

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.05.034

马经纬, 樊博, 江山, 等. 空间视觉测量相机地面检测及显示系统 [J]. 机电工程技术, 2024, 53 (05): 154-158.

空间视觉测量相机地面检测及显示系统*

马经纬, 樊博*, 江山, 姜金辰, 武治国

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为了给空间视觉测量相机的研制提供测试环境, 充分测试空间视觉测量相机的功能及性能, 基于相机的工作特点和实际测试需求, 设计了空间视觉测量相机的地面检测及显示系统。地面检测及显示系统由一台高性能计算机、一台图像接收设备、图像显示软件和通信软件组成, 适用于空间视觉测量相机单机、环境试验等多种情况测试。通信软件采取分布式设计, 分为1个中心服务器软件、4个客户端软件; 软件采用MFC架构, 多线程方式运行, 软件间采取TCP/IP协议进行通信。其中中心服务器软件负责与相机之间进行通信, 通信协议为RS422; 4个客户端软件分别实现对相机的指令控制、遥测数据的显示及监测、自动运行及在轨更新功能验证。经过多次单机测试及超过400 h的环境试验测试, 空间视觉测量相机地面检测及显示系统运行稳定, 对相机的各项功能及性能均能实现测试覆盖, 能够满足相机研制过程中的各项测试及试验需求, 提高了相机研制的测试效率。

关键词: 空间视觉测量相机; 地面检测及显示系统; 分布式软件; 实时监测

中图分类号: TP27

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492(2024)05-0154-05

Ground Detection and Display System for Space Vision Measurement Camera

Ma Jingwei, Fan Bo, Jiang Shan, Jiang Jinchen, Wu Zhiguo

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

Abstract: In order to provide a testing environment for the development of space vision measurement cameras and fully test its functions and performance, a ground detection and display system for space vision measurement cameras is designed based on the camera's working characteristics and actual test requirements. The ground detection and display system consists of a high-performance computer, an image receiving device, image display software and communication software. It is suitable for testing in various situations such as single-machine testing and environmental tests. The communication software use distributed layout and consists of a central server software and four client software. The software adopts MFC architecture and runs in multi-thread mode, and the TCP/IP protocol is used for communication between software. The central server software is responsible for communicating with the camera, and the communication protocol is RS422. The four client software respectively implement command control, telemetry data display and monitoring, automatic operation and verification of on-orbit update of the camera. After multiple single machine tests and over 400 h of environmental testing, the space vision measurement camera ground detection and display system operates stably and can achieve test coverage of various functions and performances of the camera. It can meet various testing and experimental requirements in the camera development process and improve the efficiency of the camera development.

Key words: space vision measurement camera; ground detection and display system; distributed software; real-time monitoring

0 引言

近年来, 随着我国空间站建设及太空技术的探索, 空间站设备及卫星载荷迎来了爆发式的发展^[1-2], 空间视觉相机作为空间飞行器载荷的一种, 具有在轨测量、在轨监视、在轨引导等功能, 并能够实时传输图像及测量数据, 是空间机械臂^[3-4]、对接机构^[5]、卫星平台等航天器的重要组成部分。

作为空间设备及载荷的重要组成部分, 地面测试与验证系统具有重要的作用^[6], 稳定可靠的地面测试系统不仅能够对空间设备的各像功能性能指标进行覆盖性测试, 也广泛地应用在了空间设备的各项环境试验及综合测试中, 保障了空间设备的研制及试验进度。

本文根据空间视觉测量相机的工作特点, 设计并实现了空间视觉测量相机地面检测及显示系统, 系统通过模拟相机所在卫星的数管计算机的通信及图像传输的协议和时序, 实现对空间视觉测量相机的图像下传显示、实时通信、遥测数据监测、在轨更新等功能的测试。系统使用图像接收盒和图像显示软件完成空间视觉测量相机图像数据的打包及解码显示; 使用通信软件完成相机实时通信功能的测试; 由于相机整星测试时采用网络连接通信方式, 因此为了满足整星试验时的环境要求, 通信软件采用分布式设计^[7], 基于多线程思想^[8-9], 由一个中心服务器软件和4个客户端软件组成, 覆盖了相机的所有通信功能。软件在设计时, 充分考虑了复用性及

