

## 空间非合作目标半物理仿真地面验证系统

李荣华, 张建禹, 郑宇锋, 邓 源

(大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要:** 针对非合作目标线阵雷达成像点云数据获取过程中在轨验证试验成本高、空间环境复杂和控制难等问题, 以非合作目标三维重建数值模拟为基础, 研制模拟空间服务航天器绕飞采集过程半物理仿真地面验证系统。采用 KUKA 六轴机械臂搭载缩比卫星模型, 还原非合作目标的运动状态, 并利用三轴精密转台搭载线阵扫描雷达实现非合作目标可测部位数据采集, 通过综合控制系统完成目标扫描及数据处理。利用该半物理地面验证系统, 开展缩比比例为 1 : 10 的非合作目标多视角数据采集试验; 通过建立分辨率精度评估、吻合度评估和实际运动与控制运动的误差分析准则, 进行评估试验。试验结果表明: 该系统可以有效获取多视角状态下非合作目标的点云数据, 根据点云数据测量计算的目标章动运动角度与目标真实运动角度误差在 4% 以内, 可为未来空间在轨操控与三维重建技术提供真实的技术数据参考。

**关键词:** 非合作目标; 姿态模拟; 目标提取; 半物理仿真; 地面验证系统

**中图分类号:** V448.2      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20211115

## Semi-physical simulation ground verification system for space non-cooperative targets

Li Ronghua, Zhang Jianyu, Zheng Yufeng, Deng Yuan

(School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** In the process of acquiring point cloud data from non-cooperative target linear array lidar imaging, in-orbit verification test costs are high, the space environment is complex, and control is difficult. Based on the numerical simulation of 3D reconstruction of non-cooperative targets, a semi-physical simulation ground verification system is developed to simulate the acquisition process of spacecraft orbiting spacecraft. The KUKA six-axis robotic arm is equipped with a scaled-down satellite model to restore the motion state of the non-cooperative target, and the three-axis precision turntable is equipped with a linear scanning lidar to realize the data collection of the measurable parts of the non-cooperative target. The target scanning and data processing are completed through the integrated control system. This semi-physical ground verification system is used to carry out multi-view data acquisition experiments of non-cooperative targets with a scale ratio of 1 : 10, conduct evaluation experiments by establishing resolution accuracy evaluation, fit evaluation, and error analysis criteria of actual motion and control motion. The experimental results show that the experimental system can effectively obtain the point cloud data of non-cooperative targets in the multi-view state, and the error between the target nutation motion angle calculated based on the point cloud data measurement and the target's true motion angle is

收稿日期: 2021-12-28; 修订日期: 2022-03-13

基金项目: 辽宁省百千万人才工程项目; 辽宁省教育厅科学研究重点项目 (LJKZ0475)

作者简介: 李荣华, 男, 教授, 博士, 主要从事非合作目标三维位姿测量技术等方面的研究。

within 4%. It can provide real technical data reference for future space on-orbit manipulation and 3D reconstruction technology.

**Key words:** non-cooperative goal; posture simulation; target extraction; semi-physical simulation; ground verification system

## 0 引言

近年来,随着空间航天器数量呈指数级增长,对空间抓捕、碎片清理、轨道加注等在轨操作任务的需求越来越迫切<sup>[1-2]</sup>。实现对缺乏先验信息的空间翻滚非合作目标的三维重建和位姿测量是完成上述空间操作及在轨服务的先验条件。由于缺少相关的几何构型等先验知识,也没有可用于合作的人工标记,给目标三维重建和位姿测量工作带来了很大的挑战<sup>[3]</sup>。激光成像雷达具有工作距离长、工作频率高、波束窄、距离和角度测量精度高、受光照条件影响小等诸多优势,满足空间应用上的迫切需求,可应用于近距离空间目标的在轨维护服务和空间操控数据获取,为我国后续开展相关工程应用提供技术数据参考<sup>[4-5]</sup>。

在非合作目标三维重建与位姿测量领域,获取能真实反映被测目标表面构型的信息点云数据,可以有效保留目标表面的显著特征,对于提高后续三维重建与位姿测量算法的精度和可靠性具有重要意义。郭新程等<sup>[6]</sup>针对微小卫星逼近观测未知的空间翻滚非合作目标星任务,提出一种基于单目视觉的目标星相对状态的估计方法。但该方法依赖于目标星固有特征的提取和跟踪,且空间光照条件的变化会影响相机成像精度,从而使得观测噪声统计特性发生变化。蔡静怡等<sup>[7]</sup>设计并实现了一种基于 Kinect v2 的简单快速、低成本实现三维重建的系统,该系统使用 Kinect v2 传感器获取不同视角的多片点云,只能实现单个静态物体的三维重建且目标的运动形式只有一轴旋转运动。刘玉等<sup>[8]</sup>开展了基于激光成像雷达的非合作目标相对位姿测量技术研究,给出了基于激光雷达的航天器相对位姿测量技术流程与点云配准算法,最后利用仿真试验数据来验证相对位姿测量精度。王帅等<sup>[9]</sup>在研究多视角激光点云的配准时,提出了一种基于区域分割的重叠区域提取方法,通过利用 Stanford 的 Bunny 多视角激光点云和 TOF 相机实际采集的点云数据测试所提算法,但 TOF 相机得到的点云噪声

较大且离群点较多。卢祺等<sup>[10]</sup>通过对激光雷达获取的目标三维点云进行聚类,得到小规模、特征明显的聚类点云,试验所用的激光雷达点云是通过仿真扫描得到的。课题组前期<sup>[11]</sup>探究线阵激光雷达成像机理,提出基于双切片法的目标可测区域提取机制,实现线阵激光雷达对空间失稳目标的驻留观测扫描,所获得点云数据依赖仿真试验。尹芳等<sup>[12]</sup>针对模型未知的空间非合作旋转目标的模型重建和位姿估计问题,提出一种基于位姿图优化的 SLAM 技术框架。并通过仿真试验和地面验证试验来验证重建算法的精度,所用的目标卫星运动简单,与真实的非合作目标的运动状态还有差距。半物理仿真试验技术是随着武器以及航天技术领域的研究迅速发展起来的,能为这些测试提供最为接近真实环境的试验方案<sup>[13]</sup>。该技术已广泛应用到众多领域,产生了形形色色的半物理试验产品。如飞行模拟器,它通过模拟空中的环境和复现飞行器在空中的飞行状态,为飞行员提供地面操纵平台,降低飞行员培训风险,提高了培训效率<sup>[14]</sup>。

