

# 空间非合作目标位姿光学测量研究现状

郝刚涛<sup>1</sup> 杜小平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 装备学院研究生管理大队, 北京 101416; <sup>2</sup> 装备学院航天指挥系, 北京 101416)

**摘要** 故障航天器的在轨捕获与维修、空间垃圾清除等空间活动已成为航天技术发展需要面对和解决的重要课题,而非合作目标位姿光学测量技术作为解决这些问题的关键技术,已经引起了有关学者和研究机构的广泛关注。首先讨论了空间非合作目标位姿测量的特点,之后通过关注和跟踪国内外最新发展情况,全面总结了现有的非合作目标位姿光学测量方法的研究现状及性能优劣,最后对这些测量方法进行了比较,并给出了非合作目标位姿光学测量的研究启示。

**关键词** 光学测量; 位姿; 非合作目标; 在轨服务

中图分类号 TP24 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.080028

## Advances in Optical Measurement of Position and Pose for Space Non-Cooperative Target

Hao Gangtao<sup>1</sup> Du Xiaoping<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)  
(<sup>2</sup> Department of Space and Command, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract** The position and pose measurement for space non-cooperative target is an intractable problem of on-orbit servicing for space non-cooperative target, which has been a hotspot of research in recent years. In this paper, firstly, the characteristics of the position and pose estimation for space non-cooperative target are discussed. Secondly, the performance of the main position and pose estimation optics methods are comprehensively summarized. Finally, the vision sensor and estimation algorithm are analyzed, and their advantages, disadvantages and application area are concluded.

**Key words** optical measurement; position and pose; non-cooperative target; on-orbit servicing

**OCIS codes** 120.6085; 280.4788; 100.4999; 150.0155; 150.1135

## 1 引言

针对非合作目标的在轨服务技术不仅可以应用于在轨维修,同样也是空间碎片处理和空间攻防等领域所面临和亟待解决的问题。近年来,美国、日本相关部门以及欧洲空间局(EDA)等相继提出针对非合作目标的在轨服务研究计划和任务,如美国的哈勃望远镜机器人修复计划<sup>[1]</sup>、ESA的实验卫星服务计划(ESS)<sup>[2]</sup>以及日本的空间碎片清理卫星(SDMR)项目<sup>[3]</sup>等。

在这些在轨服务任务中,服务航天器在跟踪、接近和抓捕目标时,需要实现航天器和目标间的相对位置和姿态测量。由于非合作目标无法提供合作信息,这就给非合作航天器的位姿测量带来了极大的挑战。如何在没有合作信息的情况下对目标进行识别、位姿测量和抓捕便因而成为了非合作在轨服务的一项关键技术,已经引起了有关学者和研究机构的广泛关注。

非合作目标不能利用星间链路来直接传输其位置和姿态信息,故无法利用陀螺仪、加速度计等惯性敏感器来直接获取其姿态信息。光学测量手段无需接触目标就能获取目标的位姿信息,是非合作目标位姿测量

收稿日期: 2013-05-13; 收到修改稿日期: 2013-06-14; 网络出版日期: 2013-07-25

作者简介: 郝刚涛(1986—),男,博士研究生,主要从事空间非合作目标探测方面的研究。E-mail: haogangt@yahoo.com.cn

导师简介: 杜小平(1966—),女,博士,教授,博士生导师。主要从事空间目标探测方面的研究。

E-mail: delladuxiaoping@163.com

的主要手段。本文讨论了空间非合作目标位姿测量的特点,全面归纳总结了国内外非合作目标位姿光学测量方法或系统的性能和优劣,同时分析和比较了各种光学测量方法,对该领域的研究具有一定参考意义。

## 2 空间非合作目标位姿测量的特点

目前,国内外对非合作目标还没有统一的定义。美国空间研究委员会、航空与空间工程局在哈勃望远镜修复计划的评估报告<sup>[4]</sup>中认为:“非合作目标是指那些没有安装通讯应答机或其他主动传感器的空间目标,其人航天器不能通过电子讯问或发射信号等方式实现对此类目标的识别或定位”,文献<sup>[5-8]</sup>也都对非合作目标的特点进行了阐述。总结目前在研的非合作目标,其非合作特性的表征和程度有所不同,但大都具有以下特点:1)无法利用星间链路来直接传输其位置和姿态信息;2)没有安装用于辅助测量合作光学标志器和特征块等;3)运动状态、空间结构等信息完全未知或部分未知。相比于合作目标,非合作目标的位姿测量具有以下特点:

1) 目标特征提取是非合作目标位姿测量的前提。非合作目标没有安装人工标记、辅助测量的特征光标等,因此在位姿解算之前必须通过一定的特征检测手段提取目标表面的几何特征、灰度、深度等信息,利用自然特征实现目标的位姿解算。

2) 要求光学传感器获取更多的目标先验信息。非合作目标位姿测量通常采用光学手段,由于非合作目标的运动状态和几何信息都是未知的,且在位姿解算之前必须提取目标的自然特征,这就要求具有更先进的光学传感器获取颜色、深度、形状等更全面的先验信息,这对成像传感器提出了更高的要求。