基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目 (20200404155YY)

收稿日期: 2024-03-18

可自定义性, 对于遥测数据选择性显示及指令编辑等方面均采用配置文件形式进行加载, 以方便用户根据不同场景及测试环境进行随时修改。硬件采用成熟的商用器件^[10], 极大增强了地面检测及显示系统的可靠性, 并提高了研制效率。

1 系统构成及原理

1.1 空间视觉测量相机工作原理

图1所示为空间视觉测量相机原理, 它主要由成像单元、图像处理单元、测量单元和通信单元构成。相机工作时, 成像单元负责对场景目标进行成像; 图像处理单元负责对图像进行压缩处理; 测量单元负责对合作目标进行位姿测量, 获取相对位姿数据; 通信单元负责与卫星数管计算机之间通信, 下传相机的图像数据及遥测数据, 并获取相机控制指令; 卫星数管计算机获取到相机的图像数据和遥测数据后将其传送到地面控制中心。

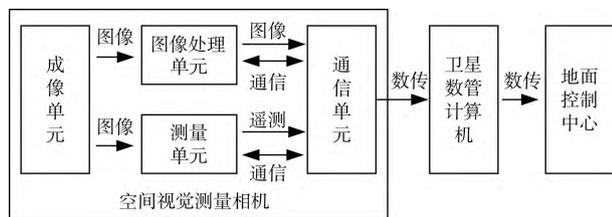


图1 空间视觉测量相机工作原理

相机的图像数据包括压缩图像及原始图像, 相机通过LVDS方式将图像数据传送给卫星数管计算机, 传输速率为20 Mb/s, 卫星数管计算机将图像数据按照规定传输协议进行打包, 下传到地面控制中心。相机遥测数据包括相机的测量数据、工作状态、工作模式等数据, 传输协议为RS422, 卫星数管计算机每500 ms获取一次遥测数据, 并下传到地面控制中心。

1.2 空间视觉测量相机地面检测及显示系统

为了在地面全面地测试空间视觉相机得到功能机性能, 保证相机在轨正常运行及执行任务, 根据相机的工作特点, 设计了空间视觉相机地面检测及显示系统。

空间视觉相机地面检测及显示系统主要组成如图2所示。系统由1台图像接收盒、1台高性能计算机、图像显示软件和通信软件组成。为满足整星综测环境要求, 通信软件采取分布式设计, 即服务器加客户端方式, 软件之间采用TCP/IP协议进行通信。

图像接收盒负责模拟卫星数管计算机图像传输功能, 将空间视觉测量相机输出的LVDS图像数据按照规定传输协议进行打包并传输; 图像显示软件接收下传的图像数据并进行显示及存储; 通信软件中, 中心服务器软件模拟卫星数管计算机的通信功能, 按照规定的通信时序和通信协议与相机之间进行通信; 数据监测子软件用于解析相机下传的遥测信息并实时显示; 指令控制子软件

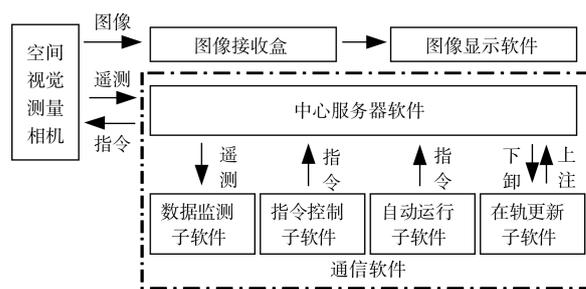


图2 地面检测及显示系统原理

按照规定指令格式发送相机控制指令; 自动运行子软件负责将编辑好的相机指令集按照固定时间间隔进行发送, 完成相机在特定场景下的自动测试; 在轨更新子软件用于测试相机的在轨更新功能。