综上所述,文中针对非合作目标线阵雷达成像三维重建与位姿测量点云数据获取问题,在非合作目标三维重建的数值模拟基础上,研制一套能模拟空间服务航天器对非合作目标进行绕飞采集过程的半物理仿真试验平台。使用 KUKA 工业机器人搭载非合作目标,并通过 A1 轴和 A6 轴的旋转来模拟章动运动,依靠改变其他轴的状态来实现不同工况下的章动运动模拟输出;同时,利用三轴转台带动 M8 线阵激光探测器进行线阵扫描;将采集到的点云利用包围盒算法进行降噪和目标提取,为有效评估所采集数据的有效性和真实性,建立了分辨率评估、尺寸吻合度和子系统间运动反映关系评估准则,并利用该系统进行数据采集试验来测试系统性能。

## 1 系统组成及状态

空间非合作目标半物理仿真地面验证系统是复现空间服务航天器对非合作目标进行绕飞扫描过程

的模拟系统。主要用来模拟服务航天器搭载激光雷达对目标进行 360°多视角扫描成像,非合作目标按照一定的自旋速度与章动速度进行运动,激光雷达按照固定帧频进行点云数据采集。

### 1.1 系统结构组成

空间非合作目标半物理仿真地面验证系统主要由目标模型、扫描系统、姿态模拟系统、综合控制计算机以及姿态传感器等部分构成,系统组成结构框图如图 1 所示。

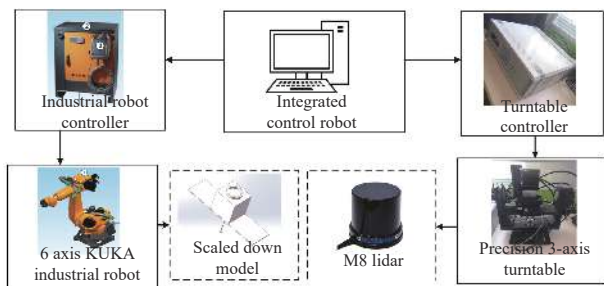


图 1 非合作目标半物理仿真地面验证系统结构框图

Fig.1 Block diagram of the non-cooperative target semi-physical simulation ground verification system

### 1.2 系统状态

在非合作目标三维重建的数值模拟基础上,空间非合作目标半物理仿真地面验证系统需要实现以下任务要求和技术指标:

扫描系统参数:雷达成像点数(雷达分辨率): $512 \times 512$ ,视场角: $20^\circ \times 20^\circ$ ,视线距测距精度: $\leq 0.05$  m (60 m,  $3\sigma$ ),帧频:1 Hz。

姿态模拟系统参数:可以搭载主体尺寸为  $3.600$  m  $\times$   $2.360$  m  $\times$   $2.100$  m 的非合作目标进行自旋速度  $5$  ( $^\circ$ )/s、章动速度  $5$  ( $^\circ$ )/s、章动角  $50^\circ$ 、章动轴方向为 Y 轴负方向的运动。

根据雷达既定参数指标,在 60 m 处扫描时,雷达扫描示意图如图 2 所示。

获取目标点云密度约为:

$$\left( \frac{60 \times \tan(10^\circ) \times 2}{512} \right) = 0.04 \text{ m}^2 \quad (1)$$

该工况符合扫描任务需求。为了在不影响试验效果的前提下节约试验场地,按照缩比比例为 1 : 10 的试验来布置设备,设备布置如图 3 所示。

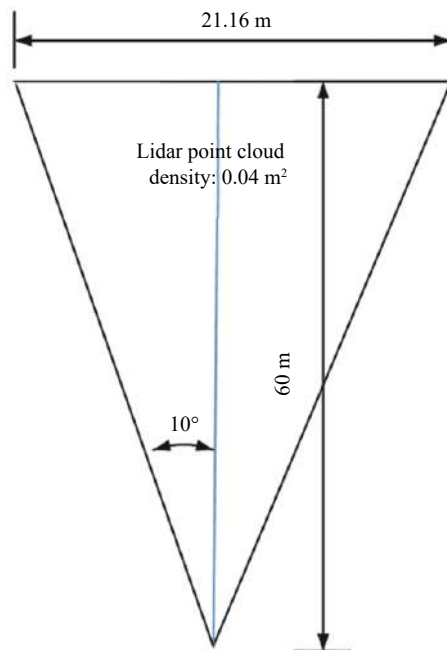


图 2 雷达扫描范围示意图

Fig.2 Schematic diagram of lidar scanning range

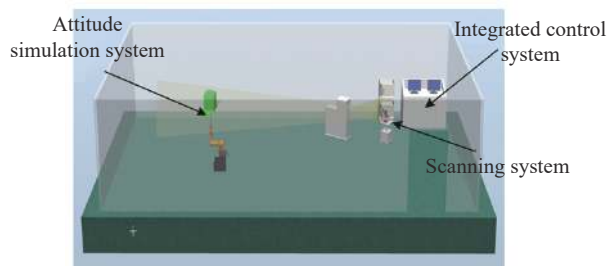


图 3 系统设备布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of system equipment layout

## 2 姿态模拟系统

### 2.1 系统运动学模型

失效卫星等非合作目标已失去姿态调整能力,且长期在失控状态下运行,受太阳光压、重力梯度等摄动力矩及失效前自身残余角动量等因素的影响往往会出现翻滚运动<sup>[15]</sup>。空间非合作目标的运动主要分为三种形式,即目标绕自身旋转轴的自旋、目标整体绕章动轴旋转的章动以及进动,由于线阵激光雷达扫描速度快,因此仅考虑目标的自旋运动与章动运动,且自旋运动与章动运动都是匀速的。

建立如图 4 所示的坐标系,世界坐标系  $O_W - X_W - Y_W - Z_W$  与初始扫描时刻的平台雷达坐标系重合。如图中所示,目标绕本体轴  $Y_b$  做自旋运动,自旋角速度

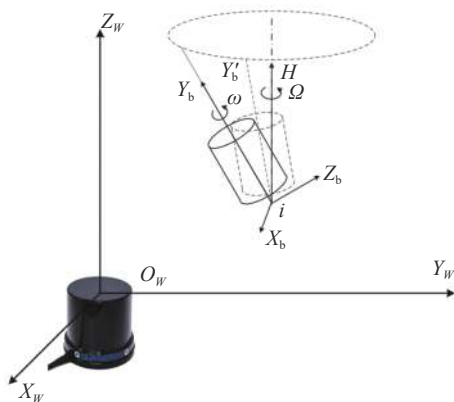


图 4 空间非合作目标世界坐标系与本体坐标系

Fig.4 Space non-cooperative target world coordinate system and ontology coordinate system