3) 对位姿解算算法的实时性和自主性要求更高。由于位姿测量结果直接用于目标识别、跟踪和捕获的实时控制中,而大多数非合作目标位姿测量的前期处理算法复杂度高、计算时间长,再加上数据获取和转换时间,因此要求测量算法具有更快的运算速度,且能实现完全在线自主处理。

## 3 空间非合作目标位姿光学测量发展现状

### 3.1 基于单目视觉的位姿测量方法

单目相机是最常见也是最简单的光学传感器,是大部分航天器上的标准装备。由于单目视觉无法直接获取目标的深度信息,在非合作目标位姿测量中常常受到限制。国内的哈尔滨工业大学卫星技术研究所张世杰等<sup>[8]</sup>曾利用单目视觉对非合作目标进行位姿解算,但测量中需要假设特征点坐标已知。

相比于其他复杂的视觉传感器:1)单目相机常常是空间探测的有效载荷,开发单目视觉位姿测量方法能够增加航天器在不需要额外硬件情况下的导航能力;2)单目相机具有小巧和低功耗的特点,这使得它可以集成到微小卫星平台上,由于使用微小卫星完成在轨服务已经是一个重要趋势,因此这对空间目标探测是很重要的;3)新发展的先进视觉导航传感器往往需要单目相机的配合和补充,开发基于单目视觉的位姿测量算法有利于丰富其他传感模式。近年来,国内外研究者将基于单目视觉的机器人“即时定位和绘图(SLAM)”方法<sup>[9]</sup>进行扩展,成功应用到非合作目标的位姿测量中。如图1所示,斯坦福大学空间机器人实

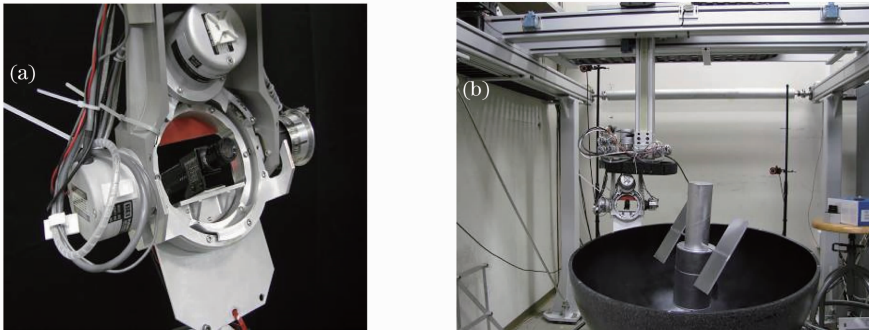


图1 斯坦福大学单目视觉非合作目标位姿测量系统。(a)单目相机;(b)6自由度位姿仿真系统<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Stanford University position and pose measurement system based on monocular vision for non-cooperative target.

(a) Monocular vision; (b) 6DOF pose simulation system<sup>[10]</sup>

实验室的 Augenstein 等<sup>[10-12]</sup>仅采用一个单目相机作为视觉导航传感器,采用贝叶斯估计方法估计姿态参数,采用最优化理论估计位置参数,可用于检查和维修损坏卫星或者水下科学仪器,也可用于与翻滚卫星的自主交会对接,并成功在蒙特利湾水上研究院进行了外场试验,该方法位置误差小于 0.05 m,姿态误差小于 1.2°,但只适合近距离探测,探测距离约在 20 m 以内。

### 3.2 基于双目视觉的位姿测量方法

双目视觉利用三角测量方法,模拟人眼成像原理,能够获取目标的三维图像,常常用于非合作目标位姿测量中。哈尔滨工业大学控制智能系统研究所 Xu 等<sup>[6]</sup>在 OpenGL 环境下,基于双目立体视觉建立非合作目标位姿测量仿真系统,根据识别出的卫星太阳帆板三角形支架各顶点在左、右相机中的二维(2D)信息,进行各特征点的三维(3D)重构,得到各顶点的三维坐标,再计算位置和姿态,探测距离为 5 m 以内,位置误差小于 0.04 m,姿态误差小于 3°。日本宇航开发局利用“在轨可视化环境模拟装置”开展地面试验(如图 2 所示),首先采用立体视觉成像获取非合作微小卫星的三维形状,之后基于三维模型匹配的方法对目标的相对姿态进行估计<sup>[13]</sup>,但由于算法复杂,所建立的系统无法实现姿态的实时估计。以色列海法理工学院 Segal 等<sup>[14]</sup>也建立了基于双目视觉的非合作航天器状态估计系统,首先建立目标特征点的观测模型,之后利用扩展卡尔曼滤波方法,实现了对非合作航天器的位姿测量。

双目视觉测量的关键技术是图像配准和三维重建技术,它们常常受限于目标表面的纹理信息是否丰富,如果目标表面缺少纹理信息(如平滑的黑色表面),则同名点提取和匹配就会变得非常困难,从而影响距离信息的确定;同时双目相机的配置受限于服务航天器的尺寸,测距距离和精度受基线长度限制。由于立体视觉自身的缺点,目前立体视觉测量系统主要应用于近距离交会对接测量中。