2 系统硬件设计

空间视觉测量相机地面检测及显示系统硬件上由1台图像接收盒、1个USB转RS422设备和1台高性能计算机组成。

图像接收盒核心板型号为ALINX-AC7020, 处理器为Zynq7000的XC7Z020-2CLG400I芯片; 外部接口包含LVDS差分的IO接口, 千兆以太网口, USB2.0接口及SD卡接口等。空间视觉测量相机的LVDS图像数据由IO接口输入, 按照规定传输协议对图像数据进行打包, 然后通过千兆以太网口, 以TCP/IP协议传输给高性能计算机, 图像接收盒最多支持4路图像传输。USB转RS422设备型号为ZTEK-USB2RS422, 波特率支持300~1M baud, 满足使用需求。高性能计算机为地面检测软件及图像显示软件的运行平台, 主要接收相机的图像数据和遥测数据, 同时向相机发送指令。

3 系统软件设计

空间视觉测量相机地面检测及显示系统软件主要分为两个部分: 图像显示软件及通信软件。通信软件包含1个中心服务器软件和4个客户端子软件: 数据监测子软件、指令控制子软件、自动运行子软件和通信软件^[11]。通信软件之间采用分布式设计, 互相独立。支持界面可配置、指令可编辑, 增加了软件的使用灵活性及复用性。

3.1 图像显示软件

图像显示软件负责接收图像接收盒发送的图像数据, 按照规定协议解码并将图像数据实时显示, 需要时也可将图像数据实时存储, 软件工作流程如图3所示。

图像软件工作时, 首先与图像接收盒连接, 接收空间视觉测量相机的图像数据, 并按照固定协议格式对数据进行解析, 由于空间视觉测量相机下传的图像数据有压缩码流和原始图像两种, 所以数据解析后需要对图像数据类型进行判断, 对于压缩码流数据, 软件使用DX-

VA方式对其进行快速解码^[12],获取图像,为满足图像传输及显示速度要求,解码后的图像送入GPU,使用Direct X 3D直接送显^[13];对原始图像数据则省略解码步骤,直接进行显示。对应于图像接收盒,图像显示软件也支持最多4路图像同时显示;软件具有存储图像数据功能,在软件界面上勾选存储,则会直接存储当前显示的图像内容;对于压缩码流数据,存储格式为H.264码流数据;对于原始及图像数据,存储格式为bmp图像。

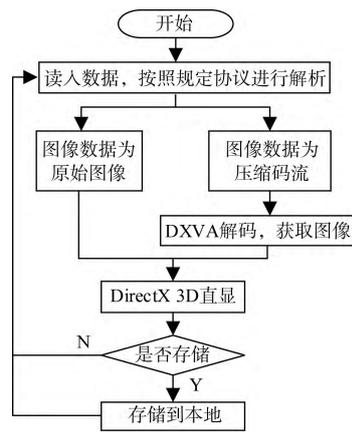


图3 图像显示软件工作流程

3.2 中心服务器软件

中心服务器软件的主要功能包括以下两个方面。

(1) 与相机通信功能

模拟卫星数管计算机的通信时序及通信协议,与空间视觉相机之间进行通信,验证相机通信的正确性。

空间视觉相机与中心服务器之间通信指令主要有常规遥测查询指令,相机返回的遥测数据,突发指令和相机的指令反馈。常规遥测查询指令发送周期为500ms,用于循环查询相机的遥测信息;相机接收到遥测查询指令返回遥测信息,包括相机的工作模式、测量数据、相机参数、工作温度等信息。突发指令为对相机发送的控制指令,如积分时间设置、成像模式设置、测量开始及结束等。相机的指令反馈为相机对突发指令的反馈,用来表示指令是否接收成功。中心服务器软件的通信时序如图4所示。

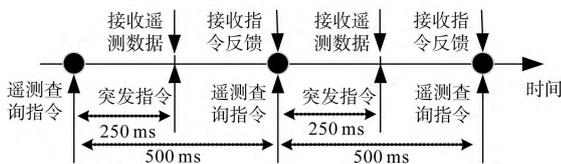


图4 中心服务器软件通信时序

(2) 与其他客户端软件通信功能

中心服务器软件作为服务器端,其他功能软件作为客户端,以TCP/IP协议进行通信。

中心服务器软件将接收到的相机遥测信息发送给数据监测软件,由数据监测软件对遥测信息进行实时显示及存储;同时中心服务器软件实时监测是否收到指令控制软件发送过来的突发指令,若有,则按照通信时序发送给相机端,并接收相机的指令反馈信息,对每一条指令反馈信息进行存储,形成相机控制的日志文件。此外,中心服务器软件还负责与在轨更新软件进行通信,若相