为 $\omega$ , 本体轴  $Y_b$  以角动量  $H$  轴为旋转轴心, 章动角为  $\theta$ , 章动角速度为  $\Omega$ 。

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-n}{\sqrt{m^2+n^2}} & \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2}} & 0 \\ \frac{-mp}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{-np}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{m^2+n^2}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \\ \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{n}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{p}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵  $B$  和自旋角速度 $\omega$ 及时间 $\Delta t$ 相关, 为:

$$B = \begin{bmatrix} \cos \omega \Delta t & -\sin \omega \Delta t & 0 \\ \sin \omega \Delta t & \cos \omega \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

章动运动的数学模型如下式:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{-n}{\sqrt{m^2+n^2}} & \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2}} & 0 \\ \frac{-mp}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{-np}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{m^2+n^2}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \\ \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{n}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{p}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵  $D$  和章动角速度 $\Omega$ 及时间 $\Delta t$ 相关, 为:

$$D = \begin{bmatrix} \cos \Omega \Delta t & -\sin \Omega \Delta t & 0 \\ \sin \Omega \Delta t & \cos \Omega \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

目标运动主要包括章动和自旋运动, 可以得到合成运动数学模型为:

$$P''' = C^T \cdot D \cdot C \cdot (A^T \cdot B \cdot A \cdot (P - O_{Y_b}) + O_{Y_b} - O_H) + O_H \quad (9)$$

式中:  $P'''$  为非合作目标上一点  $P$  运动后新坐标。

## 2.2 系统结构设计

非合作目标的三维重建需要依赖于目标上的明显的结构特征。调研卫星库, 发现航天器上明显特征的结构大概有: 卫星主体结构、太阳帆板、通讯天线、

目标运动主要包括章动和自旋运动, 以雷达坐标系为参考, 自旋运动数学模型需要的参数信息有: 本体轴  $Y_b$ 、自旋角速度 $\omega$ , 章动运动数学模型需要的参数信息有:  $H$  轴、章动角 $\theta$ 、章动角速度 $\Omega$ 。

以目标表面一点  $P$  为例, 分别对自旋运动数学模型和章动运动数学模型展开描述。自旋运动数学模型如下式:

$$P' = A^T \cdot B \cdot A \cdot (P - O_{Y_b}) + O_{Y_b} \quad (2)$$

其中,  $P$  为目标表明一点的坐标, 见公式 (3):

$$P = [P_x, P_y, P_z] \quad (3)$$

式中:  $P'$  为  $P$  自旋运动后新坐标;  $O_{Y_b}$  为  $O_H$  本体轴  $Y_b$  上一点; 矩阵  $A$  和本体轴  $X_b = (m, n, p)$  方向向量相关, 为:

$$P'' = C^T \cdot D \cdot C \cdot (P - O_H) + O_H \quad (6)$$

式中:  $P''$  为点  $P$  章动运动后新坐标;  $O_H$  为角动量  $H$  轴上一点; 矩阵  $C$  和角动量轴  $H = (m, n, p)$  方向向量相关, 为:

星箭对接环和发动机这五种典型特征, 故系统的非合作目标缩比模型应具备这些基本特征。系统采用如图 5 所示的缩比模型, 实物模型通过 3D 打印保证尺寸精度。图中第一行为三维建模模型的典型特征结构, 第二行为姿态模拟所用实体模型的对应典型结构, 从左到右分别是接收天线、星箭对接环、发动机喷嘴和太阳能帆板。

为了完成多视角的扫描, 经过对比分析, 文中采用 KUKA 六轴工业机器人搭载缩比非合作目标模型来模拟目标运动状态, 缩比模型通过可以调节长度的支撑杆与工业机器人连接, 连接杆的一端通过固定螺栓将支撑杆夹具与工业机器人的法兰盘进行连接。

姿态模拟系统三维结构图如图 6 所示。该工业机器人运动范围如表 1 所示, 重复定位精度为±0.02 mm, 可以完成不同章动角下不同自旋速率和章动速率的模拟工作。

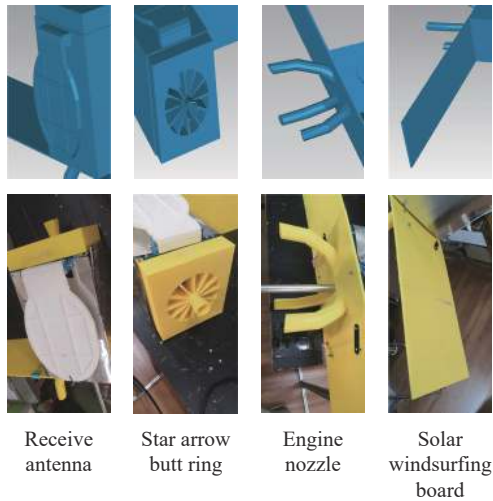


图 5 非合作目标缩比模型

Fig.5 Non-cooperative target scale model

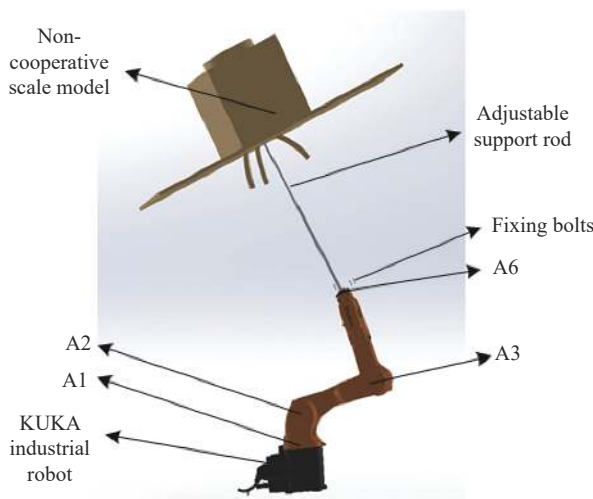


图 6 姿态模拟系统三维结构图

Fig.6 3D structure diagram of attitude simulation system

表 1 各轴运动角度参数

Tab.1 Motion angle parameters of each axis

Number of axes	Angle range/(°)
A1	±170
A2	-190-45
A3	-120-156
A6	±350

### 3 扫描系统

#### 3.1 扫描成像原理

文中基于模拟服务航天器对实时三维成像激光雷达小型化、低功耗、快速成像的应用要求, 设计并研制出一种线阵扫描三维成像激光雷达扫描系统。

数据采集利用八元线阵扫描三维成像雷达系统方案, 线阵扫描传感器按照设定的方式进行高速工作, 在短时间内就可以完成对空间失稳非合作目标的三维成像扫描。扫描成像原理如图 7 所示。