### 3.3 基于扫描式激光雷达的位姿测量方法

扫描式激光雷达利用扫描激光测距原理,能够获取目标表面密集的三维点云信息,并能够实现目标的三维重构。目前,常常采用由 Besl 等<sup>[15]</sup>提出的 ICP(Iterative closest point)三维点云匹配算法实现对非合作目标的位姿测量。

由于目标是运动的,使用扫描式激光雷达会导致运动失真问题,无法获得精确的三维点云,这是扫描式激光雷达位姿测量的主要困难。此外,扫描式激光雷达使用独立的扫描镜获取数据点,扫描镜需要不断地停下来和改变方向,这个过程会非常冗长。为了获取能够有效反映目标几何信息的稀疏数据,目前常常采用利萨如曲线(Lissajous)、玫瑰形(Rosette)和螺旋线(Spiral)等扫描方式<sup>[16]</sup>,如图 3 所示。

许多研究正在尝试利用扫描式激光雷达图像获取非合作目标的位姿信息。加拿大 Neptec 公司开发的 LCS(Laser camera system)系统<sup>[17]</sup>采用扫描三角测量的方式,利用基于 ICP 算法的 3D LASSO(three-dimensional laser camera system algorithms for spacecraft servicing on-orbit)软件能够实现非合作航天器

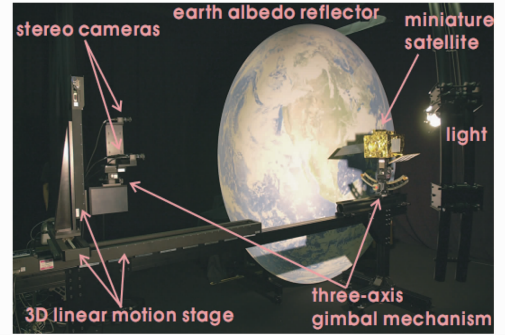


图 2 日本宇航开发局的双目视觉在轨环境仿真系统<sup>[13]</sup>

Fig. 2 Stereo vision on-orbit visual environment simulator of Japan Aerospace Exploration Agency<sup>[13]</sup>

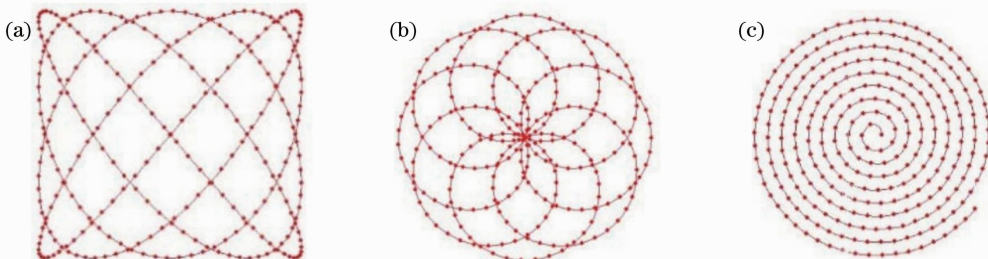


图 3 不同的扫描方式。(a) Lissajous 方式; (b) Rosette 方式; (c) Spiral 方式<sup>[16]</sup>

Fig. 3 Different scanning patterns. (a) Lissajous; (b) Rosette; (c) Spiral<sup>[16]</sup>

的6自由度的位姿解算,测量精度与距离的平方成反比,适用于在近距离对运动平缓目标的测量。Blais等<sup>[18]</sup>利用扫描三角测量获取距离数据,所用的扫描式激光传感器可实现多种扫描模式,采用ICP算法确定扫描中传感器的位移,但必须首先解决扫描中目标运动造成的点云“扭曲”问题。美国斯坦福大学空间机器人实验室Russell等<sup>[19]</sup>利用扫描传感器获取距离信息,采用一种基于非线性估计算法的非合作目标位姿测量方法,该方法无需解决数据扭曲问题就能实现姿态解算,但算法复杂,对硬件处理速度要求很高。

### 3.4 基于无扫描三维激光成像的位姿测量方法

与扫描式激光成像不同,无扫描激光成像不需要对场景进行逐行扫描,而是利用光束从传感器到目标点的飞行时间来计算目标的深度信息,允许多种深度信息的一次性平行获取,可以实时获取目标的三维图像。

目前无扫描激光成像主要分为脉冲飞行时间(TOF)激光测距、调频连续波激光测距、鉴相式激光测距和光子计数激光测距四种体制。三维闪光激光雷达<sup>[20]</sup>是由美国波尔航空公司开发的一种基于TOF测距的无扫描三维激光成像传感器,代表着该领域的先进成果。它能够实时地提供目标的三维图像,与扫描激光雷达相比:

1) 闪光激光雷达质量更轻、功耗更小、体积更紧凑;

2) 不需要扫描机械结构,成本更低,同时增强了系统的稳健性、可靠性和可维护性,延长了系统的使用寿命;

3) 不需要扫描时间,图像采集速率是扫描激光雷达的10~100倍,可用于各种成像时间受限场合。

无扫描三维激光成像能够快速地获取空间目标三维图像,是当前的研究热点,但无扫描激光成像所获取的图像横向分辨率往往较低,常常需要插值、传感器融合等技术提高其图像分辨率。2006年以来,德国的锡根大学、基尔大学和柏林大学的研究人员对低分辨率三维图像和高分辨率二维图像的融合进行了深入研究<sup>[21-27]</sup>,Ghobadi等<sup>[27]</sup>采用TOF相机和CCD相机融合方式,利用TOF相机快速和实时获取周围场景深度信息,利用CCD相机获取高分辨率的目标表面细节和纹理信息,利用ICP算法完成位姿解算,最终实现了移动机器人在未知环境下的目标识别和自主导航任务。此外,国内合肥工业大学张旭东等<sup>[28]</sup>将低分辨率三维相机和高分辨率二维相机获取的图像进行融合,实现了对非合作目标的位姿测量;美国波尔航空公司将3D Flash LIDAR获取的低分辨率距离数据和高分辨率的二维可见光图像融合,能够最大限度地发挥两种传感器的优势。

目前,无扫描三维激光成像在非合作目标位姿测量领域应用主要体现在美国月球自动着陆与规避项目、猎户座多任务载人飞行器项目、飞行器规避与对地侦查项目以及ESA的空间非合作目标交会对接项目和计划等。

### 3.5 基于多传感器融合的位姿测量方法

由于在非合作目标位姿解算之前必须提取目标的自然特征,这就要求获取目标表面的颜色、距离、形状等信息,而大多数传感器在提供这些信息时都同时具有一定的优势和局限性。基于多传感器融合的位姿测量方法将不同传感器组合,能够发挥不同传感器的优势。目前存在的一些重要的传感器组合方式如下。

1) 扫描式激光雷达和单目相机的组合<sup>[29-31]</sup>:扫描式激光雷达的主要优点是距离测量的高精度,缺点是无法获取灰度信息;单目相机能够提供高分辨率的灰度信息,但无法获取距离信息。融合这两个传感器能够提供目标高精度的距离信息和高分辨率的灰度信息。

2) 立体视觉和激光测距仪的组合<sup>[32-33]</sup>:激光测距仪测距精度高,但只能获取目标表面上单点的距离。立体视觉能获取目标的灰度信息,但当目标表面缺少或没有纹理信息时,立体视觉很难确定目标表面的深度信息。考虑到无扫描三维激光雷达非常昂贵,如果将立体视觉和成本较低的二维激光测距仪组合,不仅能够解决这样的问题,而且能够获取目标的灰度信息。

3) 无扫描三维激光雷达和高分辨单目相机的组合<sup>[20-21,34]</sup>:无扫描三维激光成像能够快速获取距离信息,横向分辨率却很低,多数应用中需要高分辨率的距离和颜色数据,将其与高分辨单目相机联合是这种问题的典型解决办法。例如美国波尔航空公司就进行了3D Flash LIDAR和高分辨率单目相机的融合。

4) 无扫描三维激光雷达和立体视觉系统的组合<sup>[22,24,26,35]</sup>:无扫描三维激光雷达和立体视觉的联合能够很好地改善最后的距离数据。无扫描三维激光雷达能够提供实时的距离数据,但其较低的横向分辨率导致

无法获取目标表面细节的距离数据;立体视觉在目标表面纹理不丰富或光照条件恶劣的情况下不能获取精确的距离数据,但无扫描三维激光雷达可以。也就是说,细节和距离不连续降低了无扫描三维激光雷达的性能,但是增加了立体视觉的性能。在这种联合中的关键点是融合无扫描三维激光雷达和立体视觉获取的距离信息,目的是解决距离数据的模糊和增加距离测量的性能。

以上传感器组合方式都可以用于非合作目标的位姿测量中,其中一些方式已经在实际应用中已被采纳<sup>[20,27-28]</sup>。具体的传感器组合选择取决于应用需求,应该考虑精度、可信度和实时性以及成本,目的是获取一个优化方案。

### 3.6 国外在研的新型空间非合作目标位姿测量方法

#### 3.6.1 TriDAR 视觉系统

TriDAR 视觉系统<sup>[16,36-37]</sup>由加拿大 Neptec 公司于 2006 年开发,主要用于非合作目标自主交会对接导航中。截至 2012 年,该系统已经在算法和硬件层面进行了多次改进。TriDAR 视觉系统被选用于哈勃机器人离轨模块任务,Neptec 公司、加拿大宇航局(CSA)和美国国家航空航天局(NASA)联合,将 TriDAR 视觉系统搭载在“发现号”航天飞机上,在 STS-128 空间飞行任务中实现了更详细的在轨测试。

TriDAR 采用扫描、三角测量与脉冲测距相结合的方式,实现了一种新的三维传感方式(如图 4 所示)<sup>[16]</sup>,能够在从中距离到近距离对接的过程中实时提供目标 6 自由度的位姿信息,实时目标跟踪算法由 Neptec 和加拿大宇航局共同开发,位姿解算算法具有比传统方法更快的速度,可以实现实时跟踪。TriDAR 能够获取目标的三维点云信息,其姿态测量利用 ICP 算法将三维点云中的目标几何信息与目标航天器已知的形状信息匹配,进而计算出位置和姿态,位置误差小于 0.12 m,姿态误差小于  $0.36^\circ$ ,这种方法在遮挡、低分辨率、传感器噪声、数据畸变和模型差异的情况下仍然具有较高的精度,且可以实时运行,其中已知形状信息需要在地面获取[如计算机辅助设计(CAD)模型]或者在轨绕飞扫描获取。

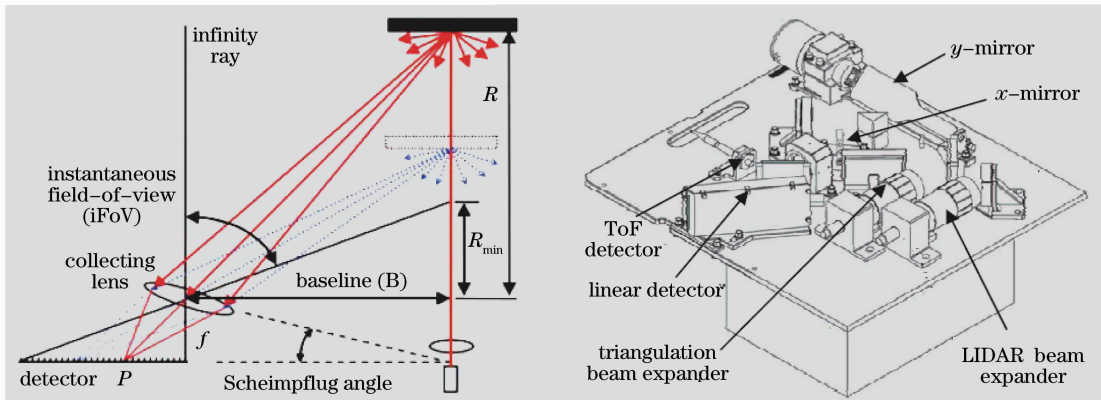


图 4 TriDAR 的(a)三角测量几何学及(b)光学构造<sup>[37]</sup>

Fig. 4 TriDAR (a) triangulation geometry and (b) optical configuration<sup>[37]</sup>

TriDAR 视觉系统由 TriDAR 传感器和处理软件<sup>3D</sup>LASSO 组成,其中<sup>3D</sup>LASSO 软件由三部分构成:系统输出接口、传感器输入接口和姿态跟踪模块,如图 5 所示<sup>[37]</sup>。其中姿态跟踪模块是<sup>3D</sup>LASSO 的核心,它通过获取三维传感器提供的数据,实现对目标位姿的跟踪任务,这个软件是便携式的,可以嵌入到星载计算机中。

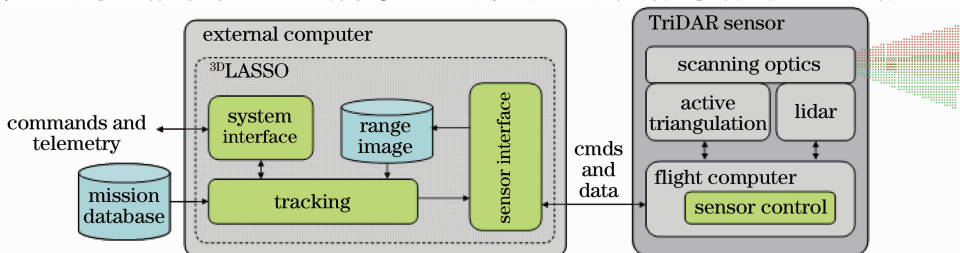


图 5 TriDAR 视觉系统构成<sup>[37]</sup>

Fig. 5 Configuration of TriDAR vision system<sup>[37]</sup>

### 3.6.2 Argon 视觉系统

美国戈达德空间飞行中心(GSFC)卫星服务能力研究办公室(SSCO)一直致力于发展相对导航传感器和算法,目的是实现为客户航天器加注燃料、维修和复位等服务,这些客户航天器往往是非合作的。为了应对这些技术挑战,SSCO开发了 Argon 视觉系统<sup>[38-39]</sup>。

Argon 专门用作非合作目标交会对接中的导航传感器,由两个高分辨率可见光相机、一个 3D Flash LIDAR 和星载计算机以及相应的电器设备组成。其中两个可见光相机是由麦克唐纳德特威勒公司(MDA)开发的 1 Mpixel 光学相机,并已经在 SM4 任务的 STS-125 飞行试验中作为相对导航传感器使用过。针对二维可见光相机图像,Argon 采用 GSFC 开发的 GNfir (Goddard natural feature image recognition)算法进行位姿解算,同时利用 Fpose (Flash pose)算法实时处理 3D Flash LIDAR 数据提供 6 自由度的位姿估计,因此 Argon 实现了 3D Flash LIDAR 和高分辨率可见光相机两种传感器的融合,能够最大限度地发挥两种传感器的优势。

为了检验和评估 Argon 的导航能力,GSFC 开展了严格的地面试验,包括在高保真卫星交会对接和空间机器人捕获中的相对姿态测量试验,且都是在模拟轨道环境的多种光照环境下进行的,测试距离从 2 m 到 90 m,测试从 2011 年到 2012 年历时 8 个月,同时对传感器和算法的性能进行了测试。