机进行在轨更新时,中心服务器负责将相机下卸的数据发送给在轨更新软件,同时将在轨更新软件上注的更新文件发送到相机端。中心服务器软件工作流程如图5所示。

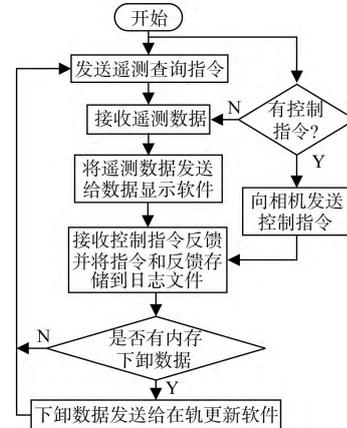


图5 中心服务器软件工作流程

3.3 数据监测子软件

数据监测软件负责将相机发送的遥测数据进行显示^[14-15]。软件运行后,首先加载显示配置文件,配置文件中用户可以编辑显示区域的数据,根据当前需要监测的遥测量进行自定义配置;然后连接到中心服务器软件,接收服务器发送的空间视觉相机遥测数据;软件显示界面将用户自定义配置的数据进行显示,显示区域横轴为时间,数据以曲线形式进行不断更新显示,用户既可以实时观测到最新的数据,也可以查看历史数据。软件界面上显示的数据会自动存储到本地,以方便事后处理和回放查看。

3.4 指令控制子软件

指令控制子软件负责向空间视觉相机发送控制指令。软件运行后,先连接到中心服务器软件,然后加载指令配置文件,配置文件为csv格式,文件中每一个指令行都包含了指令名称、指令功能、指令内容及备注信息,使操作者一目了然;加载指令文件后,先将指令发送到软件缓存并在界面上显示,方便用户对指令进行确认,确认无误后再进行发送,以防止指令误发送。软件以读取配置文件的形式加载控制指令,为指令编辑、临时更改提供了灵活的操作空间,同时增强了软件的复用性。

3.5 自动运行子软件

自动运行软件主要用于相机的自动测试^[16-17],软件可以按照设置的时间间隔和循环次数此时将加载的配置文件中所有的指令发送给相机。软件运行后,首先连接到中心服务器软件,然后加载指令配置文件,设置指令发送时间间隔和循环次数,软件开始以设置的时间间隔和循环次数循环向相机发送指令。自动运行软件主要应用在相机的自动测试和环境试验中,大大提高了相机的测试效率。

3.6 在轨更新子软件

在轨更新软件主要用于对相机指定内存处的数据进

行上注更新。软件运行时需要连接到中心服务器软件, 更新数据之前, 需要将要更新的内存里的数据下载到本地进行本分存储, 然后读取将要上注到相机内存中的二进制文件, 对文件进行拆分并将二进制数据以在轨更新协议进行编辑, 然后以上注指令的方式发送给中心服务器软件, 再由中心服务器软件上注到相机中。

4 测试及试验结果

4.1 单机测试

传在空间视觉测量相机的功能及性能测试中, 使用空间视觉测量相机地面检测及显示系统对相机进行了各项指令测试并实时观测相机的遥测及图像数据, 测试环境如图6所示。

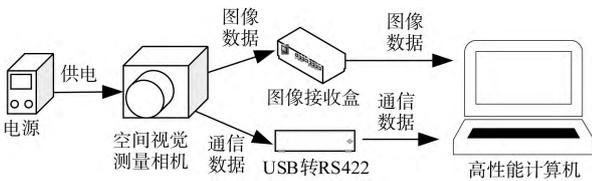


图6 空间视觉相机测试环境

测试过程中, 使用图像显示软件对相机采集到的图像数据进行显示及存储, 软件工作界面如图7所示; 软件运行稳定, 4个通道两种图像模式下图像显示均正常, 无卡顿、丢帧现象, 图像存储功能正常。



图7 图像显示软件界面

中心服务器软件运行稳定, 指令发送与遥测数据的接收均能按照规定的时序进行, 日志文件能够正常存储

发送的指令及相机的指令反馈, 存储的日志文件如图8所示。

```
[2024-January-31 Wednesday, 20:50:42] EB 90 1E 00 0E 10 C1 C0 00 00 07 50 01 35 06 11 55 85 85 C0
[2024-January-31 Wednesday, 20:50:43] EB 90 E1 00 01 AA 8C
[2024-January-31 Wednesday, 20:50:47] EB 90 1E 00 0E 10 C1 C0 00 00 07 50 01 35 06 11 55 8E 8E D2
[2024-January-31 Wednesday, 20:50:48] EB 90 E1 00 01 AA 8C
[2024-January-31 Wednesday, 20:50:50] EB 90 D2 00 01 AA 7D
[2024-January-31 Wednesday, 20:50:58] EB 90 1E 00 0E 10 C1 C0 00 00 07 50 01 35 06 11 55 9D 9D F0
[2024-January-31 Wednesday, 20:50:58] EB 90 E1 00 01 AA 8C
[2024-January-31 Wednesday, 20:51:00] EB 90 D2 00 01 AA 7D
[2024-January-31 Wednesday, 20:51:04] EB 90 1E 00 10 10 C1 C0 00 00 05 01 95 08 11 55 81 00 00 00 9D
[2024-January-31 Wednesday, 20:51:04] EB 90 E1 00 01 AA 8C
```

图8 指令日志文件示意图

数据监测软件测试时软件运行稳定, 遥测数据能够实时显示, 界面自定义配置、自动存储、回看等功能均正常。数据检测软件运行界面如图9所示。

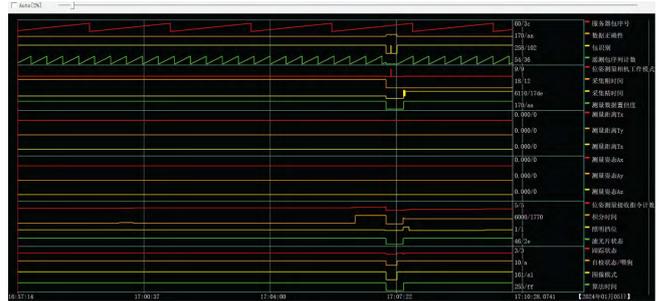


图9 数据监测子软件界面

指令控制子软件工作稳定, 指令通过文件形式加载, 指令条数可根据实际测试要求灵活调整, 指令控制子软件运行界面如图10所示。

图10 指令控制子软件界面

在轨更新软件工作正常, 能够对相机指定的内存地址中的数据进行下载备份及上注更新, 经过在轨更新数据大小从几个字节到64 kB的多次测试, 软件在下载及上注过程中数据均无错误, 充分验证了相机的在轨更新功能, 在轨更新软件运行界面如图11所示。

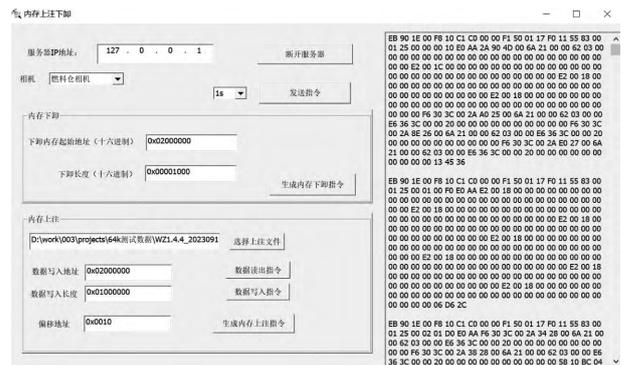


图11 在轨更新子软件界面

4.2 环境试验测试

除了单机的测试，空间视觉测量相机地面检测及显示系统还广泛应用在相机的各项环境试验中^[18-20]。为了降低环境试验中试验人员的操作难度，使用自动运行子软件代替指令控制子软件进行相机控制指令的发送，其他软件正常运行。自动运行子软件界面如图12所示。



图12 自动运行子软件界面

空间视觉测量相机环境试验中，地面检测及显示系统各个硬件及软件运行正常，充分保障了相机在各种环境下的测试验证。表1统计了各项环境试验中地面检测及显示系统的运行时长及指令数量。

表1 地面检测及显示系统环境试验运行统计

环境试验	试验时间/h	测试次数	发送的指令条数
老化试验	206	10	200
热真空试验	65	19	380
热循环试验	76	35	700
温度梯度试验	78	78	1560
总计	425	142	2840

5 结束语

空间视觉测量相机地面检测及显示系统对空间视觉测量相机的图像显示、遥测数据监测、指令控制及在轨更新功能均实现了有效测试，同时还具有自动化测试功能，减少了人员重复劳动。系统通信软件采用分布式设计，各功能子软件互相独立；软件可通过加载配置文件的方式对相机控制指令和遥测显示界面进行自定义配置，通用性及复用性强。在空间视觉测量相机单机测试及超过400 h的环境试验中，地面检测及显示系统运行流畅，图像接收及通信均十分稳定，系统发送的近3 000条指令均被相机正确接收并执行，各项遥测参数也实现了实时监测及存储，使相机在投入在轨任务前得到了充分的测试验证，大大提高了相机的研制效率。

参考文献:

[1] 周建平.我国空间站工程总体构想[J].载人航天,2013,19(2):1-10.

[2] 景海鹏,辛景民,胡伟,等.空间站:迈向太空的人类探索[J].自动化学报,2019,45(10):1799-1812.

[3] 谭启蒙,贾馨,陈磊,等.空间机械臂可见光测量相机参数标定技术研究[J].航天返回与遥感,2018,39(5):113-122.

[4] 李金健,胡权.事件相机驱动的空间机械臂视觉伺服[J].空间控制技术与应用,2023,49(3):28-35.

[5] 于颀,丛明煜,段佳佳,等.星箭对接环抓捕点单目视觉导航方法[J].仪器仪表学报,2018,39(12):228-236.

[6] 李刚,程博,崔娟,等.面向航天器地面测试的双参量同步采集与无线传输系统设计[J].测试技术学报,2023,37(6):497-506.

[7] 冯志强,李宗德,纪春国,等.卫星多体制测控地面测试系统设计[J].计算机测量与控制,2023,31(1):1-7.

[8] 王德江,匡海鹏,周刚,等.一种红外探测器的图像采集系统[J].液晶与显示,2009,24(3):429-433.

[9] 王永成,王金玲,宋克非.月基极紫外相机图像采集与实时显示系统[J].液晶与显示,2013,28(3):435-439.

[10] 吉经纬,李琳,于歌,等.空间站科学实验载荷通用地面检测系统设计[J].测控技术,2021,40(4):70-75.

[11] 杜景林,朱兴宇.多组件融合的WRF模式气象数据可视化平台[J].计算机工程与设计,2015,36(9):2578-2584.

[12] 杨宏伟,韩福财,艾华龙.ARINC818视频总线信号测试方法研究[J].计算机测量与控制,2022,30(10):22-26.

[13] 孙立明.支持国产飞腾1500A处理器的计算机图形显示系统优化与实现[D].长沙:国防科学技术大学,2019.

[14] 向丰,何旺,董洋,等.航空发动机参数自动判读和监控系统设计[J].机电工程技术,2022,51(8):149-152.

[15] 薛盼盼,王晓东,曲洪丰.极紫外光子计数成像仪图像快显系统设计及实现[J].激光与红外,2011,41(12):1378-1382.

[16] 杨箴,吴方权.基于SOA的协同系统自动化测试技术研究[J].机电工程技术,2021,50(7):90-93.

[17] 马贤颖,刘文红,夏焯.航天测控系统遥控软件自动化测试仿真平台研究[J].系统仿真学报,2014,26(4):823-829.

[18] 陈靖.天巡一号微小卫星正样星结构设计与力学环境试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.

[19] 汪静,贾旭.资源一号02B卫星分系统间抗电磁干扰的措施(英文)[J].航天器工程,2008,17(6):54-58.

[20] 潘增富,李国强,胡金刚.卫星分舱热真空试验方法[J].中国空间科学技术,2005(3):40-45.

作者简介:

马经纬(1988—),男,吉林长春人,硕士,研究领域为航天相机图像处理,已发表论文1篇。

江山(1986—),男,吉林长春人,博士,研究领域为图像处理、人工智能。

武治国(1978—),男,吉林长春人,博士,研究领域视觉测量,深度学习。

※通讯作者简介:樊博(1987—),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士,研究领域为航天相机系统设计。