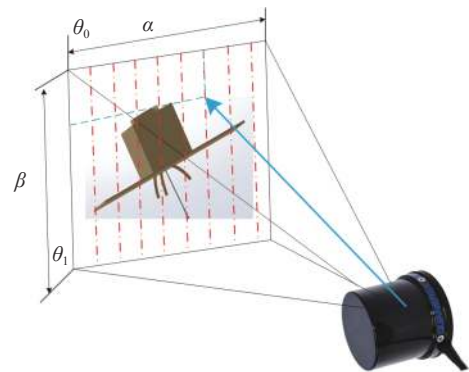


图 7 扫描成像原理

Fig.7 Principle of sanning imaging

假设接收传感器在竖直方向上是按照单向旋转周期性运动, 在水平方向上按步进的方式运动, 那么在  $T$  时刻雷达传感器发射的激光角度可以表示为:

$$\begin{aligned} \theta_h &= \theta_0 + T \times \Delta\alpha \\ \theta_v &= \theta_1 + T \times \Delta\beta \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\theta_h$  为  $T$  时刻激光所在的水平位移角度;  $\theta_0$  为光线最大偏移角度在水平方向上的初始位移分量;  $\Delta\alpha$  为单位时间内水平方向的位移角度;  $\theta_v$  为  $T$  时刻激光所在的竖直位移角度;  $\theta_1$  为光线最大偏移角度在竖直方向上的初始位移分量;  $\Delta\beta$  为单位时间内竖直方向的位移角度。

#### 3.2 扫描系统结构设计和精度分析

文中选用 Quanergy 公司生产的 M8 激光雷达作为激光扫描传感器。该扫描传感器利用多线人眼安全激光束和飞行时间测距原理。除了具有很高的鲁棒性, 还有宽广的探测视场角、超长的探测距离、高精度和高分辨率等优势。雷达内部线束分布和雷达坐标系原点位置如图 8 所示。M8 雷达参数如表 2 所示。

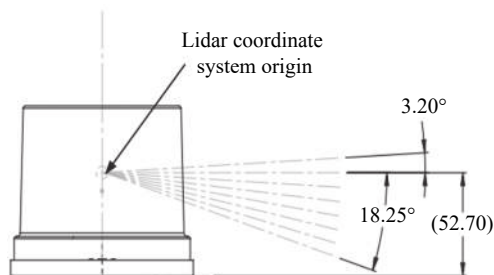


图 8 M8 雷达线速分布示意图

Fig.8 Schematic diagram of line speed distribution of M8 lidar

表 2 M8 雷达参数范围

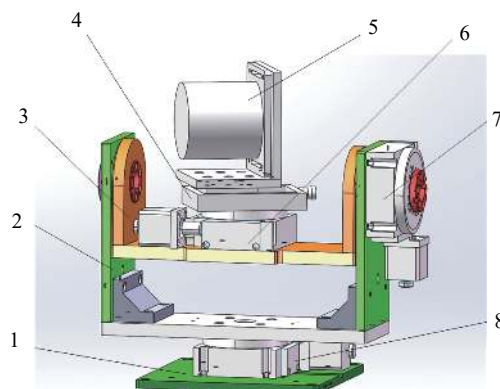
Tab.2 M8 lidar parameter range

Parameter	Value
Laser wavelength/nm	905
Measurement technology	Time-of-flight method (TOF)
Distance accuracy (1σ under 50 m distance)/cm	<3
Number of lines	8
Field of view/(°)	Horizontal perspective:360, Vertical viewing angle:20 (+3/-17)
Maximum detection distance	100 m (80% reflectivity), 35 m (10% reflectivity)

一束激光脉冲一次回波信号只能获得一个激光脚点的距离信息,为了连续获得具有一定带宽的系列激光脚点的距离信息,文中通过借助自主设计的三轴机械转台实现线阵扫描。三轴转台机构如图 9 所示,主要由方位驱动和测角机构、俯仰驱动机构、俯仰测角单元、横滚驱动和测角机构组成。方位驱动和测角机构作为整个转台的底座,俯仰驱动机构和俯仰测角单元作为两侧支臂,通过俯仰轴和横滚机构连接起来,横滚机构上连接一个燕尾平移台, M8 激光传感器与燕尾平移台通过 L 型支撑板连接,通过燕尾槽导轨调整雷达坐标系中心,使坐标系中心与横滚轴中心重合。

三轴转台采用蜗轮蜗杆传动,可以实现实时自锁。步进电机控制可以实现 360°调整。装配有零位开关,可以实现快速归位操作,加装的编码器可以反馈各轴角度位置,实现闭环控制。方位轴与俯仰轴可调整扫描系统的视野中心所在位置,用于扫描前的初始范围调整。横滚转台搭载 M8 激光传感器按照固定帧频进行数据采集,每次扫描均为固定线阵宽度的推扫。三轴转台的具体参数如表 3 所示。

扫描系统所成水平和垂直方向视角和分辨率示



1.Pedestal 2.Big U-shaped arm 3.Small U-shaped arm 4.Dovetail translation platform 5.M8 lidar 6.Rolling turntable 7. Pitch turntable 8. Orientation turntable

(a) 机械结构设计三维图

(a) Three-dimensional drawing of mechanical structure design



(b) 转台实物

(b) Turntable in kind

图 9 三轴转台机械结构及实物

Fig.9 Mechanical structure and physical objects of three-axis turntable

表 3 三轴转台参数

Tab.3 Three-axis turntable parameters

Shafting	Azimuth axis	Pitch axis	Roll axis	Translation axis
Itinerary	360°	360°	360°	50 mm
Transmission ratio	180 : 1	180 : 1	180 : 1	1 : 1
Transmission form	Worm gear drive	Worm gear drive	Worm gear drive	Fine thread screw drive
Guide rail form	Bearing	Bearing	Bearing	Dovetail guide rail
Motor (step angle)	42(1.8°)	42(1.8°)	42(1.8°)	
Resolution (theoretical value)	0.0002°	0.0002°	0.0002°	0.02 mm
Repeatability	0.01°	0.01°	0.01°	0.01 mm
Empty back gap	0.005°	0.005°	0.005°	0.005 mm
Table beating	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm

意图如图 10 所示。其中,扫描系统的水平方向的视场角为 $\alpha$ ,单位分辨率宽度 $S_h$ 与转台的水平方向速度 $v_h$ 以及 M8 激光雷达的采样频率 $f$ 有关。 $v_h$ 越大,分辨率越低,采样频率 $f$ 越大,分辨率越高,具体关系如公式 (11) 所示:

$$S_h = \frac{l}{N_h} = \frac{d \times \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times 2}{\frac{\alpha}{v_h} \times \frac{1}{f}} \quad (11)$$

