



多航天器协同观测的空间目标状态估计研究进展

王兆龙^{1,3,4,5}, 朱文山^{2,3,4,5}, 牟金震^{2,3,4,5*}, 韩飞^{3,4,5}, 敬忠良¹

1. 上海交通大学航空航天学院, 上海 200240
2. 南京航空航天大学航天学院, 南京 211106
3. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109
4. 空间目标感知全国重点实验室, 上海 201109
5. 上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109

*联系人, E-mail: jinzen_mu@163.com

收稿日期: 2024-07-22; 接受日期: 2024-11-29; 网络出版日期: 2024-12-31

国家自然科学基金(编号: U20B2056)、国防基础科研项目(编号: JCKY2021606B002, JCKY2023605C006)和上海市青年科技启明星项目(编号: 23QC1401100)资助

摘要 失效卫星等大型碎片一般处于翻滚状态, 无法提供辅助测量标记, 称为空间非合作翻滚目标. 基于视觉测量的空间非合作翻滚目标状态估计是大型碎片在轨捕获与清除的前提. 传统基于单一观测航天器的测量方法, 难以长期保证良好的观测状态. 多个航天器分别携带视觉相机, 从不同方位同步观测目标, 能有效应对测量过程中的复杂干扰. 基于此, 本文对多航天器协同观测的空间非合作翻滚目标状态估计研究进展进行综述, 从多航天器协同的概念发展、多航天器协同观测的可行性与优势分析、多相机系统自标定、多视角协同观测、空间非合作翻滚目标状态估计、测量误差分析与优化等方面归纳总结, 探讨多航天器协同观测的载荷配置、空间域、基线、组网等关键问题, 并给出未来的研究建议.

关键词 空间非合作翻滚目标, 在轨捕获, 相对状态估计, 多航天器多视角协同观测, 多相机组网

PACS: 07.05.Pj, 07.87.+v, 42.66.Si, 95.75.-z, 87.57.Gg

1 引言

大型空间碎片包括失效卫星、运载火箭末级等, 其数量飞速增长加剧航天器碰撞风险, 一个典型实例是2009年的Cosmos 2251与Iridium 33相撞. 2024年2月, 失效的俄Cosmos 2221卫星与美TIMED卫星仅距20 m, 险些发生碰撞. 针对大型空间碎片的潜在危险, 亟需对其进行在轨主动清理^[1].

大型空间碎片主动清理属于在轨服务的一种任务形式, 如失效卫星捕获与清除, 服务航天器通过机械臂及末端抓捕工具捕获失效卫星, 进而辅助失效卫星再入大气层或者进入不影响正常卫星的坟墓轨道, 以达到减少碎片数量、保障航天器安全的目的. 各航天强国争相开展相关研究, 如美国先后提出Phoenix, Restore-L, MEV (Mission Extension Vehicle)等计划, 欧洲提出DEOS (Deutsche Orbital Servicing), PATEN-

引用格式: 王兆龙, 朱文山, 牟金震, 等. 多航天器协同观测的空间目标状态估计研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 224503
Wang Z L, Zhu W S, Mu J Z, et al. An overview of the state estimation for space non-cooperative target with multi-spacecraft cooperative observation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 224503, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0288](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0288)

DER, Remove DEBRIS, e.Deorbit, Cleanspace-1等计划^[2], 并计划于2025年开展在轨失效卫星的在轨捕获清除. 在这些任务中, 面临目标形貌与运动状态估计、相对位姿估计等一系列挑战难题^[3]. 首先, 大型空间碎片属于非合作目标, 即无法主动与服务航天器进行信息交互、未安装光学标志器且几何模型未知. 其次, 失效卫星在空间干扰力矩及自身异常控制作用下处于自由翻滚状态.

视觉测量因其非接触被动测量特性, 成为空间目标形貌与运动状态估计、相对位姿估计的主要技术途径. 其中, 目标形貌估计包含几何结构重建与抓捕部位识别, 运动状态估计包含旋转轴、进动轴、章动角、进动角速度、自旋角速度等运动参数估计, 相对位姿估计包含逼近过程中的位姿跟踪、抓捕过程中的6自由度位姿估计. 上述视觉测量参数为服务航天器自主逼近与抓捕非合作翻滚目标提供相对导航与感知信息.

美国MEV任务分别在2021年和2022年实现对接高轨目标远地点发动机喷管的捕获和姿轨控制接管, 但其目标均为尚未失效的姿态稳定目标, 且事先已知目标的外形、尺寸等先验信息, 同时, MEV逼近全过程在优选光照、最佳测控弧段下进行. 因此, 目标并非处于翻滚状态, 且规避空间复杂光照环境影响, 对测量时效性也未做约束.

对于大型空间碎片清除任务中面临的非合作翻滚目标视觉测量与状态估计, 存在三方面挑战难题:

(1) 空间复杂光照环境干扰, 测量过程中局部耀光/阴影变化剧烈, 存在特征缺失问题.

(2) 相机视场有限, 翻滚运动导致特征频繁进出视场, 特征动态变化不易跟踪, 测量结果缺乏稳定性.

(3) 翻滚运动存在进动和自旋的耦合, 待估计参数多且复杂.

因此, 面向非合作翻滚目标的捕获需求, 传统基于单个服务航天器的观测难以实现复杂光照干扰与翻滚运动共同影响下的鲁棒视觉测量. 为此, 国内外提出多航天器协同观测的空间非合作翻滚目标视觉测量方法. 通过多航天器协同观测, 可以降低单星绕飞重建过程的时间与燃料损耗, 能够覆盖更大的观测区域, 在相邻视角内对特征进行传递与预测, 利用多视角拼接快速完成三维形貌测量, 且可以利用几何关系求解运动参数, 有效应对翻滚运动导致的特征丢失, 此外还可以避免单视角受光照的影响, 因此对于非合作翻滚目

标的相对状态估计任务具有更强的任务鲁棒性、时效性等优势. 多航天器协同观测方法, 是基于单个观测航天器基础上发展而来的. 若将每个航天器等效为一个观测相机, 多航天器协同观测简化为一个基线可调节的多目相机观测系统. 若每个航天器从不同位置同步观测, 多航天器协同观测简化为多视角观测系统. 若将每个航天器的测量结果进行融合, 多航天器协同观测等效于特征传递与分享系统. 但是, 多航天器协同观测方法仍处于起步阶段, 存在以下几方面的问题需开展研究.

(1) 多航天器多视角空间基准构建问题: 尽管多航天器多视角协同观测简化为一个基线可调节的多目相机观测系统, 但多航天器各自轨迹不同, 相机安装于漂浮基座, 协同测量之前必须确定相机之间的指向与位置, 精度要求达到毫米级. 传统基于GNSS的相对位置确定约厘米级, 且会因轨道不同引起精度下降. 因此, 需要研究多航天器协同观测的视觉标定方法, 通过共视特征完成高精度基准建立.

(2) 多视角多视距多模态融合问题: 多航天器从不同位置同步观测非合作目标, 每个视角下的图像中目标尺度、模态、耀光和阴影影响部位存在差异. 对每个视角图像进行匹配融合是后续形貌与运动状态估计的基础. 因此, 需要研究面向大视差、跨模态、多分辨率下的图像融合方法.

(3) 基于多视角融合的稳定运动状态估计问题: 单个航天器通过位姿跟踪与滤波估计方法估计空间目标运动状态. 多航天器协同观测除具备上述状态估计能力外, 还可以通过基准特征在相邻视角下的检测, 利用基准特征建立纯几何关系解算运动参数, 提升估计快速性与鲁棒性. 但基准特征的选择必须满足两个以上视角可检测、可用于解算无歧义位姿的条件. 此外, 考虑到目标的翻滚运动特性, 对于基准特征在视角间的传递必须可预测.

2 多航天器协同的概念发展

2.1 基于单星观测的空间目标状态估计研究计划

对于稳定状态的空间非合作目标, 状态估计主要是通过视觉相机完成目标的相对位姿估计. 而对于翻滚状态的空间非合作目标, 需要估计的状态相对复杂, 包括章动角与角速率、进动角与角速率、翻滚周期、

最大惯性主轴、相对位姿估计及三维重建等. 目前, 已经在轨验证的空间目标状态估计方法主要针对稳定状态的空间合作/非合作目标, 对于空间非合作翻滚目标的状态估计还未有公开报道的在轨应用案例.

2012年, 美国凤凰(Phoenix)计划以失效卫星的捕获为任务目标, 以星箭对接环作为先验特征, 使用三目视觉系统完成相对位姿测量. 2015年, 美国提出RSGS (Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites)项目, 服务卫星直线逼近目标并绕飞观测, 再由光学相机解算目标相对位姿, 抓捕过程通过机械臂末端的手眼视觉系统在目标上寻找适合抓捕部位, 并利用机器视觉方法提供抓捕部位的位姿, 通过地面试验进一步验证了协同观测技术在抓捕任务中的状态估计能力. 2020年, 美国提出MEV计划, 首次采用立体视觉相机与主动照明系统对失效卫星的相对位姿测量, 并成功利用远地点发动机喷管捕获装置实现稳定非合作目标的在轨捕获, 初步验证立体视觉测量系统对空间目标相对位姿测量任务的有效性.

2002年, 欧空局提出OLEV计划, 采用变焦距立体视觉系统采集目标图像, 并将图像传输至地面指挥系统解算相对位姿. 在后续更新方案中, 服务卫星采用立体视觉相机和主动照明系统实现位姿测量. 2004年, 德国宇航局与加拿大及俄罗斯合作开展TECSAS (Thermionic Energy Conversion & Storage Applied to Sunlight)项目, 在近距离交会阶段使用激光雷达系统和近场双目视觉相机采集目标图像数据, 传回地面指挥系统获得目标的相对位姿. 2011年, 德国宇航局实施DEOS (Deutsche Orbitale Servicing Mission)项目, 该项目可认为是TECSAS项目的延续, 位姿测量使用激光雷达和双目视觉相机, 并搭配照明系统, 抑制超近距离的低光照问题.

2005年, 日本启动“在轨维护系统”(Onboard Maintenance System, OMS)项目, 计划采用双目视觉相机与红外传感器实现位姿测量. 2006年日本启动“空间碎片清理卫星”(SDMR)项目, 在近距离交会抓捕阶段, 提出由双目视觉位姿测量系统引导机械臂与电力缆绳系统捕获空间碎片. 2024年6月, 日本“太空清道夫”对废弃火箭推进器进行50 m绕飞观测, 利用视觉相机实现相对状态估计的同时, 进一步对物体自旋速率和结构状况展开估计.

加拿大与美国合作研制多个用于在轨服务的非合

作目标位姿测量系统, 包括MD-Robotics公司开发的ORPE (Object Recognition and Pose Estimation Toolkit)目标识别与位姿估计系统、Neptec公司开发的LCS (Laser Camera System)激光相机系统和应用非常成熟的TriDAR视觉测量系统等. ORPE是一个立体视觉系统, 依靠目标自然特征进行识别、位姿估计和跟踪. LCS通过激光扫描三角测量方式, 获得目标外表貌的高精度点云, 进而实现目标位姿估计. TriDAR系统是第一个用于非合作目标自主交会的3D传感器, 已经多次成功用于自主交会对接任务(包括“发现”号航天飞机任务、“飞蛾座”航天器与空间站交会对接任务等), 该系统将三角测距激光雷达与ToF (Time-of-Flight) 光学激光雷达三维成像融合到同一个光路中, 通过远距离使用ToF光学激光雷达、近距离使用三角测量系统实现目标远近距离的相对位姿测量.

上述研究项目表明, 当前对于稳定非合作目标的视觉测量已经相对成熟, 成功开展在轨演示验证, 近距离空间目标状态估计主要以视觉系统为主. 然而, 上述任务选择的空间目标均为尚未失效的姿态稳定目标, 且事先已知目标的外形、尺寸等先验信息. 大量空间碎片、失效卫星等非合作目标已失去姿态调整能力, 在太阳光压、重力梯度等摄动力矩, 以及失效前自身残余角动量等综合因素影响下, 一般处于翻滚运动状态. 空间目标的运动形式如图1所示, 图中 $O-xyz$ 表示目标本体坐标系, 目标可能存在的旋转形式可分为绕最小惯量轴 I_2 的自旋运动(图1(a))、绕最大惯量轴 I_1 的平旋运动(图1(b))以及存在章动角的翻滚运动(图1(c)). 图1(a)和(b)所示为初始角速度与最小、最大惯量轴重合时的运动情况, 分别对应单轴自旋及平旋运动状态. 当初始角速度矢量与惯量轴不重合时, 空间目标运动表现为自旋轴绕角动量轴圆锥进动的情形, 如图1(c)所示, 图中建立惯性坐标系 $O-xyz$ 且令 OZ 轴与目标角动量矢量 H 重合, 目标角动量矢量 H 与自旋轴 OZ 的夹角 θ 为章动角^[4].

综上所述, 稳定非合作目标大多用于在轨试验, 且大多为服务航天器自带测试目标, 在轨验证过程中将其抛出, 然后利用视觉测量完成抓捕. 如图1所示, 大多数失效卫星等处于翻滚状态. 面向非合作翻滚目标的捕获需求, 传统基于单个服务航天器的观测可能难以实现复杂光照干扰与翻滚运动共同影响下的鲁棒视觉测量. 为此, 需要开展多航天器协同观测的空间非合

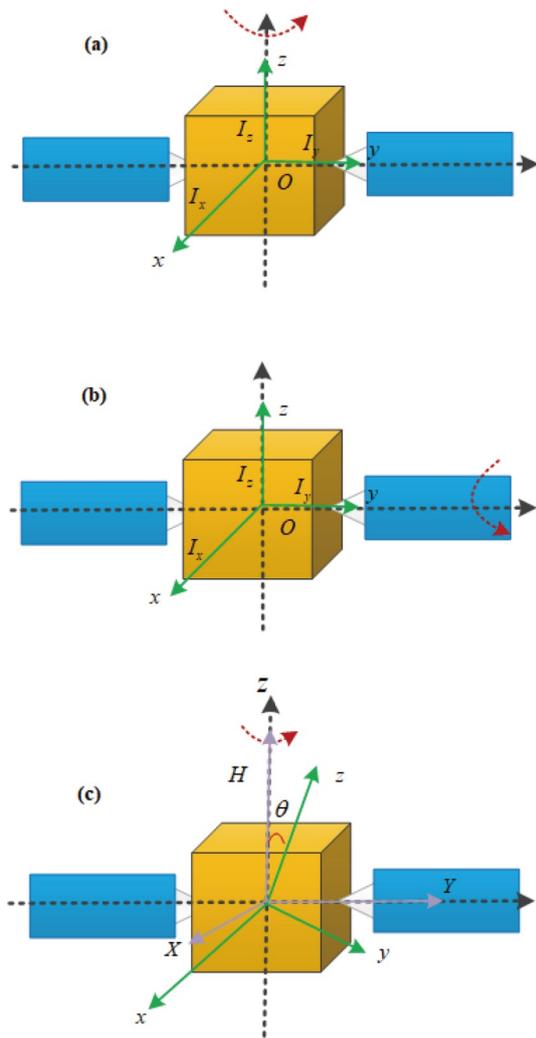


图 1 (网络版彩图)空间非合作目标运动方式. (a) 单旋. (b) 平旋. (c) 含章动角的滚转运动
Figure 1 (Color online) Space non-cooperative motion patterns. (a) Vertical spinning. (b) Horizontal spinning. (c) Rolling with nutation angular.

作翻滚目标视觉测量方法研究.

2.2 多航天器协同观测概念的提出

2022年, 基于单个观测航天器的在轨服务逐渐开始系统性验证^[5], 为多航天器协同观测奠定技术基础. 2023年以来, 基于单个观测航天器的在轨服务行业呈现出明显的商业应用加速的趋势^[6], 加速多航天器协同观测的任务/概念的落实. 美国已经开展多航天器协同技术研究^[7], 提出“弹性太空”概念、F6系统、ANTS (Autonomous Nanotechnology Satellite)任务、超大型天基望远镜在轨集群自组装任务, 并通过ST-5计划、

MMS任务、飓风全球导航卫星集群任务、EDSN (Edison Demonstration of Smallsat Networks)等项目进行在轨技术演示与验证. 以色列提出SAMSON (Space Autonomous Mission for Swarming and Geolocation with Nanosatellites)计划. 欧洲提出模块化镜片在轨集群组装望远镜方案, 并通过NetSat项目、CLUSTER计划试验多航天器在轨操控技术. 尽管上述多航天器主要用于协同探测或者编队飞行任务, 尚不具备对空间非合作翻滚目标清除能力, 但是极大地促进多航天器协同观测领域的发展.

目前, 多航天器协同观测的空间目标状态估计的概念已经形成. 2010年, 德国宇航局(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)提出的iBOSS项目是多航天器协同观测空间目标的雏形, 使用多个微纳“细胞星”协同工作, 完成对失效卫星的模块更换和重新配置. 服务航天器作为“母平台”用于承载和回收“细胞星”, 并为“细胞星”提供视觉感知和导航信息. “细胞星”黏附于失效卫星后, 通过自身的低成本相机对局部区域测量, 通过星间链路“分享、传递与融合”视觉特征, 完成对失效卫星的全局精细测量. 2011年, 美国凤凰计划继续完善了多航天器协同观测概念, 借鉴iBOSS项目, 继续使用服务航天器承载“多细胞星”协作的方式完成对失效卫星的维修(图2). 2015年, DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)资助的“太空光学孔径自组装”(OASIS)项目计划研究通过“多航天器协同”的主交会对接后, 装配成孔径大于5 m的空间光学望远镜, 重点研究标准模块精确协同装配、多目标交会对接, 以及装配过程中的多星协同观测等问题. 2016年, 西北工业大学完善多航天器协同观测空间目标的概念, 分析每个航天器的视觉感知、自重构、避障规划等需求. 2018年, 哈尔滨工业大学

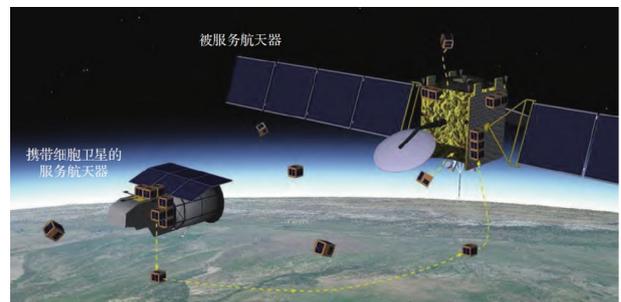


图 2 (网络版彩图) iBOSS项目示意
Figure 2 (Color online) iBOSS project.

针对未来大型空间设施在轨建设问题, 提出多航天器协同操作系统, 并对多智能体协同不确定行为规划、多层次机器人系统构型决策、多智能体协同的无环境地图自主导航以及多智能体分层协同分布式控制等进行了分析^[8]. 2019年, 中国航天系统科学与工程研究院继续完善这一概念, 认为在某种程度上将变革航天器设计、制造、部署和使用方式, 提出多航天器协同观测空间目标状态将成为在轨操控发展新方向^[9]. 2024年, 国防科技大学空天科学学院探讨多航天器协同观测的概念、原理与方法^[10].

从发展趋势看, 由于多航天器协同观测的任务鲁棒性、时效性等优势, 已经成为当前研究的热点. 多航天器协同观测将传统的“大平台”在轨操控转变为“多个小平台”协同操控. 受限于“小平台”所搭载相机性能的限制, 必然存在一个最大的有效观测距离. 考虑到相机视场应尽可能地覆盖目标的运动区域, 还存在最小有效观测距离的限制. 各航天器到目标中心, 构成理想观测视线, 各航天器的相机光轴和其理想观测视线之间的夹角, 应小于一定的角度阈值, 以保证目标活动区域尽可能在相机视场内. 考虑到各个视点获取的图像间相互匹配的需求, 各航天器所搭载的相机光轴之间的夹角, 应处于一定的角度阈值范围之内. 但目前对于上述所提约束条件与机理研究较少. 为此, 有必要综述多航天器协同观测的可行性与优势、多航天器协同观测的目标状态估计、多航天器协同观测的测量误差等内容.

3 多航天器协同观测的可行性与优势分析

3.1 多视角协同观测方面

如前文所述, 多航天器协同观测可以简化为一个基线不固定或不精确已知的多目相机观测系统. 然而, 传统的双目/多目视觉是基线已知的. 为此, 本节将对此差异性、测量影响等进行分析.

等效为双目相机系统, 对于空间目标表面的某一观测点 $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ 的坐标为

$$\begin{cases} X = \frac{u_l - u_0}{u_l - u_r} \cdot B, \\ Y = \frac{v_l - v_0}{v_l - v_r} \cdot B, \\ Z = \frac{f}{u_l - u_r} \cdot B, \end{cases} \quad (1)$$

其中, B 表示基线, (u_l, v_l) 和 (u_r, v_r) 表示空间点在左右图像上的投影, (u_0, v_0) 表示图像的中心, f 为左右相机的焦距. 定义 $u_l - u_r$ 为左右相机在图像中的视差. 由上式看出, 空间点 P 和视差成反比, 与基线长度 B 成正比, 说明双目立体视觉的精度依赖于目标的基线长度. 当基线距离增大时, 微小的视差造成的深度变化明显. 因此, 当两个航天器协同观测简化为双目相机系统时, 航天器之间的基线要远大于传统双目相机基线, 微小的视差 $u_l - u_r$ 造成的误差变化明显. 此外, 当两个航天器协同观测系统的基线不固定或不精确已知时, 必须通过高精度标定或其他辅助设备精确测量多航天器系统之间的基线.

当航天器数量增加后, 比如等效为三目视觉测量系统. 假定空间 $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ 在三台相机成像平面的投影点为 $\mathbf{p}_a(u_a, v_a)$, $\mathbf{p}_b(u_b, v_b)$ 和 $\mathbf{p}_c(u_c, v_c)$, 则相机A和相机B、相机A和相机C以及相机B和相机C可以形成3对双目视觉测量系统. 分别解算的空间点为 $\mathbf{P}_0(X_0, Y_0, Z_0)$, $\mathbf{P}_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 和 $\mathbf{P}_2(X_2, Y_2, Z_2)$, 三个点应重合于 \mathbf{P} 点.

$$\begin{cases} X = \frac{X_0 + X_1 + X_2}{3}, \\ Y = \frac{Y_0 + Y_1 + Y_2}{3}, \\ Z = \frac{Z_0 + Z_1 + Z_2}{3}, \end{cases} \quad (2)$$

上式表明, 空间点 $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ 的最优解融合三目立体视觉测量系统的三组双目视觉测量模型的计算结果, 提升了系统的可靠性.

在公式(1)和(2)中, 双目视觉测量的关键在于特征点的定位与匹配, 其常受限于目标表面的纹理信息是否丰富. 对于太空环境下的非合作目标, 其表面附着包覆层, 纹理信息较为缺乏, 且在一定光照的条件下, 不同姿态的变化都会造成目标表面的特征点亮度值变化. 由于多航天器观测的位置不同, 则同一特征点在多相机系统中的特征信息差异较大, 所以基于图像相似度的同名点匹配方法的误匹配率较高, 而正确的同名点集少之又少. 在双目立体视觉极线约束的基础上, 引入其他航天器的观测相机, 则增加的极线约束可以有效提高图像特征点匹配的正确率. 文献[2,10]表明对于局部匹配, 三目立体视觉测量系统的误匹配率比双目系统减小了50%, 而运算量仅增加了1/4. 通过上述分析, 得出如下结论:

(1) 多航天器组成的多目视觉测量模型解算目标三维信息时, 可以得到最优解, 相较于传统双目测量系统的精度有所提高;

(2) 多航天器组成的多目视觉匹配同名特征点时, 引入其他航天器带来的相互约束条件, 使得特征点在每幅图像上具有唯一的几何位置, 有效提高了图像特征点匹配的正确率;

(3) 相较于单航天器的双目测量系统, 多航天器组成的多目视觉系统包含了3组以上结构参数一致的双目视觉测量系统, 可根据实际应用需要与成像质量调整成像模型, 使应用场景更加丰富;

(4) 多航天器组成的多目视觉系统, 是系统冗余度的体现, 起到互为备份的作用. 当系统中某一航天器因被遮挡或出现故障而失去作用时, 其他航天器的相机可组成双目视觉测量系统, 利用双目视觉位姿算法继续完成对非合作航天器相对位姿测量的任务, 增加测量系统的安全可靠性.

3.2 异构传感器配置方面

对MEV等典型在轨服务任务进行分析, 其视觉测量可以划分为5个阶段.

(1) 1 km–100 m, 即为“追”, 服务航天器远距离接近或者变轨接近失效卫星, 主要通过单目相机的仅测角导航、微波雷达等完成.

(2) 100–60 m, 即为“看”, 服务航天器绕飞失效卫星, 通过激光雷达、单目+激光测距实现目标运动状态估计、三维重建、表面部位识别等.

(3) 60–20 m, 即为“跟”, 服务航天器逼近跟踪失效卫星, 通过闪光激光雷达、双目相机, 或者单目+激光测距等实现目标相对位姿估计.

(4) 20–0.5 m, 即为“抓”, 服务航天器使用机械臂抓捕失效卫星关键部位, 通过激光雷达、双目相机、ToF相机等完成目标相对位姿估计.

(5) 0.5 m以内, 即为“维”, 服务航天器使用机械臂维修、拆卸、更换失效卫星部件, 通过手眼相机、ToF相机等完成目标相对位姿估计.

对上述任务中的传感器进行分析发现, 单目、双目相机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, 比较适合60 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. 扫描式激光雷达具有较高的空间分辨率

和较高的测距精度, 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. 无扫描三维激光雷达成为非合作目标观测任务中的新型传感器, 可用于近距离测量, 但横向分辨率较低, 还需要与单目或者双目组合使用. 基于多传感器融合的视觉测量方法能充分发挥不同传感器的优势, 实现优势互补, 是未来空间目标视觉测量的发展方向. 但航天器的搭载空间、搭载能力和计算单元是有限的, 服务航天器难以搭载全部种类的传感器, 只能选择其中2–3种组合搭载. 加拿大Neptec公司的TriDAR视觉系统采用扫描、三角测量与脉冲测距相结合的方式, 能够从远到近对接的过程中实时提供目标6自由度位姿. 美国戈达德空间飞行中心的Argon视觉系统由两个高分辨率可见光相机、一个3D闪光雷达组成. 多航天器协同观测, 通过分布式观测模式, 将各类传感器分别搭载到多个航天器上, 既解决了多传感器融合、计算单元受限问题, 又增加了观测的灵活性和观测相机的种类, 可扩展为红外相机、结构光相机、多光谱相机等. 通过上述分析, 得出如下结论.

(1) 多航天器观测系统兼容所有的单航天器所搭载的视觉测量相机.

(2) 单航天器所搭载的视觉系统, 为满足空间布局和重量约束等, 一般做得很紧凑, 导致成本高. 多航天器观测系统由于采用分布式搭载, 放宽此约束.

(3) 单航天器所搭载的视觉系统在0.5 m以内的距离操作时, 存在视场角受限问题, 最终的抓捕会依靠机械臂的惯性抓捕关键部位, 弥补测量不全问题. 多航天器观测系统利用多视角、多视点, 有效解决此类问题.

(4) 单航天器所搭载的视觉系统, 能够实现的融合模式单一, 比如灰度图像和深度图的融合、单目图像与激光测距信息的融合等. 多航天器观测系统的融合扩展为点云图、多光谱图、红外图的融合.

3.3 多航天器任务协同方面

如3.2节所述, 基于单个航天器的在轨服务流程概括为: 追、看、跟、抓、维.

“追”, 要求航天器具备轨道机动与交会能力. “看”, 要求航天器具备目标观测与导航能力, 从距离目标数十公里到数公里级, 测量翻滚目标外形与运动状态、相对运动状态等信息. “跟”, 要求航天器具备姿轨耦合逼近跟踪能力, 从距离目标数十公里逐步逼近到数

米处的预定位置并跟踪;“抓”,要求航天器具备目标捕获能力,利用机械臂等捕获装置,完成预定部位抵近与刚性捕获。“维”,要求航天器具备组合体接管与精细操作能力,利用末端操作装置完成对目标的服务或清除的具体操作。

多航天器协同观测的在轨服务仍然遵循以上流程,但流程上的交叉性和重叠性更为灵活。基于单个航天器的在轨服务流程只能按追、看、跟、抓、维顺序执行。多航天器协同完成“追”以后,在“看”“跟”“抓”“维”步骤上可以进行交叉或重叠。多航天器建立任务分配机制,一类航天器专门负责“看”,一类航天器专门负责“跟”,一类航天器专门负责“维”,一类航天器专门负责“维”。在上述分配的基础上,可以将“看”与“跟”合并,为“抓”与“维”提供导航与感知信息。在“抓”和“维”步骤上,既可以实现多航天器协同,又可以实现一个“抓”与一个“维”。通过上述对空间域的分析,得出如下结论。

(1) 多航天器协同观测的任务流程灵活性较高。

(2) 多航天器协同观测可以灵活地切换操作的空间域。

(3) 多航天器协同观测的在轨服务效率远大于单个航天器。

(4) 多航天器协同观测之间频繁的信息交互,需保证组网节点间的高效通信,因此需要更为稳定、快速且安全的通信协议和技术,以应对复杂多变的空间环境,确保多航天器在组网过程中能够实时、准确地交换信息,协同完成任务。

(5) 不同碎片尺寸、形状、运动状态差异大,但现行抓捕设备结构单一,只执行单次抓捕离轨操作、可重用度低。多航天器协同可采用“蜘蛛拉网”形式建立一张覆盖较大的渔网将碎片捕获。

3.4 多航天器观测与多相机组网的异同点分析

多航天器协同观测可以等效为多目视觉系统(或者多相机组网系统)。多相机组网测量构型方式,包括位移传递串联相机网络、并联相机网络、串并联相机混合网络、动联相机网络等,根据测量需求对相机进行组网观测,能够实现基于不稳定观测平台,对大尺寸目标的动态观测,并突破观测范围与测量精度之间的固有矛盾。

位姿传递串联相机网络使用相机和标志物组合成

测量传递站。通过静态基准转换方法将传递站平台坐标系转换至前一站相机坐标系下,传递站中的相机坐标系与平台坐标系的位姿参数可预先标定得到,从而实现多相机系统的坐标系统一,并将测量区域柔性地联系起来。

并联相机网络根据观测范围,在测量平台上布置一个或多个测量相机看向被测目标,同时在平台上布置两个或多个校准相机看向基准控制点,基于坐标系基准转换方法,确定相机坐标系与平台坐标系的转换关系,从而将多相机系统中的测量点位位移变化转换至基准控制点坐标系下,实现不稳定平台亚毫米级静态变形自校准测量。

串并联相机网络是将多个测站串联传递位姿,单个测站中相机并联实现全场变形信息覆盖,实现长距离大范围的时空双维度高精度动态测量。

动联相机网络可将上述3类网络放置在动移动平台上。以位移传递串联相机网络为例,将多相机系统固定在可移动的平台,单次巡绕过程中,随着平台的连续移动,目标的全局特征会被采集到。为解决平台运动问题,同样构建固连约束和同名标志约束两个基本约束,根据任意两次巡绕时采集到的特征点像素变化即可获取同名特征点在两次巡绕间隔内的运行变化。

通过上述分析,多航天器协同观测属于多相机组网的一种特例。与地面多相机组网搭配合作标志不同,多航天器协同观测空间非合作翻滚目标,缺少同名标志点、校准相机、标志物等合作信息,其必须经过多相机系统自标定、多视角图像配准等额外步骤,建立同名标志约束或者坐标系统一后,才可以利用多相机组网的摄影测量方法实现空间目标状态估计。

4 多相机系统自标定研究现状

对于多航天器多相机系统来说,为保证各视角相机采集图像数据的关联性,需要构建各视角相机之间的空间位置关系,称为多相机系统标定。多相机系统的空间基准建立方法可以归为基于参照物标定、无人工辅助标定、基于一致性理论标定、基于深度学习标定、多视角标定。

基于参照物标定的空间基准建立与维持方法^[11,12],需要在多动基座上安装精密标定转台、标定板或者编码块等,利用标志信息构建成像约束方程,

非线性求解空间基准参数, 具有标定精度高且简单的优点, 但航天器承载能力和安装空间有限, 被测对象属于非合作目标, 通常无人工辅助物, 因此该方法并不适用于空间非合作翻滚目标, 需要研究无人工辅助标定物下的多相机空间基准建立方法。

对于无人工辅助标定的多相机空间基准问题, 目前学者主要研究单基座多相机标定方法。Lee等人^[13]提出利用合作目标运动作为参考, 在每个视图序列中估计二维姿态, 将二维姿态提升到三维后计算所有相机的外在参数。Li等人^[14]提出重叠区域光度误差的全自动多相机外部标定方法, 利用由粗到精的随机搜索策略, 解决初始外部参数的大扰动, 弥补非线性优化方法陷入局部最优域的不足。但上述方法的局限性在于:

- (1) 异构相机包含单目相机, 尺度模糊依然存在;
- (2) 参考目标为合作目标, 不适合于空间非合作目标;
- (3) 相比于同构多相机系统, 异构多相机系统需要更多的特征匹配以及额外约束方程;
- (4) 多动基座之间可能不存在重叠区域, 空间基准可能无法建立。

基于一致性理论的多相机基准研究已经广泛应用于无人机群协同感知。CoSLAM通过多相机的特征点匹配、位姿估计和地图构建, 实现基准建立与维持^[15]。DOOR-SLAM对每个共视区建立特征描述子实现基准建立与维持^[16]。通过自然场景进行在线标定, 如基于里程计的轨迹配准^[17]、时序视觉帧密集点云与激光点云的配准^[18]、基于深度学习^[19]等方法, 提取多相机图像的边缘、线特征等进行相关性度量, 主要的限制在于:

- (1) 高度依赖环境, 需要精确的初参, 损失函数无法保证在较大范围的凸性, 否则容易陷入局部极值, 该方法适用于对外参进行微调, 不具有普适性;
- (2) 需要不断计算特征描述子, 并基于高维向量空间中的最近邻搜索实现匹配, 消耗大量的计算资源, 不适合资源受限的天基场景。

神经网络因能够准确描述输入输出在欧氏空间的高维非线性映射被引入相机标定应用中。以目标像素坐标作为网络输入, 对应世界坐标作为理想输出, 在信息正反向传播过程中修正隐藏层神经元权重, 以期最小化实际与期望输出误差, 得到精确标定模型。

基于深度学习标定作为一种隐式校正方法, 存在一系列问题。

- (1) 缺乏相应数据集。数据零散、数目较少且对不同类型相机无法通用, 难以形成大规模的、通用的数据集用于相机标定网络的训练。
- (2) 包容性差。基于有限数据估计模型参数的全局最优解, 对重要数据特征的缺失较为敏感, 且中间参数修正过程不可视, 不确定度较高。
- (3) 精度低。标定精度主要取决于数据集的准确性和数量。此外存在噪声干扰, 参数优化易陷入局部最优解。

多航天器多相机标定可以等效为多视角标定。常见的多视角标定有两种思路^[20]: 第一种思路是将多视角系统看作多个双目系统的组合, 首先对每个双目系统进行单独的标定, 以确定其相机的内外部参数。之后, 通过不同双目系统公共视域内的标志物, 将其坐标系转换到相同坐标系下。第二种思路是利用立体标定器, 如三维立体标定架、立体标定板或球体靶标等进行多相机的标定。第二种标定方法虽可以在标定的同时直接统一坐标系, 但依然依赖靶标, 尚不适合于非合作场景。也有一些工作将两种思路进行结合, 如Malowany等人^[21]将三套双目标定系统的坐标系进行统一。

基于上述分析, 多航天器协同观测空间目标属于有公共视场的多相机系统标定, 可利用共面约束的方法完成多个相机之间外参标定, 最后可将多个相机系统的外参标定结果转换到同一个全局坐标系下。然而, 与地面无公共相机的多相机系统标定采用经纬仪、激光跟踪仪等辅助设备建立全局坐标系统一所有局部标定数据不同, 多航天器协同观测只能利用视场内观测目标特征的固连约束关系, 通过固连约束关系传递得到非相邻相机间的位姿关系。

综上, 目前国内外在天基任务中, 针对多相机系统的空间基准建立与维持的理论和方法较少, 尚缺乏能够在实际中进行验证的算法。多航天器多个相机同时对目标表面同一点成像, 存在共视约束普遍。利用共视约束信息, 可以在不需要特殊标定靶标的情况下, 简便地完成多相机的标定。因此, 未来可借鉴多相机标定方法、多视角自标定方法, 利用空间目标的自然特征, 研究无人工辅助标定物下的多相机自标定方法。

5 多视角协同观测研究进展

目前, 多视角协同观测研究主要集中于多航天器协同定位、多航天器协同观测、多视角三维重建等方面.

5.1 多航天器协同定位

基于多星协同定位, 主要用于远距离接近目标, 为服务航天器提供引导信息. 多星定位方法有目标质心定位、测向交叉定位、滤波估计定位和天文定位^[22]. 质心定位算法的本质是将物理学中的质心定理应用于定位算法中, 将多航天器视为多质点系统, 假设每一个测站的位置已知, 在所有测站的权重都相同的情况下, 可以计算得到目标位置的估计值. 测向交叉几何定位方法是在多星同步观测的情况下, 根据星载传感器直接或间接获得目标视线角来建立几何模型, 然后利用多星视线的交汇关系建立方程组进行目标位置的解算.

李劲^[23]利用双星测向交叉定位的方法实现对多个直线运动目标的定位. 李飞等人^[24]引入卫星指向目标的视线测量信息建立几何观测模型实现定位. 叶飙等人^[25]提出在多星定位中加入选星算法, 利用观测条件最好的卫星执行定位. 高玉东和崔凯凯^[26]考虑质心提取精度对定位精度的影响, 结合双星定位原理建立几何定位模型实现目标定位. 乔鹏等人^[27]基于三角交会原理提出一种应用于天基探测系统的定位方法. Lu等人^[28]研究测站数量对测向交叉定位精度的影响.

综上, 多星协同定位能够定向和编目空间碎片, 保障服务航天器有效接近碎片. 其中正在发展的多传感器联合定位, 如结合激光、雷达、可见光相机等手段为多航天器多视角协同观测提供了参考.

5.2 多航天器协同观测

针对多航天器协同观测, 文献^[29]提出一种基于星敏感器的空间目标监视网络构型. 文献^[30,31]提出多星敏感器协同的空间目标关联方法. 文献^[32]根据多星敏感器协同观测与多目视觉类似, 利用对极几何原理实现空间目标的关联. 文献^[33]利用模糊关联原理实现中断航迹间的关联. 文献^[34]提出一种基于正弦拟合的空间目标关联方法, 可区分来自不同轨道的空间目标. 文献^[35]采用多个航天器从不同视点位置

观测非合作目标, 基于多视点协作观测数据对目标进行三维重建, 根据连续观测帧之间的目标点云匹配解算其姿态变化, 最后通过EKF (Extended Kalman Filter)滤波算法求解出空间非合作目标的姿态参数. 文献^[36]研究空间多机器人对非合作目标的多视线协同仅测角相对导航问题. 文献^[37]提出基于双空间机器人的多视线分布式相对导航方法. 文献^[38]针对高轨卫星近场态势感知(Near-Field Situation Awareness, NSA)问题, 提出基于多视线融合的多星协同NSA方案, 研究考虑相对状态估计精度、光照约束等因素的NSA队形设计方法.

综上, 多航天器协同观测目前主要研究多航天器之间的数据关联, 用于远距离目标的检测. 对于空间非合作目标状态估计问题, 目前的研究较少. 多航天器从不同位置同步观测非合作目标, 需要通过基准特征建立视角间的关联, 并作为后续特征传递与分享的基准.

5.3 多视角图像配准

多航天器从不同视角拍摄空间目标, 将每个视角的图像配准, 是后续特征提取与传递的基础. 多视角图像配准可以分为基于区域和基于特征两类. 基于区域算法, 利用待配准图像的灰度或频域信息来构建二者的相似性指标, 然后根据相似性指标来确定图像的配准程度. Simper^[39]通过一个分割判决的系统使该类算法能够拟合透视形变和镜头失真等变换. Gonçalves等人^[40]引入基于哈夫变换的相似性, 降低灰度特征差异引起的影响. 基于相似性的图像配准对于特征不明显的区域处理较为困难, 而且计算复杂度高^[41]. Kolar等人^[42]在配准过程中引入了相位相似性, Karani等人^[43]引入了基于离散余弦变换的相似性, 这些改进提高了配准鲁棒性. Sarvaiya等人^[44]引入了对数极坐标变换, 提高了配准的精度, Tong等人^[45]引入了奇异值分解等改进, 将频域配准的精度提高到了亚像素级.

基于特征算法, 从待配准图像中提取具有显著区分性的特征, 然后再利用得到的特征之间的关系进行特征匹配, 进而实现图像之间的配准. Pedrosa和Barcelos^[46]提出基于边缘曲率和自动平滑滤波器的角点提取算法. Zhang等人^[47]利用曲线的梯度分布特征及其相关矩阵来进行角点提取. Elias和Laganiere^[48]提出基于厚薄两幅边缘图联合进行快速角点检测算法.

Zhang等人^[49]提出利用Canny算子和Gabor滤波器构建轮廓图, 然后寻找最大曲率位置算法. Smith等人^[50]利用像素周边存在的相似点的数目作为角点评判标准. Shui和Zhang^[51]对各类型的角点分别进行建模, 构建对噪声不敏感的角点检测算法.

上述方法主要针对对齐图像匹配或小视差匹配. 多航天器的多视角图像存在2类特殊问题: (1) 不同视角、不同阴影等影响下的图像特征匹配问题; (2) 图像特征与激光雷达点云对准问题. 针对上述图像对齐, 主要难点在无法找到足够特征匹配区域(称为匹配特征缺失区域). 基于全局单应变换等方法忽略匹配特征缺失区域, 而只将有足够匹配特征区域中的部分单应变换系数传递给匹配特征缺失区域, 或者采用将匹配特征缺失区域转化为有足够匹配特征区域的间接方式, 匹配效果仍不满足需求. 实际上, 位于相同平面的区域应该拥有相同的完整单应变换而非部分变换参数. 由此可利用单应变换系数扩散的思想设计基于单应性扩散约束的三步网格优化视差图像匹配方法, 在第一步网格优化时获得有足够匹配特征区域的单应变换, 再基于单应性扩散约束将这些单应变换系数扩散到邻域网格, 进行第二步网格优化, 在保证优化任务简洁高效的前提下实现单应变换系数的传播与图像匹配. 然而, 网格优化方法普遍通过保持有足够匹配特征区域的部分单应变换系数来建模匹配特征缺失区域, 并结合全局预变换约束. 这种约束不符合实际场景中一个物体平面的视角变换情况^[52].

综上, 多视角图像配准的研究多集中于各视角间仅有较小视角差距且各视角图像分辨率一致的前提. 对于多航天器协同观测系统, 每个航天器的观测位置、相机参数可能均不相同, 通常存在明显的视距和分辨率差异. 因此, 未来需要重点研究跨分辨率配准、大视差约束下的图像配准方法.

5.4 多视角三维重建

航天器从不同视角拍摄空间目标, 通过融合每个视角获得的点云或者深度信息, 得到空间目标完整三维模型, 为服务航天器状态估计提供了必要的输入.

运动恢复结构(Structure-from-Motion, SfM)是从多视角图像恢复场景稀疏三维点云和影像位姿的算法^[53]. SfM三维重建的效果极大程度上取决于多视角影像之间的数据关联. 面对输入数据参差不齐的质

量、剧烈变化的视角、杂乱分布的位置、未知的先验信息等特点, 现有SfM算法受限于数据关联质量, 尚无法令人满意. 首先, 当多视角规模较大时, 其中通常存在较多的数据冗余和分布不均匀, 会影响SfM算法的效率和精度; 其次, 当多视角图像存在较大的尺度和视角变化时, 特征的检测和描述能力不足, 导致数据关联存在不充分、不可靠的问题; 最后, 当场景存在较多的重复纹理结构时, 数据关联中有着大量的歧义性匹配, 易导致SfM结果出现大面积几何错位.

在SfM基础上, 可结合多视角深度估计或者利用RGB-D相机提供的深度图进行稠密化^[2]. 多视角深度估计的经典方法包括ORB-SLAM系列、MVS-Net^[54]系列等方法. 基于RGB-D相机的三维重建其实可以分为两种: 一种是对静态场景的三维重建, 以Kinect-Fusion, Kintinuous与ElasticFusion为典型代表, 一种是对动态场景的三维重建, 以DynamicFusion为典型代表. 综上所述, 多航天器多相机协同观测可与多视角三维重建技术结合. 通过已经标定的航天器替代单航天器绕飞观测的过程, 在多视角图像配准基础上, 可一次性完成重建. 因此, 多航天器多视角三维重建借鉴上述方法的基础上, 通过相机标定关系将每个视角下的重建结构进行融合.

5.5 多航天器协同多目标跟踪

单个航天器的多目标跟踪研究较多. 谢贝旭等人^[55]提出一种改进的GMC-CPHD空间多目标跟踪算法. Zhou等人^[56]提出基于深度Q-learning的端到端空间目标跟踪框架. Li等人^[57]提出一种基于机器学习的空间碎片检测和跟踪方法. 胡云鹏等人^[58]提出基于多观测目标历史信息的实时跟踪方法. 上述方法存在的问题:

- (1) 在连续跟踪过程中计算量较大;
- (2) 对于目标检测依赖程度高;
- (3) 在视场内目标出现遮挡、粘连后, 当视场再次出现此目标, 跟踪精度和稳定性剧烈下降;
- (4) 单航天器多目标跟踪的视场覆盖范围非常有限.

因此, 研究多航天器协同下的多目标跟踪, 能够实现分散时变多目标鲁棒跟踪. 乔鹏等人^[59]提出一种多星空间目标跟踪算法. 江林海等人^[60]提出天基分布式无源探测的空间多目标跟踪方法, 设计了多平台多目标跟踪交互的一致性信息融合方案. 郑斌琪等人^[61]提

出自适应一致性UKF的分布式目标跟踪方法. Wang等人^[62]提出空间多机器人协同的多视线仅测角相对导航方法. Lowe等人^[63]提出非合作目标多视线分布式相对导航方法, 并用于SWARM-EX编队任务. 多航天器协同下的多目标跟踪的难点在于平台间的可匹配区域建立. 可匹配区域建立后, 可实现多目标匹配和关联.

多航天器协同的多目标跟踪与跨摄像头多目标跟踪方法有类似之处. 跨摄像头多目标跟踪融合多个摄像头的信息实现多个摄像头之间的特征传递和轨迹关联, 可以将跨摄像头之间的多个目标在多个监控区域下联合跟踪. 现阶段跨摄像头多目标跟踪识别的运动目标主要是行人与车辆. 跨摄像头多目标跟踪数据集主要可分为两种: 多摄像头之间有重叠区域和摄像头间无重叠区域. 其中, 重叠视角指多个摄像头间拍摄视角重叠的场景, 由于监控角度、摄像头景深以及像素差异等原因, 同一个目标在不同摄像头拍摄的视频图像会出现不同的目标大小、视角、清晰度和运动速度等问题, 所以有重叠区域的多目标跟踪任务需要进行图像特征融合. 非重叠视角存在视野盲区导致摄像头之间的轨迹关联相较于重叠视角会更困难. 目标离开当前摄像头视角后进入另一个摄像头视角时, 多个摄像头间的协同关联是解决摄像头无重叠区域目标跟踪任务的关键^[64].

6 空间非合作翻滚目标状态估计研究进展

6.1 目标状态估计的基础问题

视觉测量是从相机获取的图像, 解算被测目标在三维空间中的姿态、位置等信息. 相机针孔成像模型描述了世界坐标系($O_w-X_wY_wZ_w$)、相机坐标系($O_c-X_cY_cZ_c$)、图像物理坐标系($o-xy$)和图像像素坐标系(o_e-uv)的变换关系.

相机坐标系与世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{3 \times 3}$ 和平移向量 $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$ 来描述. 令空间中某一点 P 在世界坐标系与相机坐标系下的齐次坐标分别为 $\mathbf{P}_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 和 $\mathbf{P}_c(X_c, Y_c, Z_c)$, 存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, $\mathbf{0}_3 = (0, 0, 0)^T$, \mathbf{R} 为 3×3 标准正交矩阵.

令空间目标点 \mathbf{P} 的像点 \mathbf{p} 在图像物理坐标系下的坐标为 $(x, y)^T$, 根据坐标系的定义可知其在相机坐标系下的坐标为 $(x, y, f)^T$, 其中 f 为焦距, 表示光心 O_c 到图像平面的距离, 在图3中表示为光心 O_c 到主点 o 之间的线段. 由于光心 O_c 、物点 \mathbf{P} 及其像点 \mathbf{p} 三点共线, 根据三角形相似原理得出:

$$\begin{cases} x = \frac{fX_c}{Z_c}, \\ y = \frac{fY_c}{Z_c}, \end{cases} \quad (4)$$

其中, $(X_c, Y_c, Z_c)^T$ 为物点 \mathbf{P} 在相机坐标系下坐标. 以齐次坐标形式表示空间目标点 \mathbf{P} 和像点 \mathbf{p} , 得到

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{N}\mathbf{P}_c, \quad (5)$$

上式就是基本成像模型的代数表示, 其中, $\mathbf{N} = \text{diag}(f, f, 1)(\mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{0})$ 称为相机矩阵. 通过上式可以得出, 坐标系建立、图像处理及目标特征辨识(求解 $\mathbf{p} = (x, y)^T$)、三维重建或立体匹配(求解 $\mathbf{P}_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$)、相机标定(求解 \mathbf{N})是目标状态估计的基础问题. 后续章节将介绍目标状态估计的进展^[65].

6.2 单目视觉方法

单目相机进行空间状态估计存在一些缺点, 例如,

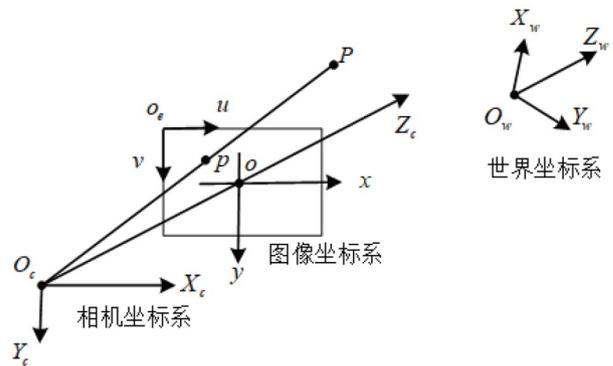


图3 相机针孔成像模型
Figure 3 Camera pinhole imaging model.

被动式的测量对光照条件敏感; 无法直接获得关于目标三维测量等. 特别是后者限制了单目相机的应用, 因此一些研究通过引入额外信息来解决. 文献[66]将单目相机和距离传感器获得的测量数据融合, 通过UKF估计目标状态. 由于单目视觉缺少深度信息, 一般采用多视角观测方法实现测量, 视角之间的匹配直接影响最终的结果. 上述原理与多航天器多视角协同观测的原理类似, 但多航天器可以通过自标定建立精准的视角匹配关系, 因此上述方法可以直接指导多航天器的研究.

6.3 双目视觉方法

文献[67]采用立体视觉追踪目标上若干特征点, 采用迭代扩展卡尔曼滤波估计出相对位姿参数和特征点位置, 然后采用最大后验概率估计获得目标的最优惯性张量和位姿参数. 文献[68]建立一种基于立体视觉的非合作目标相对运动模型, 对非合作目标的旋转运动和平移运动进行解耦, 设计EKF算法对非合作目标的相对状态进行估计. 文献[69]采用立体视觉测量系统跟踪目标上的若干特征点, 用反双曲正切函数来描述非合作目标的惯量参数, 结合自由航天器姿态动力学模型来传播非合作目标的角速度, 进而设计EKF算法以同时估计非合作目标的相对状态和惯量参数. 综上, 基于双目相机方法是在单目相机方法基础上, 增加了极线约束, 简化了单目多视角估计的难度. 当多航天器数量为2时, 多航天器多视角协同观测等效于双目相机. 但多航天器多视角协同观测的基线比双目相机要长、观测视角比双目相机广, 因此更有优势.

6.4 基于深度相机/激光雷达的方法

Li等人^[70]提出一种基于连续点云的状态估计方法, 利用扩展卡尔曼滤波估计目标的位姿参数. 文献[71]提出了一种非接触式的卫星运动参数辨识方法, 根据整体位姿变换与两种运动间的关系, 建立非线性方程组求解出翻滚卫星的运动参数. Li等人^[72]通过提取飞行时间相机获取的卫星太阳翼平面点云位姿跟踪, 再进行ICP (Iterative Closest Point) 精配准, 实现非合作卫星的位姿跟踪. 文献[73]提出一种基于激光雷达点模板匹配的位姿估计算法. 文献[74]通过试验验证非线性最小二乘方法对非合作目标的5种典型翻滚状态具有最优的鲁棒性. 文献[75]研究基于三维激光

雷达和立体视觉信息融合的目标位姿运动估计方法.

综上, 基于深度相机/激光雷达方法简单, 能够直接获取目标的深度信息, 简化了单目相机获取深度所需要的特征点三角化步骤、双目相机获取深度所需要的同名特征点匹配步骤. 但点云的计算量较大, 单个观测航天器对目标实施多视角测量过程中, 匹配次数较多, 导致计算速度下降. 多航天器多视角同步观测, 能够极大降低匹配次数, 从而降低计算量.

6.5 多源多特征融合方法

目前, 多源多特征融合研究可以归为: 几何特征融合、多相机融合以及神经网络多尺度特征融合三种方式. 几何特征融合方面, Meng等人^[76]提出直线特性与椭圆特征融合的位姿测量方法. Mu等人^[77]通过椭圆特征和点特征融合, 稳定建立了测量坐标系. 上述研究方法仅支持2类特征融合, 对于特征识别率矩阵, 存在置信度赋值困难问题. 多相机融合方面, 束安等人^[78]提出三个单目相机融合的位姿测量方法, Wang等人^[79]提出三维激光雷达和单目视觉融合的非合作目标姿态测量方法, Pan等人^[80]基于深度相机和单目相机融合方法, 冯春等人^[81]提出单目视觉与激光测距仪融合的非合作目标位姿测量方法. 但上述方法集中于单个航天器固定基线安装多个相机. 神经网络多尺度特征融合方面, Chen等人^[82]采用HRNet提取多尺度关键点特征, Lotti等人^[83]提出基于 EfficientNet-Lite的关键点回归模型. 上述研究方法适合于多视角灰度图像的特征融合, 但应用于多航天器多相机系统, 会存在以下局限性:

(1) 缺少对点云图、深度图等多源图像的多特征操作;

(2) 特征融合的特征参量大且超参数敏感.

综上, 多源多特征融合方法适合于单个观测航天器对目标实施多视角测量, 能够增加测量的鲁棒性. 对于多航天器多视角同步观测, 更重要的在于视角间的基准特征提取与检测问题.

6.6 视场角受限下的航天器位姿估计

单个观测航天器对目标实施超近距离测量, 由于相机视场角的限制, 视觉相机存在无法获取完整的特征图像, 进而导致无法完成相对位姿测量问题. Gao等人^[84]针对单个观测航天器的视场角受限问题, 提出利

用点状光源与单目相机组成点结构光视觉测量系统进行特征重构与位姿测量的方法. 宋代平等人^[85]提出多相机非共视场的非合作圆特征位姿测量方法. Du等人^[86]提出一种基于两台协调相机的大型非合作目标姿态确定方法, 选取卫星构型中常见的矩形特征作为识别目标, 提出两个摄像头协同分担识别任务, 即每个摄像头提供矩形的部分图像, 然后通过信息融合获得完整的特征.

6.7 基于多视角融合的空间目标状态估计

杜荣震^[87]提出基于多视角ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) 图像的空间目标在轨状态反演方法, 利用多站光学-ISAR联合观测, 通过光学图像精确的尺寸特征和ISAR图像的多普勒特征, 反演空间目标状态参数. Zhao等人^[88]提出一种基于多航天器协同观测的姿态确定方法, 利用协同观测数据构建目标的三维点云数据, 相邻两帧之间的点云匹配确定姿态变化信息, 并在此基础上通过EKF估计翻滚目标的姿态信息. Matsuka等人^[89]提出多航天器协同的非合作方目标状态估计方法, 3个追踪航天器通过局部网络交换关键点特征, 共同估计目标的相对运动学状态. 孙冲等人^[90]提出一种基于多航天器协同观测的非合作目标姿态运动学状态参数识别方法, 多航天器从不同位置观测目标, 对目标进行三维重建, 根据连续观测帧之间的目标点云匹配解算其姿态变化. Zhou等人^[91]对各观测视角获取的图像信息分别进行特征提取, 并在时序图像序列中进行持续跟踪, 当观测视角所跟踪的特征点出现遮蔽现象时, 所观测到遮蔽现象的观测点将遮蔽的特征点传递给能够完全观测到该特征点的另一个观测视角中, 并通过所传递的观测视角在获取的图像中对特征点继续跟踪. Nallapu等人^[92]航天器协同观测的小天体目标三维重建方法, 地面实验过程中, 通过2架无人机搭载视觉相机绕飞小天体模型进行多视角拼接. Felicetti和Emami^[93]针对碎片清除过程中的复杂光照环境, 设计一种“主从跟随”式航天器协同观测, 并在“主航天器”上进行图像处理, 通过卡尔曼滤波技术估计碎片运动状态. 随后, Felicetti和Emami^[94]研究多航天器协调观测空间碎片过程中的姿态协调问题. 在文献^[93,94]基础上, Felicetti等人^[95]提出多航天器分布式光学传感器网络的空间碎片在轨监视算法. 多航天器间共享观测图像, 当某一个视角检测到碎片后, 利用

共享轨迹实现多航天器光学传感器共同指向碎片的目. Yuan等人^[96]针对非合作翻滚目标的参数估计问题, 提出一种基于双星协同观测的位姿和惯性参数估计算法. 首先, 结合视觉传感器的图像, 设计双星的双矢量四元数扩展卡尔曼滤波器. 其次, 每颗卫星的估计值都将作为容错联邦扩展卡尔曼滤波器的输入.

综上, 基于多视角的空间目标状态估计仍处于起始阶段. 当前的研究趋势已经由多点协同测量向特征传递与分享方向发展, 但如何选择基准特征进行传递尚未有公开文献. 基于多视角的空间目标状态估计遵循单视角状态估计的基本原理, 使用的传感器与传统方法一致, 但多视角的空间目标状态估计能够将原有的“测量+滤波”状态估计方法扩展为纯几何解算, 即多个航天器之间利用位姿估计建立目标的运动方程, 在文献^[72]基础上通过几何解耦方式求解状态参数.

6.8 多航天器协同观测的空间目标状态估计分析

基于单航天器的空间非合作翻滚目标状态估计是多航天器协同观测的基础. 基于单航天器的空间非合作翻滚目标状态估计基本步骤为: (1) 单视角图像获取; (2) 图像处理与目标辨识; (3) 特征选择与匹配; (4) 视觉测量模型建立; (5) 基于滤波的运动参数估计. 而多航天器协同观测的空间非合作翻滚目标状态估计基本步骤为: (1) 多视角图像获取; (2) 多视角图像融合; (3) 图像处理与目标辨识; (4) 特征选择与匹配; (5) 视角间特征传递与分享; (6) 特征跟踪; (7) 视觉测量模型建立; (8) 基于滤波或基于特征几何运动关系求解运动参数.

通过上述对比, 多航天器协同观测的最突出特点为: 多视角融合、特征传递分享机制、特征几何运动的运动参数解耦. 如公式(5)所示, 多视角融合增加坐标系建立、图像处理及目标特征辨识、三维重建或立体匹配的鲁棒性. 特征传递分享机制提高对空间非合作目标的观测性能和效率, 有效解决特征点被遮蔽的现象. 多视角间整合特征跟踪路径, 得到连续跟踪过程中的目标特征点的运动轨迹. 特征几何运动的运动参数解耦, 将原有的“测量+滤波”状态估计方法扩展为纯几何解算, 利用目标特征点的运动轨迹求解出翻滚运动参数, 摆脱了传统方法对前后帧的过度依赖, 更适合翻滚目标状态估计.

7 多航天器协同观测的测量误差分析与优化

视觉测量的本质是基于确定的内外参矩阵获得世界坐标点到像素坐标点的映射。多航天器协同观测的视觉测量误差,除包含单个观测航天器观测的误差源外,还包含多航天器之间的数据传输误差、特征融合误差、特征分享与预测误差、多相机标定误差、透视投影误差等,具有链路复杂问题。

如前文所述,假设多航天器协同观测等效为双目视觉系统时,相机基线距、相机光轴夹角直接影响目标测量精度。当相机光轴与基线夹角过小时,三角测量的三角关系较弱,对测量误差影响大。当夹角过大时,相机接近于平行光轴,无法进行三角测量,引起较大测量误差。系统综合测量误差为测量误差传递系数和测量误差相乘,那么多航天器协同观测的位置应该存在最优范围,使得测量误差传递系数最小,从而使系统综合测量误差最小。

对于空间目标的视觉测量误差,目前的研究主要考虑单个观测航天器观测下的测量误差。霍炬等人^[97]分析相机内部参数误差、投影矩阵误差和图像坐标误差之间的关系。周静等人^[98]分析标定参数误差与位姿测量精度之间的关系。郝颖明等人^[99]研究测量误差、焦比误差和主点坐标误差对位姿测量误差的影响。郝仁杰等人^[100]综合考虑相机内参、镜头畸变、图像点、靶标三维点等误差因素,将其同时引入位姿测量模型进行分析。Liu等人^[101]分析特征提取误差对位姿的影响。Zhang等人^[102]分析误差累积造成的漂移误差问题。He等人^[103]研究基座抖动引起的测量误差问题。胡国良^[104]建立理想双目测量系统误差分析模型,从量化的角度去分析不同的硬件误差与算法误差对于测量系统的最终精度影响。随着相机数量的增加,特征提取点误差等因素会导致相机网络的误差传递与累积,从而使得测量方程的病态程度增加。为此,张跃强^[105]研究固定基座多相机系统的测量误差传递机理及抑制方法。上述研究的局限性在于:

- (1) 只分析单一误差源对位姿测量的影响,缺少全链路误差源的建模与分析;
- (2) 多种动态时变误差因素的存在,误差静态描述无法适应误差随空间和时间的动态变化;
- (3) 建立的优化算法扩展到误差链耦合系统的优

化时,会出现过早收敛、易陷入局部最优的现象;

(4) 对位姿误差耦合的分析,将其分解成若干子系统并将耦合项直接忽略,但随着多基座多相机系统的非线性复杂程度的提高,该方法可能难以实现。

综上,单个航天器观测的误差分析方法提供有利借鉴,但多航天器协调观测的误差分析与优化方法目前较少。多航天器系统的多相机自标定是影响测量结果的重要因素。多相机测量系统的外参数会随着航天器运动过程而发生变化,其对测量的影响程度如何,是否超出测量任务的需求,是否超出测量系统的精度,应如何利用多航天器协同观测的优势弥补,这些问题值得深入研究。多航天器协同观测方法虽然可以大幅扩展视觉测量的测量范围,但受测量原理限制,测量误差不可避免会随着视角的增多不断累积,如何有效地抑制相机网络的累积误差,在确保满足测量精度的前提下提高测量范围,仍然值得深入研究。此外,多航天器系统间通信带宽、位置分布、信息传输与发射功率、观测相机配置等与测量误差之间的关系,需要开展更深入的分析研究。

8 研究挑战与建议

根据国内外调研现状分析发现,尽管各航天器强国提出多航天器协同观测的概念,但针对空间非合作翻滚目标的多星多视角协同状态估计方法仍处于起步阶段。多航天器协同观测属于基线未知或者基线不固定的多目视觉(或者多相机)系统,依然服从立体视觉测量原理。多航天器协同观测系统可以同时捕捉空间目标在不同视角或多个时间点的图像,通过关联各视角的图像数据,以覆盖目标的完整结构^[106],从而克服因视场和精度固有矛盾带来的测量误差,实现更精确和全面的结构捕捉和分析。多航天器协同观测属于有共视约束的多相机系统标定,可利用空间目标的共面约束完成多个相机之间外参标定,最后将多个相机系统的外参标定结果转换到同一个全局坐标系下。一般情况下,多相机系统要求各相机之间同步触发,以获取各相机在不同视角下对目标的成像。硬触发直接控制相机的触发动作,因此可以提供高精确性和同步性,适用于需要高精度同步的应用,如高速摄影、精密测量和实时控制。多航天器协同观测可以利用星间链路实现软触发,同步性在毫秒量级。于起峰院士团

队^[107,108]提出的多相机网络理论、方法与技术已在无人机等空中平台开展应用,解决大型目标测量难题,可为多航天器协同观测的空间目标测量提供重要参考.多机器人协同SLAM系统^[109,110]包含多个移动机器人或者无人机,分别携带多类型传感器,通过子地图拼接、姿态传递实现了全地图感知,与多航天器协同观测具有理论相似性,可为多航天器协同观测的地面试验提供参考.目前的挑战在于以下几个方面.

(1) 多航天器多视角基准构建方面,基于自标定方法通过共视约束可以扩展到空间场景应用.对于失效卫星,其表面覆盖高反射的包覆层导致目标表面光滑、少纹理,传统基于自然提取的方法建立共视约束较为困难,需设计符合失效卫星表面自然特征提取的新方法.

(2) 多视角多视距多模态融合方面,每个视角下的图像中目标尺度、模态、耀光和阴影影响部位存在差异,如果图像配准使用刚性变换,配准精度无法保障,需要构建非刚性形变的模型.非刚性变换能够更好地拟合待配准图像间的真实变化,但是由于变换的形式复杂多样,需重新设计一个“最优”的非刚性变换方法.

(3) 基于多视角融合的稳定运动状态估计方面,多视角间通过基准特征建立几何关系,进一步求解该几何关系来实现位姿运动参数估计.需要设计基准特征提取与识别方法,以此满足2个以上视角可检测、可解算无歧义位姿.现有的研究只考虑多航天器协同观测的同步测量方法.针对位姿跟踪中所面临的异步测量问题,目前的研究较少,需要研究多航天器异步测量数据的信息融合方法.

(4) 多航天器多相机配置方面,现有的方法主要考虑“多航天器+单目相机”的配置方式,未来应考虑“多航天器+ToF+结构光+双目相机+红外相机”等多类型配置.ToF相机光照稳定性强、实时性高但分辨率低.

双目相机分辨率高但实时性低、光照敏感.结构光相机可以应对目标表面无纹理问题,测量精度高,但测量距离有限.红外相机能够实现阴影环境下的测量,但缺少纹理特征.发展多类型配置,能够实现非合作翻滚目标高时效性状态估计.

(5) 基于多航天器协同观测的空间目标特征数据库构建方面,多航天器协同观测的突出特点在于相邻视角间的特征分享与预测.若将多航天器协同观测过程中,每个视角提取到的视觉特征进行数据库管理,则为特征分享与预测提供了一条最便捷的途径.如何建立、优化特征数据库是未来值得研究的方向.

(6) 基于多航天器协同观测的空间目标位姿估计方面,可将多航天器等效为多组双目测量系统,运用摄影测量方法获取空间目标特征点的全局三维坐标并建立全局坐标系.文献^[111]设计双航天器分别携带单目相机,通过等效为双目相机,利用坐标转换方法将两组测量单元的坐标系对齐到全局坐标系下,从而协同获取非合作的深度信息,综合分析了观测视场、附件遮挡、控制精度等与深度测量精度之间的关系.为此,将摄影测量得到的初始坐标系转换至目标坐标系下的方法值得深入研究.坐标转换过程中还存在一定的误差,并可能导致误差累积,后续还需要进一步研究坐标转换精度.

(7) 多航天器协同观测系统的误差分析方面,含相机基座抖动、多航天器数据传输、多视角特征融合的状态估计全链路误差非线性耦合,耦合的复杂性、累积性、随机性导致位姿结果存在野值.因此,对于多航天器协同观测系统,需要考虑各类误差源对状态测量的影响,提出指导多航天器观测位置布置的最佳构型,如将高性能相机部署在观测条件较差的区域,从而减少对整个系统能观测度的影响.

参考文献

- Xu Y J, Liu X L, He R J, et al. Space debris active removal mission planning: A review (in Chinese). *Control Decis*, 2024, 39: 371–380 [许英杰, 刘晓路, 贺仁杰, 等. 空间碎片主动移除任务规划研究综述. *控制与决策*, 2024, 39: 371–380]
- Mu J Z, Hao X L, Zhu W S, et al. Review and prospect of intelligent perception for non-cooperative targets (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 2021, 41: 1–16 [牟金震, 郝晓龙, 朱文山, 等. 非合作目标智能感知技术研究进展与展望. *中国空间科学技术*, 2021, 41: 1–16]
- Zhu W S, Mu J Z, Li S, et al. Review and prospect of spacecraft pose estimation based on deep learning (in Chinese). *J Astronaut*, 2023, 44: 1633–1644 [朱文山, 牟金震, 李爽, 等. 基于深度学习的航天器位姿估计研究进展. *宇航学报*, 2023, 44: 1633–1644]
- Lu Y, Liu X G, Zhou Y, et al. Review of detumbling technologies for active removal of uncooperative targets (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2018, 39: 33–45 [路勇, 刘晓光, 周宇, 等. 空间翻滚非合作目标消旋技术发展综述. *航空学报*, 2018, 39: 33–45]

- 5 Tang H W, Deng G, Song B. Overview of developments in the field of space defense and services in 2022 (in Chinese). *Space Int*, 2023, 3: 20–25 [唐浩文, 邓刚, 宋博. 2022年太空攻防和太空服务领域发展综述. *国际太空*, 2023, 3: 20–25]
- 6 Zhao Y J, Tang H W. Overview of developments in the field of space defense and services in 2023 (in Chinese). *Space Int*, 2024, 4: 28–33 [赵玉洁, 唐浩文. 2023年太空攻防和太空服务领域发展综述. *国际太空*, 2024, 4: 28–33]
- 7 Wen X. Space exploration is entering the era of spacecraft cluster (in Chinese). *Frontiers*, 2017, 5: 19–26 [闻新. 太空探索正在进入航天器集群时代. *人民论坛 学术前沿*, 2017, 5: 19–26]
- 8 Yue C F, Lu L, Wu Y H, et al. Research progress and prospect of the key technologies for on-orbit spacecraft swarm manipulation (in Chinese). *J Astronaut*, 2023, 44: 817–828 [岳程斐, 陆浪, 吴云华, 等. 在轨集群操控关键技术研究进展与展望. *宇航学报*, 2023, 44: 817–828]
- 9 Jia P. Modular reconfigurable spacecraft will become a new direction of spacecraft development (in Chinese). *Space Int*, 2019, 5: 42–45 [贾平. 模块化可重构航天器将成为航天器发展新方向. *国际太空*, 2019, 5: 42–45]
- 10 Zheng Z X, Bai Y Z, Chen Z J, et al. Spacecraft covert maneuvering: Concepts, principles and methods (in Chinese). *J Astronaut*, 2024, 45: 1065–1077 [郑中旭, 白玉铸, 陈致钧, 等. 航天器隐蔽机动: 概念、原理与方法. *宇航学报*, 2024, 45: 1065–1077]
- 11 Zhang J, Yu H, Deng H, et al. A robust and rapid camera calibration method by one captured image. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2018, 68: 4112–4121
- 12 Xu Q Y, Yang L Y, Niu Z Y, et al. High-accuracy calibration of multi-camera positioning system based on precision angle reference (in Chinese). *Acta Optica Sin*, 2019, 39: 0115001 [徐秋宇, 杨凌辉, 牛志远, 等. 精密角度基准下的多相机定位系统高精度标定. *光学学报*, 2019, 39: 0115001]
- 13 Lee S E, Shibata K, Nonaka S, et al. Extrinsic camera calibration from a moving person. *IEEE Robot Autom Lett*, 2022, 7: 10344–10351
- 14 Li J, Pi J, Wei P, et al. Automatic multi-camera calibration and refinement method in road scene for self-driving car. *IEEE Trans Intell Veh*, 2024, 9: 2429–2438
- 15 Zou D, Tan P. CoSLAM: Collaborative visual SLAM in dynamic environments. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2012, 35: 354–366
- 16 Lajoie P Y, Ramtoula B, Chang Y, et al. DOOR-SLAM: Distributed, online, and outlier resilient SLAM for robotic teams. *IEEE Robot Autom Lett*, 2020, 5: 1656–1663
- 17 Chien H J, Klette R, Schneider N, et al. Visual odometry driven online calibration for monocular lidar-camera systems. In: *Proceedings of 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. Cancun: IEEE, 2016. 2848–2853
- 18 Nagy B, Kovács L, Benedek C. Online targetless end-to-end camera-Lidar self-calibration. In: *Proceedings of 2019 16th International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*. Tokyo: IEEE, 2019. 1–6
- 19 Schneider N, Piewak F, Stiller C, et al. Regnet: Multimodal sensor registration using deep neural networks. In: *Proceedings of 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Los Angeles: IEEE, 2017. 1803–1810
- 20 Cheng X N, Ma Q W, Ma S P. Self-calibration based multi-view 3D digital image correlation measurement method and its application (in Chinese). *Trans Beijing Institute Technol*, 2024, doi: 10.15918/j.tbit1001-0645.2024.047 [程向楠, 马沁巍, 马少鹏. 自标定多视角三维数字图像相关测量方法及其应用. *北京理工大学学报*, 2024, doi: 10.15918/j.tbit1001-0645.2024.047]
- 21 Malowany K, Malesa M, Kowaluk T, et al. Multi-camera digital image correlation method with distributed fields of view. *Optics Lasers Eng*, 2017, 98: 198–204
- 22 Li Y, Huang W, Zhou J, et al. Development status and prospects of near space observatories (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 2024, 44: 1–15 [李瑶, 陈忻, 饶鹏. 空间目标天基光学定位方法综述. *中国空间科学技术*, 2024, 44: 1–15]
- 23 Li J. A dynamic track initiation algorithm for passive bearing-crossing location systems (in Chinese). *J Univ Electron Sci Technol China*, 2006, 35: 894–896+912 [李劲. 测向交叉定位系统的动态航迹起始算法. *电子科技大学学报*. 2006, 35: 894–896+912]
- 24 Li F, Yan G Y, Li H Y. Study on the target location and configuration analysis of the space tracking and surveillance system (in Chinese). In: *Proceedings of the First China Space Security Conference in Sustainable Development of Space Resources*. Yantai, 2015. 36–40 [李飞, 颜根廷, 李海阳. 空间目标跟踪与监视系统对目标定位及星座构型分析研究. 见: *空天资源的可持续发展—第一届中国空天安全会议论文集*. 烟台, 2015. 36–40]
- 25 Ye B, Zeng Z K, Feng G, et al. Research on trajectory estimation and selection based on observation data of stss (in Chinese). *Aerospace Shanghai*, 2014, 31: 7–11 [叶飏, 曾占魁, 冯刚, 等. 基于低轨预警卫星测量数据的弹道重构与选星算法研究. *上海航天*, 2014, 31: 7–11]
- 26 Gao Y D, Cui K K. Method of space target optical detection and positioning based on micro satellite (in Chinese). *J Naval Aviation Univ*, 2016, 31: 365–371 [高玉东, 崔凯凯. 基于微小卫星的空间目标光学探测定位方法. *海军航空工程学院学报*, 2016, 31: 365–371]

- 27 Qiao P, Lyu X N, Zhao J S, et al. Space target tracking and positioning algorithm using multi-satellites (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2021, 30: 9–15 [乔鹏, 吕晓宁, 赵军锁, 等. 应用多星的空间目标跟踪定位算法. *航天器工程*, 2021, 30: 9–15]
- 28 Lu F, Gao B, Xing C, et al. The influence of the number of measuring participants on the location error in multi-station bearing-crossing location. *Fire Control Command*, 2011, 36: 69–72
- 29 Feng F. Research on Ubiquitous Perception of Space Targets Based on Star Sensors (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Aerospace Engineering University, 2019. 12–33 [冯飞. 基于星敏感器的空间目标泛在感知技术研究. 硕士学位论文. 北京: 航天工程大学, 2019. 12–33]
- 30 Feng F, Li H N, Zhang Y S, et al. An improved synchronized orbit determination method based on distributed star sensors. In: *Proceedings of International Astronautical Congress*. Washington, 2019. 1–5
- 31 Huang Q S. Research on Space Target Association Technology Based on Distributed Star Sensor (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Aerospace Engineering University, 2020 [黄秋实. 基于分布式星敏感器的空间目标关联技术研究. 硕士学位论文. 北京: 航天工程大学, 2020]
- 32 Huang Q S, Zhang Y S, Feng F. Space target synchronization association method under distributed star sensor (in Chinese). *Chin J Sci Instrum*, 2019, 40: 106–113 [黄秋实, 张雅声, 冯飞. 分布式星敏感器下空间目标同步关联方法. *仪器仪表学报*, 2019, 40: 106–113]
- 33 Huang Q S, Zhang Y S, Feng F. Algorithm of space track segment association under distributed star sensor (in Chinese). *Syst Eng Electron*, 2020, 42: 1007–1013 [黄秋实, 张雅声, 冯飞. 分布式星敏感器下空间目标航迹段关联算法. *系统工程与电子技术*, 2020, 42: 1007–1013]
- 34 Huang Q S, Zhang Y S, Feng F. Short-arc association algorithm for space target based on sine fitting (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 2020, 40: 111–118 [黄秋实, 张雅声, 冯飞. 基于正弦拟合的空间目标短弧关联算法. *中国空间科学技术*, 2020, 40: 111–118]
- 35 Zhao D, Sun C, Yuan J P, et al. Multi-view-based cooperative observation method for space non-cooperative target's attitude determination (in Chinese). *J Northwest Polytech Univ*, 2021, 39: 267–277 [赵迪, 孙冲, 袁建平, 等. 基于多航天器协同观测的空间非合作目标姿态参数在轨识别方法研究. *西北工业大学学报*, 2021, 39: 267–277]
- 36 Han F, Liu F C, Wang Z L, et al. Multiple line-of-sight angles-only relative navigation by multiple collaborative space robots (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2021, 42: 316–326 [韩飞, 刘付成, 王兆龙, 等. 空间多机器人协同的多视线仅测角相对导航. *航空学报*, 2021, 42: 316–326]
- 37 Gao X H, Liang B, Pan L, et al. Distributed relative navigation of geo non-cooperative target based on multiple line-of-sight measurements (in Chinese). *J Astronaut*, 2015, 36: 292–299 [高学海, 梁斌, 潘乐, 等. 高轨非合作目标多视线分布式相对导航方法. *宇航学报*, 2015, 36: 292–299]
- 38 Fan D W, Cain W W, Yang L P, et al. Multi-line-of-sight fusion based configuration design for near-field situation awareness in high orbit (in Chinese). *Syst Eng Electron*, 2023, 45: 3984–3994 [范大伟, 蔡伟伟, 杨乐平, 等. 基于多视线融合的高轨近场感知队形设计. *系统工程与电子技术*, 2023, 45: 3984–3994]
- 39 Simper A. Correcting general band-to-band misregistrations. In: *Proceedings of International Conference on Image Processing*. Lausanne: IEEE, 1996. 2: 597–600
- 40 Gonçalves H, Gonçalves J A, Corte-Real L, et al. CHAIR: Automatic image registration based on correlation and Hough transform. *Int J Remote Sens*, 2012, 33: 7936–7968
- 41 Lucchese L, Doretto G, Cortelazzo G M. A frequency domain technique for range data registration. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2002, 24: 1468–1484
- 42 Kolar R, Harabis V, Odstrcilik J. