所示。



(a) 左避障相机图像



(b) 右避障相机图像图 6 避障相机模拟图像

第 27 卷第 5 期	系统仿真学报	Vol. 27 No. 5
2015年5月	Journal of System Simulation	May, 2015

3.2.2 图像快速生成

巡视器避障相机在设计时,通过调节积分时间 档位(曝光时间)完成图像亮度的调节,不同的积分 时间档位,对应的图像采集时间不同。具体采集时 间与积分时间档位对应表如表 2 所示)共 255 档,本 文仅例举常用的积分时间档)。

表っ	相机采集时间与积分档位对应表	
1X Z	咱们不来时间司你刀臼也对应衣	

序号	积分时间档位	图像采集时间/ms
1	127	566
2	160	1 132
3	200	3 632
4	226	4 530
5	255	9 060

在 GNC 算法测试过程中,不需要对相机成像 性能(积分时间的档位)进行测试。但视觉闭路的引 入,除了需解决避障相机畸变成像模拟外,还需完 成图像的快速生成,保证避障相机模拟成像在时间 满足星上控制算法设计的时序要求。即图像生成的 时间最少得满足在最大积分时间档位设置时,能够 处理完成图像的模拟成像及输出。测试过程中,综 合电子单元从发出相机采集 CAN 消息,到图像下 传指令之间的时间间隔有明确的规定(可由积分时 间档位设定)。如果在下传指令到来之前,避障相机 模拟成像未完成,将导致测试失败。

在对避障相机进行模拟成像时,大部分时间消 耗在鱼眼变形及图像畸变的处理过程。为保证图像 生成的实时性,除采用高配置的计算机图像显卡外, 在算法上进行优化。

首先,编程实现时,利用多线程编程方法,左 右避障相机图像进行成像过程采用分别独立的线 程,图像存储本地采用另一个线程实现,主界面显 示及通讯接口采用一个线程。

其次,将月面地形模拟与相机成像模拟分别利 用不同的计算机实现,如图4所示(月面地形仿真系 统、相机模拟系统),采用分布式计算方法,通过网 络通讯实现地形信息、巡视器位置、姿态信息的交 互,并周期更新相机成像模拟的视场。

3.3 GNC 故障模式的模拟

基于视觉闭路的半实物仿真平台,除了能够完成 GNC 分系统正常的功能性能测试外,还能够完成相关 GNC 故障模式的模拟。针对 GNC 的视觉导航算法,主要的故障模式如下:

(1) 与 GNC 相机通讯故障,包括 CAN 通讯故障、LVDS 数据传输故障;

(2) GNC 相机采图故障,如双目相机一个相机 成像无效(全黑或全白)等;

对于上述故障模式的模拟,该平台可以通过软件设置,非常方便地进行模拟,如 CAN 通讯故障, 软件可以设置故障模式,当处于故障模式选择时, 不响应 CAN 通讯信息即可,对于 LVDS 数据传输 故障,模拟实现时,直接将 LVDS 板卡输出使能设 为禁能;模拟一个图像有效,另一个图像无效,只 要在 LVDS 图像输出时,直接替换相应图像为无效 图像即可。

4 试验结果

在 GNC 视觉自主导航算法测试过程中,需完成不同月面地形工况的测试(障碍在左边、右边、中间、可越过障碍与无法避障情况的测试等)。针仅对可越过障碍、左前方有障碍与左避障图像缺陷故障模式进行了用例设计,并给出测试结果,验证该平台的正确性。

测试过程中,将避障相机积分时间选择为 200 档(最大 255 档),根据产品设计指标,积分时间在 200 档时,图像下传指令与采集指令之间的时间间 隔大约为4 s 左右。针对表 3 中 3 个测试用例,具 体测试结果如下文所述。

表 3 测试用例设计

	100	
序号	测试用例	备注
1	可越过障碍	障碍高度 150 mm
2	左侧有障碍	障碍高度 300 mm
3	左避障图像	在巡视器运行过程中,将左避
	缺陷	障相机图像设为全黑输出

第 27 卷第 5 期 2015 年 5 月

李志平,等:基于视觉闭路的月球车 GNC 半实物仿真测试平台

Vol. 27 No. 5 May, 2015

图 7 表示在正前方设置障碍为可越过障碍时 (月面巡视器可越过障碍的高度为不超过 150 mm), 巡视器目标点设置为(5 m, 0),仿真结果表明,巡 视器能够跨越障碍直行。图 8 表示在巡视器左前方 设置不可越过障碍(障碍物高度为 300 mm),在自 主规划避障策略中,巡视器能够以一定的曲率绕过 障碍物,并最终达到指定目标点。图 9 表示当巡视 器在行进过程中,左避障相机成像障碍,无图像输 出时的行进路径:在发生无图像故障后,巡视器立 即停止行进,并反馈给地面障碍信息。



(a) 右前轮越过障碍



(b) 右中轮越过障碍



(c) 右后轮越过障碍 图 7 可越过障碍测试



(a) 自主避障开始



(b) 自主避过障碍图 8 左侧有障碍





(a) 左相机图像故障

(b) 右相机正常图像



(c) 探测到障碍停止图 9 左右避障相机成像效果及巡视器行进轨迹

第 27 卷第 5 期	系统仿真学报	Vol. 27 No. 5
2015年5月	Journal of System Simulation	May, 2015

5 结论

将视觉闭路引入分系统半实物仿真平台,实现 了避障相机鱼眼成像模型,并对相机的相关畸变参 数进行了模拟,为 GNC 图像处理算法测试真实性 提供了保障条件,有效地解决了分系统产品测试过 程中软件功能模式动态测试问题,提高了产品测试 效率与有效性。该平台成功应用于嫦娥三号巡视器 GNC 分系统的测试,在分系统产品研制过程中得 到了反复的试验验证。

参考文献:

- [1] 赵群. 半实物仿真中的模块化建模与实现方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010: 1-6.
- [2] 全伟,房建成. SINS/CNS 组合导航半实物仿真系统及 其实验研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(15): 3414-3418.
- [3] A Somanathan, Srinivasarao Lakkoju, Murali Krishna Bhagavan G, P Natarajan. Spacecraft Motion Simulator and Associated Modeling for Realistic Hardware-In-Loop Simulation [C]// Proceedings of the 1th International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms. India: ITT Roorkee, 2013: 301-305.

- [4] Hans Kruger, Stephan Theil. TRON-Hardware-in- theloop test facility for lunar descent and landing optical navigation [C]// IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Nara-ken Shinkokaido, Japan, 2010. 265-270.
- [5] 顾征,任德鹏.国外星体表面巡视探测器地面试验方法分析 [J]. 航天器工程,2010,19(5):117-125.
- [6] 蒙涛,郁发新,金仲和,等.皮卫星姿态确定与控制系统的半实物仿真 [J]. 宇航学报,2007,28(5):1156-1160.
- [7] 王峰,徐国栋,耿云海,等. 基于微型核信息电子系统卫星姿态控制半实物仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1131-1135. (Wang Feng, Xu Guodong, Geng Yunhai, *et al.* Hardware-in-the-loop Simulation of Satellite Attitude Control Based on Information Electronic System of Microkernel [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(5): 1131-1135.)
- [8] 郭叔伟,董杨彪,王海涛,等.载人航天器回收着陆 半实物仿真系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(3):
 621-625. (Guo Shuwei, Dong Yangbiao, Wang Haitao, *et al.* Research on Hardware-in-the-Loop Simulation for Recovery and Landing System of Manned Spacecraft [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2010, 22(3): 621-625.)
- [9] 王保丰, 毛晓艳, 唐歌实. 月球车鱼眼相机的标定方 法研究 [J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 933-939.

《系统仿真学报》荣获"2014 中国最具国际影响力学术期刊"证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中 心,以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源,首次研制发布了 2012《中国 学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报)。第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、 影响因子、半衰期等各项国际引证指标,并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序,发布了 "中国最具国际影响力学术期刊"(排序 TOP5%)和"中国国际影响力优秀学术期刊"(排序 TOP5-10%), 在国内外学术界产生了较大反响。之后,2013 年版年报,将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前, 2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成,《系统仿真学报》被列入"2014 中国最 具国际影响力学术期刊"行列。

我学报连续2年被列入TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊,走向世界,进入国际一流, 指日可待!