式中: $l$ 为扫描视角为 $\alpha$ 时的视野宽度; $N_h$ 为分辨率数; $d$ 为雷达原点至视野平面的距离。

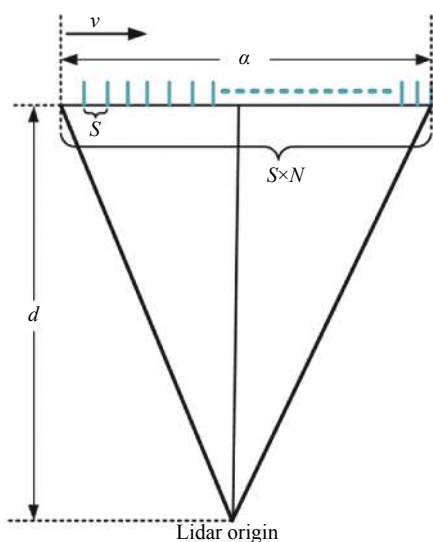


图 10 雷达水平视角与分辨率示意图

Fig.10 Diagram of lidar horizontal viewing angle and resolution

扫描系统的竖直方向的视场角为 $\beta$ ,单位分辨率 $S_v$ 与 M8 雷达一周采样点数 $M$ 有关, $M$ 与雷达的采样频率 $f$ 有关,具体关系如公式 (12) 所示:

$$S_v = \frac{l_v}{N_v} = \frac{d_v \times \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \times 2}{\frac{\beta}{360^\circ} \times M} \quad (12)$$

式中: $l_v$ 为扫描视角为 $\alpha$ 时的视野宽度; $N_v$ 为分辨率数; $d_v$ 为雷达原点至视野平面的距离。

#### 4 系统性能测试试验与分析

试验条件:扫描系统设置视场角为 $20^\circ \times 20^\circ$ ,分辨率为 $512 \times 512$ ,帧频为 1 Hz。姿态模拟系统的基座中心与雷达中心相聚 6 m,扫描系统位置不变,通过运动工业机器人的 A1 轴运动来实现不同视角的数据采

集。非合作目标进行自旋速度 $5^\circ/\text{frame}$ ,章动速度 $5^\circ/\text{frame}$ ,章动角 $50^\circ$ ,章动轴方向为 $Y$ 轴负方向的运动。共采集 73 帧数据进行分析。综合控制计算机的参数为:CPU 为 Intel (R)Core (TM) i5-8500,CPU 为 3.00 GHz,内存为 8 GB,操作系统为 Windows 10。

#### 4.1 非合作目标点云数据提取

相对于仿真扫描和在轨扫描,地面半物理仿真试验所获取的点云背景信息杂乱,数据处理的复杂程度相对较高,故需要对扫描系统获取的原始点云进行目标提取和无关背景信息剔除。

文中采用一种包围盒提取方法,通过对点云三个维度的阈值范围限定从而进行快速提取,实现对扫描获取的点云数据的初次提取。设原始点云集合为 $P_Y = \{P_1, P_2, \dots, P_l\}$ , ( $l \in N$ ),其中任意一点 $P_i$ 的坐标为: $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ ,其中 $x \in X_0, y \in Y_0, z \in Z_0$ 。

通过结合工业机器人基座中心位置、非合作目标主体尺寸和读取的非合作目标主体部分不同姿态下的 $x, y, z$ 维度方向的最大值与最小值坐标值确定三个维度的阈值范围 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$ 。根据所获取的边界点云坐标选定阈值范围目标,对维度范围内的点云进行快速提取。快速提取后的第 $i$ 帧点云集合为 $P_{T_i} = \{P_1, P_2, \dots, P_l\}$ , ( $l \in N$ )提取的目标点云应满足:

$$\begin{aligned} x_{T_i} &= \{x_{T_i} \in X_0 | x_{\min} < x_{T_i} < x_{\max}\} \\ y_{T_i} &= \{y_{T_i} \in Y_0 | y_{\min} < y_{T_i} < y_{\max}\} \\ z_{T_i} &= \{z_{T_i} \in Z_0 | z_{\min} < z_{T_i} < z_{\max}\} \end{aligned} \quad (13)$$

试验场景和采集到的点云如图 11 所示,提取的非合作目标点云结果如图 12 所示。

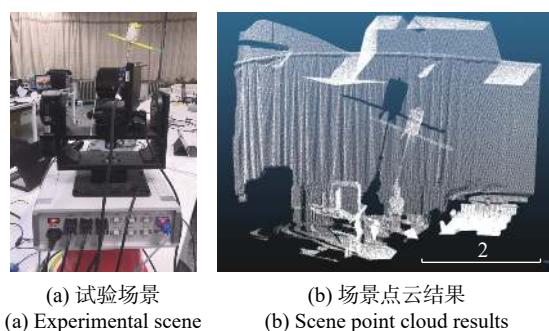


图 11 试验场景和采集到的点云

Fig.11 Experimental scene and collected point cloud

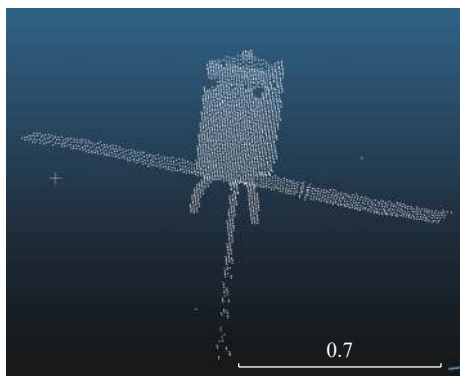


图 12 非合作目标点云结果

Fig.12 Non-cooperative target point cloud results

## 4.2 系统有效性评价准则

### 4.2.1 扫描结果点云精度分析

分辨率是指利用激光扫描系统可以探测到的最

$$d_i = \frac{\sqrt{\left| \begin{matrix} x_i - x_1 & y_i - y_1 \\ l & m \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} y_i - y_1 & z_i - z_1 \\ m & n \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} z_i - z_1 & x_i - x_1 \\ n & l \end{matrix} \right|^2}}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} \quad (15)$$

式中的  $x_i, y_i, z_i$  为直线  $L_2$  上一点  $P_i$  的坐标值;  $x_1, y_1, z_1$  为直线  $L_1$  上一点的坐标值。

平面竖直方向角度分辨宽度可通过直线  $L_2$  上  $M$  个点中相邻点的欧式距离  $d_i$  的均值  $d_{HM}$  来表示:

$$d_{HM} = \frac{\sum_{i=1}^M d_i}{M} \quad (16)$$

深度方向分辨宽度通过计算与雷达原点相距为  $d_i$  的平面 (平面垂直于  $y$  轴) 前若干不同厚度的靶板厚度来实现。选取探测方向距离为  $d_i$  的平面为背景平面  $\eta$  和与其垂直的平面  $\xi$  为侧边平面。以 1.0 cm 的宽度在  $y$  轴方向截取用于测试距离分辨率的狭窄平面, 将三维立体数据转化到二维平面。选取的点云  $y$  轴方向坐标应满足  $y_0 \leq y \leq y_0 + 1$ 。以侧平面的  $x$  坐标为  $x$  方向起始坐标, 点云到背景平面的距离值为深度值, 到侧平面的距离值为  $x$  方向坐标值。距离分辨率应大于拟合平面的残差 RMSE, 当深度值小于残差时, 平面外长方体点云将与背景平面点云混合到一起, 无法分辨。

### 4.2.2 目标扫描结果吻合度评估

目标扫描结果吻合度是指扫描提取目标结果点云模型与原模型的各部分特征位置比对。目标的扫描目标模型与原始目标模型的吻合度评价主要包括:

小特征, 主要包括两个指标: (1) 平面角度分辨率为相邻线束在同一平面上竖直和水平方向的单位距离, 受激光光束发散角和扫描采样间隔的影响; (2) 深度分辨率为扫描系统可以识别的在测距方向上的最小距离变化。

平面水平方向角度分辨宽度通过计算与雷达原点相距为  $d_i$  的平面上相邻两条线束的距离可以得到。若已知其中一条直线  $L_1$  方向向量为  $(l, m, n)$ , 则两线束间的距离可以用线束  $L_2$  上  $N$  个点到直线  $L_1$  的均值  $d_{VM}$  来表示, 具体如公式 (14) 所示:

$$d_{VM} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (14)$$

式中:  $d_i$  具体如公式 (15) 所示:

提取目标模型本体、帆板等特殊部位显著结构的尺寸大小对比, 边缘直线的平行度和直角度对比。

#### (1) 尺寸吻合度评价

首先, 在目标的扫描结果点云中选取典型尺寸的两边缘特征点  $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$  和  $P_2 = (x_2, y_2, z_2)$ , 利用公式 (17) 求解两点之间的欧式距离:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (17)$$

将求取的距离  $d$  与原模型中两特征点之间的距离  $d_b$  进行对比, 得到尺寸误差  $W_c$  为:

$$W_c = \frac{d}{d_b} \quad (18)$$

#### (2) 典型边缘直线结构平行度与垂直度评价

选取相互平行或者垂直的两条典型边缘直线  $L_{AB}$  和直线  $L_{CD}$ , 求得直线的方向向量分别为  $\mathbf{AB}$  和  $\mathbf{CD}$ , 利用公式 (19) 来求两直线夹角:

$$\lambda = \arccos \left[ \frac{\mathbf{AB} \cdot \mathbf{CD}}{|\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{CD}|} \right] \quad (19)$$

通过将  $\lambda$  与  $90^\circ$  和  $180^\circ$  做比, 求出两直线间的平行度  $W_1$  和垂直度  $W_2$  为:

$$W_1 = \frac{\lambda}{180^\circ} \quad (20)$$



$$W_2 = \frac{\lambda}{90^\circ} \quad (21)$$

(3) 典型相邻面垂直性评价

对两个典型的相邻平面  $A$  和平面  $B$  进行平面拟合, 得到两个平面的平面方程分别为:

$$a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \quad (22)$$

$$a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \quad (23)$$

根据立体几何的计算准则可得两平面的夹角  $r$  可表示为:

$$r = \arccos\left(\frac{a_1a_2 + b_1b_2 + c_1c_2}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \times \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}\right) \quad (24)$$

将夹角  $r$  代入公式 (21) 便可以得到两平面的垂直度结果。

4.2.3 目标真实运动与测量运动对比评估

目标章动运动是通过姿态模拟系统的机械臂 A1 轴旋转实现的, 通过计算第  $i$  帧点云相对于第 1 帧的点云章动运动夹角  $\alpha_{i1}$  与第  $i$  帧机械臂 A1 轴的位置  $\beta_i$  与 A1 轴的初始位置  $\beta_0$  的差值做比, 可以求出目标真实运动与测量运动的误差  $W_d$ :

$$W_d = \frac{\alpha_{i1}}{\beta_i - \beta_0} \quad (25)$$

4.3 系统有效性评价试验结果

4.3.1 扫描结果点云精度分析试验

通过截取距离雷达原点 6 m 的平面上相邻两条线束部分特征点, 利用 4.2.1 节中准则计算得到垂直方向和水平方向的单位分辨率宽度结果如表 4 所示, 可以达到任务指标。

表 4 平面分辨率结果

Tab.4 Results of planar resolution

Parameter	Value
Horizontal angle resolution width/m	0.0038
Vertical angle resolution width/m	0.0042

通过对深度方向内的不同厚度的靶板进行扫描数据采集, 计算靶板前面到背景平面的距离来比较距离方向的分辨率。用于距离分辨率测试的靶板如图 13 所示, 桌面上面的一行矩形方块的平面尺寸为 15 cm × 20 cm, 靶面的厚度从右到左分别为 1 cm、3 cm、5 cm、11 cm 和 15 cm。距离分辨率结果如图 14 所示, 从中

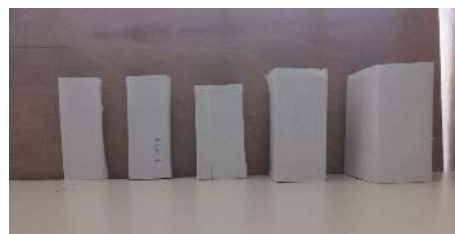


图 13 距离分辨率测试靶板

Fig.13 Range resolution test target board

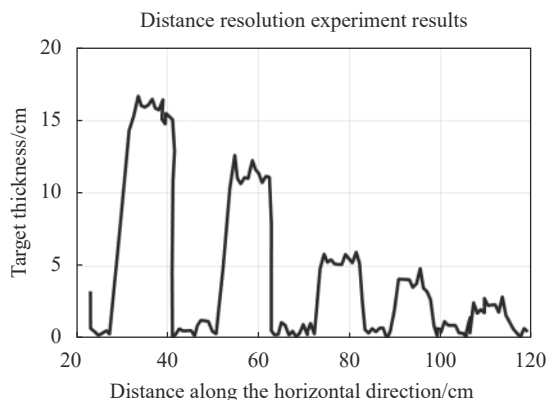


图 14 距离分辨率结果

Fig.14 Results of distance resolution

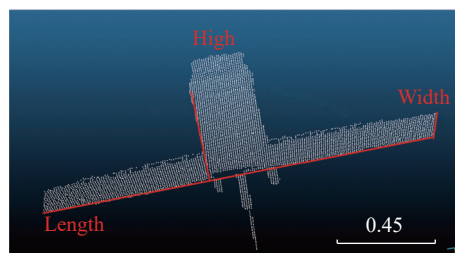


图 15 目标扫描结果求解尺寸位置

Fig.15 Size and position of target scanning results

可以看出, 激光雷达扫描系统能够较好地识别高度为 1.0 cm 以上的矩形方块。

4.3.2 目标扫描结果吻合度试验

选取特征明显的帆板的长、宽和主体的高进行测量。并与本体模型进行对比, 计算尺寸相对误差。从 73 帧扫描数据中间隔 12 帧选取 4 帧进行数据提取, 利用 4.2.2 节中准则进行计算, 结果如表 5 所示, 目标扫描结果求解尺寸选取位置如图 15 所示。

典型边缘直线结构平行度与垂直度评估试验: 选取目标本体帆板作为特征结构, 对其边缘直线进行直线拟合。如图 16 所示, 在直线  $La$ 、直线  $Lb$ 、直线  $Lc$  与直线  $Ld$  上分别采用随机抽样方法, 共选取

表 5 目标扫描结果与本体模型尺寸吻合度

Tab.5 Consistency between target scanning results and body model size

	Length	Width	Height	
Scanning data/m	Frame 1	1.5844	0.2114	0.3344
	Frame 13	1.5798	0.2100	0.3500
	Frame 49	1.5804	0.2129	0.3298
	Frame 67	1.5854	0.2130	0.3140
Model data/m	1.5796	0.2194	0.3453	
Deviation	0.3%	3.61%	3.51%	

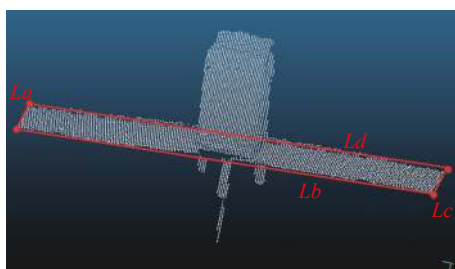


图 16 目标扫描结果边缘直线选取位置

Fig.16 Selected position of the edge line of the target scanning result

180 个观测点进行空间直线拟合。得到空间直线的方向向量以及两直线间的夹角结果如表 6、表 7 所示。由试验结果可知扫描目标边缘直线的垂直度和平行度均在 98.5% 以上。直线拟合结果如图 17 所示。

表 6 目标扫描结果边缘直线方向向量

Tab.6 Edge line direction vector of target scanning result

Straight line	Direction vector
$L_a$	(4.286 7, -1.903 1, 1)
$L_b$	(-0.192 1, 0.050 2, 1)
$L_c$	(4.628 2, -2.056 5, 1)
$L_d$	(-0.189 8, 0.042 9, 1)

表 7 目标扫描结果边缘直线夹角

Tab.7 Included angle of straight line at the edge of target scanning result

Line number	Parallelism		Verticality	
	$L_a$ and $L_c$	$L_b$ and $L_d$	$L_a$ and $L_b$	$L_c$ and $L_d$
Included angle/(°)	179.13	179.57	88.97	89.05
Fitting degree	99.52%	99.76%	98.85%	98.95%

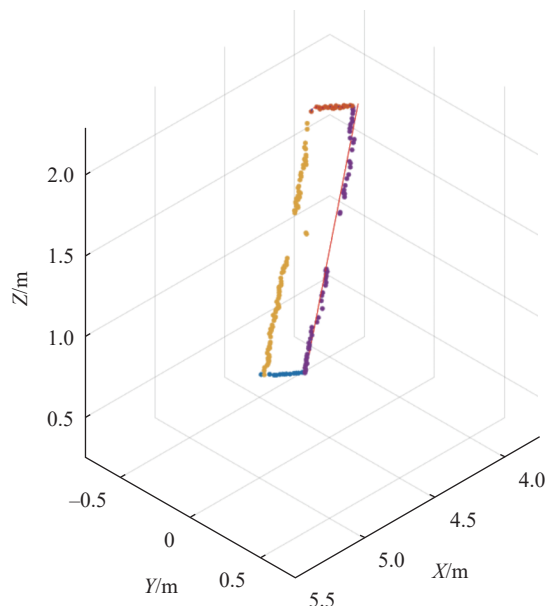


图 17 目标扫描结果边缘直线拟合效果

Fig.17 Fitting effect of edge line of target scanning result

典型相邻面垂直性试验: 试验随机选取扫描目标的右边帆板平面与本体前面的部分点云。分别进行平面拟合, 得到表面方程分别为  $6.797x + 13.22y + z - 31.82 = 0$  和  $3.52x - 1.465y + z - 17.23 = 0$ 。由此可计算得相邻平面夹角为  $89.037^\circ$ , 则相邻面直角性为 98.93%, 扫描目标相邻面垂直性较好。最终拟合平面如图 18 所示, 图中红色点为拟合平面时选取的三维点。其中平面 1 的拟合结果均方根误差为 0.061, 平面 2 的拟合结果均方根误差为 0.044。

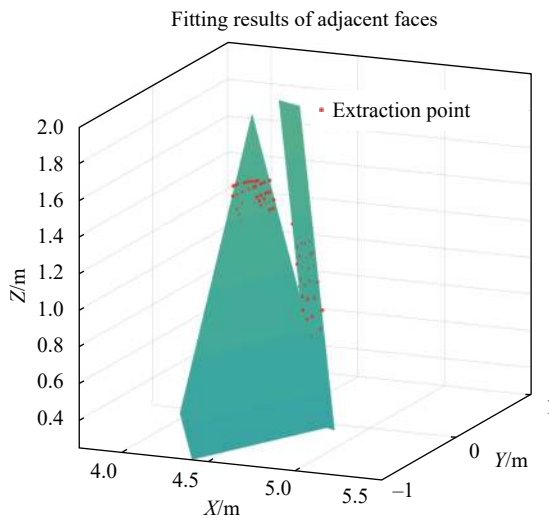


图 18 扫描目标垂直平面表面拟合结果

Fig.18 Fitting result of scanning target vertical surface

4.3.3 目标真实运动与测量运动对比试验

由于支撑杆固接在缩比模型与工业机器人法兰上,与目标模型是一个运动的整体,支撑杆的自旋运动可以反映目标的章动状态。目标真实运动与测量运动对比评估通过将支撑杆点云投影到与姿态模拟系统中机械臂基座原点所在的  $XOZ$  平面上,求投影点云  $x$  与  $z$  值坐标均值。连接各帧投影均值点、基座坐标原点和初始帧投影均值点得到章动运动测量角度。从第 1 帧到 67 帧每隔 6 帧选取 1 帧采样数据,提取支撑杆点云数据,并按照 4.2.3 节中准则计算误差。目标章动运动控制角度与测量计算角度及误差对比如图 19 所示,由计算结果可知目标章动运动控制角度与测量计算角度误差在 4% 以内。

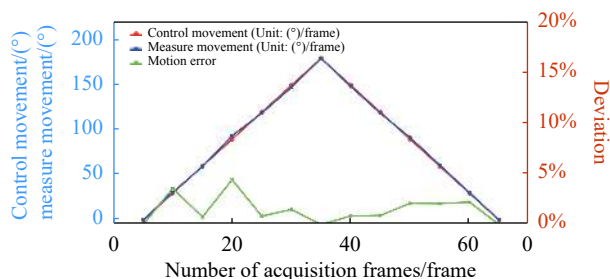


图 19 目标章动运动控制角度与测量计算角度及误差对比

Fig.19 Comparison of target nutation motion control angle and measurement calculation angle and error

参考文献 [12] 分别通过地面试验平台验证所提方法的有效性。在地面试验中,采用失效卫星的 1:6 的缩比模型, lidar 距离目标的距离约 5 m,模型固定在三轴转台上,转台初始角度为  $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 。试验中,转台以  $5^\circ/\text{s}$  的角速度绕  $y$  轴(垂直于地面的轴)匀速旋转, lidar 采样频率设置为 5 frame/s,转台控制精度高于  $0.01^\circ$ 。由于 lidar 测量噪声较复杂,最大误差小于  $2.5^\circ$ 。参考文献 [16] 提出一种三目立体视觉测量方法,并在暗室太阳模拟的环境下对地面目标的相对位姿进行测量,亮度为 0.1 个太阳常数,卫星模型在机械臂的控制下以  $0.5^\circ/\text{s}$  的速度作逆时针匀速转动,三目相机以 4 s/frame 的速度采集图像,即卫星模型以  $2^\circ/\text{frame}$  的速度作逆时针匀速转动,共采集 30 组图像,相对姿态精度优于  $1.7^\circ$ 。试验所获得的数据为图像信息,无法获得目标的深度信息。将文中平均误差角度与上述文献的误差进行对比,如表 8 所示。

表 8 角度误差对比结果

Tab.8 Comparison results of angle error

	This article	Literature [12]	Literature [16]
Angle mean error/ $^\circ$	2	2.5	1.7

5 结 论

文中针对非合作目标线阵雷达成像点云数据获取过程中在轨验证试验成本高、空间环境复杂和控制难等问题,在非合作目标三维重建的数值模拟基础上,研制一套能模拟空间服务航天器对非合作目标进行绕飞采集过程的半物理仿真试验平台。系统试验结果表明,文中半物理仿真地面验证系统可以有效获取多视角状态下不同工况的非合作目标的点云数据,特殊部位显著结构的尺寸误差在 4% 以内,边缘直线的平行度和直角吻合度在 98.5% 以上,目标章动运动控制角度与测量计算角度误差在 4% 以内,系统可为非合作目标空间三维位姿测量与三维重建提供高精度试验数据。系统未考虑目标表面材质光学特性对数据的噪声影响,目标提取算法依赖于先验区域的划分,有待提高。

参考文献:

[1] Opromolla R, Fasano G, Rufino G, et al. A review of cooperative and uncooperative spacecraft pose determination techniques for close-proximity operations [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2017, 93(8): 53-72.

[2] Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 68(8): 1-26.

[3] Zhao Di, Sun Chong, Yuan Jianpin, et al. Research on on-orbit recognition method of space non-cooperative target attitude parameters based on coordinated observation of multiple spacecraft [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(2): 267-277. (in Chinese)

[4] Sun Zhihui, Deng Jiahao, Wang Chang. Linear array detection mode of three-dimensional imaging laser radar [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 381-385. (in Chinese)

[5] Chen Feng, Zhu Jie, Gu Dongqin, et al. Relative navigation technology of space non-cooperative target based on imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1030005. (in Chinese)

- [6] Guo Xincheng, Meng Zhongjie. State estimation of non-cooperative target stars using monocular vision. [J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(10): 1243-1250. (in Chinese)
- [7] Cai Jingyi, Yan Fei, Wu Zhaoxiang, et al. Realization of multi-view 3D reconstruction based on Kinect v2 [J]. *Journal of Sensor Technology*, 2020, 33(8): 1149-1154. (in Chinese)
- [8] Liu Yu, Chen Feng, Wang Ying, et al. Spacecraft relative pose measurement technology based on lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0817003. (in Chinese)
- [9] Wang Shuai, Sun Huaye, Guo Huichao. Overlapping region extraction method suitable for laser point cloud registration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S126002. (in Chinese)
- [10] Lu Qi, Lin Tingting, Li Pengcheng, et al. Clustering registration method for spatial non-cooperative target point cloud [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200431. (in Chinese)
- [11] Li Ronghua, Xue Haopeng, Yang Youqing. Linear array lidar imaging mechanism and 3D reconstruction for space instable targets [J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(8): 1049-1057.
- [12] Yin Fang, Wu Yun. Model reconstruction and pose optimization of space non-cooperative rotating target [J]. *Optical Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1854-1862. (in Chinese)
- [13] Acic M, Neild S, Gawthrop P. Introduction to the special issue on hardware-in-the-loop simulation [J]. *Mechatronics*, 2009, 19(7): 1041-1042.
- [14] Liu Changhai, Hu Min, Yang Qingjun, et al. Hardware-in-the-loop simulation technology of wave power generation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(10): 286-296.
- [15] Lu Yong, Liu Xiaoguang, Zhou Yu, et al. Summary of the development of non-cooperative target elimination technology of space roll [J]. *Acta Aeronautica Sinica*, 2018, 39(1): 38-50. (in Chinese)
- [16] Shu An, Pei Haodong, Duan Huixian. Trinocular stereo visual measurement method for spatial non-cooperative target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0615001. (in Chinese)