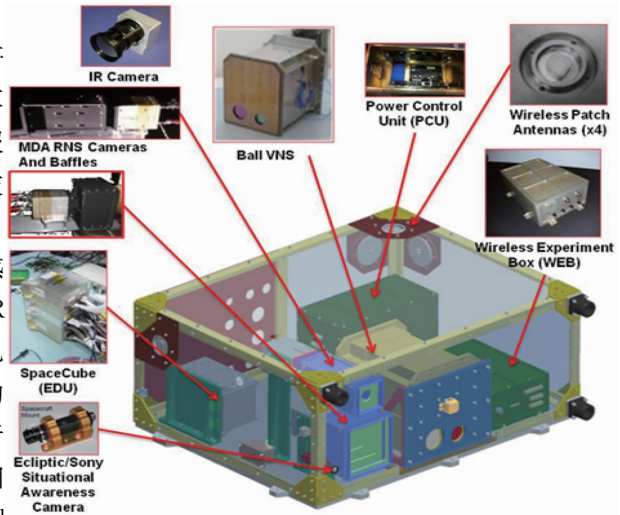


图 6 Argon 系统整套装置构成<sup>[38]</sup>

Fig. 6 Argon package unit configuration<sup>[38]</sup>

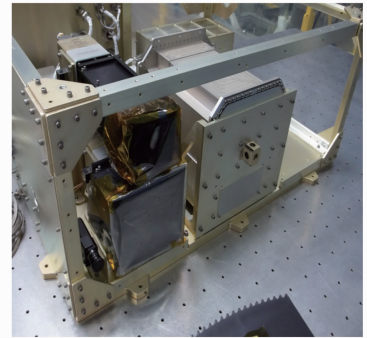


图 7 装配中的 Argon 系统<sup>[38]</sup>

Fig. 7 Argon system during integration<sup>[38]</sup>

## 4 非合作目标位姿光学测量方法比较和研究启示

### 4.1 主要非合作目标位姿光学测量方法比较

表 1 对目前主要非合作目标位姿光学测量方法的性能参数、技术瓶颈和空间适用场合等进行了比较和总结。

### 4.2 研究启示

通过分析目前国内外非合作目标导航中的光学测量方法,可以总结出以下结论:

1) 基于二维成像传感器的测量系统(单目、双目立体视觉)具有最高的空间分辨率,测距精度为毫米量级,但测距精度随距离的平方下降,只适合 20 m 以内的空间操作,特别适合对机械臂的高精度控制和对目标的细微操作;

2) 扫描式激光三维成像具有较高的空间分辨率和较高的测距精度(厘米量级),但需要扫描机构且存在三维图像运动失真,适合于中远距离探测和准静止目标;

3) 扫描三角测量具有较高的空间分辨率,具有与双目立体视觉相近的测距精度及适用场合,但同样具有扫描体制的缺点;

4) 无扫描三维激光成像成为非合作目标视觉导航任务中的新型传感器,可用于临近操作和最终接近阶段的相对导航,甚至设计用于机械臂的操控,但横向分辨率较低,常常需要与高分辨二维传感器组合使用;

5) 基于多传感器融合的位姿测量方法能充分发挥不同传感器的优势,实现优势互补,是未来非合作目标视觉导航的发展方向,目前的新型位姿测量方法多采用这种方法。

表 1 主要非合作目标位姿光学测量方法比较  
Table 1 Comparison of main position and pose optical measurement methods for non-cooperative target

	Monocular vision	Stereo vision	Scanning lidar	Scatterless imaging lidar	Multiple sensor fusion approach	TriDAR	Argon
Structure and cost	Small, low cost	Limited by the size of spacecraft, low cost	Large, high cost, need for mechanical components	Compact and lightweight	Complex, high hardware cost	Complex structure, high cost	Complex structure, high cost
Need scanning or not	No need	No need	Need	No need	Depending on sensor fusion pattern	Need	No need
Active/passive	Passive	Passive	Active	Active	Depending on sensor fusion pattern	Active	Active
Depth information	Not	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Intensity information	Yes	Yes	Not	Yes	Yes	Not	Yes
Resolution	High	High	High	Low	High	High	High
2D/3D	2D	3D	3D	3D	2D & 3D fusion	3D	2D & 3D fusion
Power consumption	Low	Low	Very high	High	High	Very high	High
Sensitivity to light	High	High	Low	High	Low	Low	High
Movement distortion	Inexistence	Inexistence	Existence	Inexistence	Inexistence	Existence	Inexistence
Acquisition rate	Very high	High	Low	Very high	Very high	Low	Very high
Maturity	Very mature	Mature	Very mature	Immature	Immature	Having tested many times on-orbit, mature	In the ground test stage, immature
Detection range	Only short range (less than 2 m)	Commonly short range, limited by baseline	Long range (20~100 m) & medium range (1~20 m)	Long range & medium range	Long range & medium range	less than 5 km	2~90 m
Ranging accuracy	Millimeter level, inversely proportional to the square of the range	Millimeter level, inversely proportional to the baseline length	Centimeter level, inversely proportional to the square of the range	Millimeter to decimeter level, limited by range hole	Depending on sensor fusion pattern	Millimeter level	Centimeter level
Pose estimation algorithm	Bearings-only, using it for shape and relative position estimation known only up to a scale factor	Time consuming correspondence problem; no range data on the surfaces without texture	Problem of solving for the warping of each point cloud, needing to deal huge amounts of data	Feature extraction is restricted by low lateral resolution	Complex multimodal image fusion algorithm, but flexible feature extraction algorithm	Using ICP, needing to deal point cloud warping problem and huge amounts of data	Complex image fusion algorithm, but flexible feature extraction algorithm
Technical bottleneck	No depth data	High-precision calibration and fast image registration	Limited to static target and motion distortion	Low lateral resolution, motion artifacts	Multimodal data fusion	Limited to static target, motion distortion	Multimodal data fusion, range hole
Applicable occasion	Short range rendezvous and docking navigation; mechanical arm fine operation	Spacecraft surface inspection; close manipulation on-orbit	Spacecraft surface inspection; rendezvous and docking navigation; manipulation on-orbit	Rendezvous and docking navigation; manipulation on-orbit; landing point selection	Choosing the best sensor combinations in different occasions	Spacecraft surface inspection; rendezvous and docking on-orbit navigation; manipulation	Rendezvous and docking; target capture, etc
Future development	Beneficial to be integrated on small robotic platforms and enrich sensing modalities	To be further researched around the image registration and the high precision 3D reconstruction	Main 3D imaging system for long detection distance and high technical maturity	Good development prospects; wide application scope; current research hotspot	Development direction of optical measurement, further research on multimodal image data fusion	To be widely used in the non-cooperative space rendezvous and docking target 3D imaging	To be used in target acquisition and autonomous service after further completion of on-orbit test

综上所述,每种方法都有其适用范围,国内外开展的对非合作目标视频导航的研究,主要目的是确定一种最优的光学传感器组合方案,以实现非合作目标的最优逼近与操控。国外在研的新型空间非合作目标位姿测量方法已经由概念设计阶段转为在轨测试阶段,有望在不久的将来应用于空间非合作在轨服务任务中。

## 5 结束语

在非合作在轨服务技术需求的推动下,非合作目标位姿测量方法正由传统的基于单个光学传感器的测量方法,发展为基于多种传感器融合的测量方法,光学测量手段趋于多样化,相继涌现出 3D Flash LIDAR、TriDAR、Argon 等新型测量手段。这些先进的光学测量方法可以获取更多的目标几何形状、颜色、纹理和深度等信息,有利于特征点选择、提取和匹配,提高了位姿解算的精度、实时性和稳健性。可以预见,未来的非合作目标位姿测量方法将向着精细化、自主化和智能化方向发展。

## 参 考 文 献

- 1 Space Telescope Science Institute. Hubble Space Telescope Primer for Cycle 15[EB/OL]. [http://documents.stsci.edu/hst/proposing/documents/cp\\_cy15/primer.pdf](http://documents.stsci.edu/hst/proposing/documents/cp_cy15/primer.pdf).
- 2 Hirzinger G, Landzettel K, Brunner B, *et al.*. DLR's robotics technologies for on-orbit servicing[J]. *Advanced Robotics*, 2004, 18(2): 139–174.
- 3 Nishida S I, Kawamoto S, Okawa Y, *et al.*. Space debris removal system using a small satellite[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(1-2): 95–102.
- 4 Committee on the Assessment of Options for Extending the Life of the Hubble Space Telescope, National Research Council. Assessment of Options for Extending the Life of the Hubble Spacetelescope: Final Report[M]. Washington: National Academies Press, 2005. 8–91.
- 5 Liang Bin, Du Xiaodong, Li Cheng, *et al.*. Advances for in space robot on-orbit servicing non-cooperative spacecraft[J]. *Robot*, 2012, 34(2): 242–256.  
梁 斌,杜晓东,李 成,等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J]. *机器人*, 2012, 34(2): 242–256.
- 6 Xu W, Liang B, Li C, *et al.*. Autonomous rendezvous and robotic capturing of non-cooperative target in space[J]. *Robotica*, 2010, 28(5): 705–718.
- 7 Zhang Yongliang. Key Techniques of Image Information Processing for Non-Cooperative Target-Directed Autonomous Spacecraft[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 3–15.  
张永亮. 面向非合作目标的自主空间飞行器图像信息处理关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 3–15.
- 8 Zhang Shijie, Cao Xibin, Chen Min. Monocular vision based relative pose parameters determination for non-cooperative spacecrafts[J]. *J Nanjing University of Science and Technology*, 2006, 30(5): 564–567.  
张世杰,曹喜滨,陈 闽. 非合作航天器间相对位姿的单目视觉确定算法[J]. *南京理工大学学报*, 2006, 30(5): 564–567.
- 9 Davison A J. Real-time simultaneous localization and mapping with a single camera[C]. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision(ICCV)*, 2003. 1403–1410.
- 10 Augenstein S, Rock S M. Simultaneous estimation of target pose and 3-D shape using the FastSLAM algorithm[C]. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference(GNC)*, 2009. 1–15.
- 11 Augenstein S, Rock S M. Improved frame-to-frame pose tracking during vision-only SLAM/SFM with a tumbling target[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011. 3131–3138.
- 12 Augenstein S, Rock S M. AUV/ROV pose and shape estimation of tethered targets without fiducials[C]. *International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*, 2009. 366–374.
- 13 Fuyuto T, Heihachiro K, Shin'ichiro N. Motion estimation to a failed satellite on orbit using stereo vision and 3D model matching[C]. *International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, 2006. 1–8.
- 14 Segal S, Carmi A, Gurfil P. Vision-based relative state estimation of non-cooperative spacecraft under modeling uncertainty[C]. *IEEE Aerospace Conference*, 2011. 1–7.
- 15 Besl P J, McKay H D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239–256.
- 16 English C, Okouneva G, Saintcyr P, *et al.*. Real-time dynamic pose estimation systems in space: lessons learned for system design and performance evaluation[J]. *International J Intelligent Control and Systems*, 2011, 16(2): 79–96.
- 17 Ruel S, English C, Anctil M, *et al.*. <sup>3D</sup>LASSO: real-time pose estimation from 3D data for autonomous satellite servicing[C]. *The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (ISAIRAS 2005)*, 2005. 1–8.



- 18 Blais F, Picard M, Godin G. Accurate 3D acquisition of freely moving objects[C]. 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 422–429.
- 19 Russell S P, Rock S M. Particle filtering range data for pose estimation under torque-free motion[C]. 14th IASTED International Conference on Robotics and Applications, 2009. 28–36.
- 20 Miller L K, Masciarelli J, Rohrschneider R, *et al.*. Critical advancement in telerobotic servicing vision technology[C]. AIAA SPACE Conference & Exposition, 2010. 1–9.
- 21 Huhle B, Fleck S, Schilling A. Integrating 3D time-of-flight camera data and high resolution images for 3DTV applications [C]. 3DTV Conference—The True Vision, 2007. 1–4.
- 22 Netramai C, Melnychuk O, Joochim C, *et al.*. Combining PMD and stereo camera for motion estimation of a mobile robot [C]. 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 2008. 5417–5422.
- 23 Reulke R. Combination of distance data with high resolution images[C]. ISPRS, Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology, 2006, XXXVI Part 5: 1–5.
- 24 Hahne U, Alexa M. Combining time-of-flight depth and stereo images without accurate extrinsic calibration [C]. International workshop in Conjunction with DAGM'07: Dynamic 3D Imaging, 2007. 325–333.
- 25 A'rni S, Aanas H, Larsen R. Fusion of stereo vision and time-of-flight imaging for improved 3D estimation [C]. International workshop in Conjunction with DAGM'07: Dynamic 3D Imaging, 2007. 425–433.
- 26 Kuhner K D, Stommel M. Fusion of stereo-camera and PMD-camera data for real-time suited precise 3D environment reconstruction[C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006. 4780–4785.
- 27 Ghobadi S E. Real Time Object Recognition and Tracking Using 2D/3D Images[D]. Siegen: Siegen University, 2010. 3–25.
- 28 Zhang Xudong, Gao Juan, Ye Zirui, *et al.*. Non-Cooperative Target Pose Measurement Method Based on 2D and 3D Camera Integration[P]. China Patent 201210044842.8, 2012-07-18.  
张旭东,高 隽,叶子瑞,等. 基于二维相机和三维相机融合的非合作目标姿态测量方法[P]. 中国专利 201210044842.8, 2012-07-18.
- 29 Amiri P J, Gruen A. Integrated laser scanner and intensity image calibration and accuracy assessment[C]. ISPRS Workshop Laser Scanning, 2005, XXXVI-3/W19: 18–23.
- 30 Baltzakis H, Argyros A, Trahanias P. Fusion of range and visual data for the extraction of scene structure information[C]. International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2002, 4: 7–11.
- 31 Reulke R, Scheibe K, Wehr A. Integration of digital panoramic camera and laser scanner data[C]. International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, 2005. 157–169.
- 32 Muehlbauer Q, Kuehnlitz K, Buss M. Fusing laser and vision data with a genetic ICP algorithm[C]. 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. 1844–1849.
- 33 Perrollaz M, Labayrade R, Royère C, *et al.*. Long range obstacle detection using laser scanner and stereovision[C]. Intelligent Vehicles Symposium, 2006. 182–187.
- 34 Valls M J, Dissanayake G. Robotic 3D visual mapping for augmented situational awareness in unstructured environments [C]. International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment (RISE'08), 2008.
- 35 Zhu J, Wang L, Yang R, *et al.*. Fusion of time-of-flight depth and stereo for high accuracy depth maps[C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2008.
- 36 Ruel S, Luu T. Space shuttle testing of the TriDAR 3D rendezvous and docking sensor docking sensor[J]. J. Field Robotics, 2012, 29(4): 535–553. = 37 Ruel S, Luu T. STS | 128 on-orbit demonstration of the TriDAR targetless rendezvous and docking sensor[C]. IEEE Aerospace Conference, 2010.
- 38 Joseph M, John V, Matt S, *et al.*. Pose measurement performance of the argon relative navigation sensor suite in simulated flight conditions[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. 1–25.
- 39 Naasz B J, Epoel J V, Queen S Z. Flight results from the HST SM4 relative navigation sensor system[C]. 33rd AAS Guidance and Control Conference, 2010. 723–744.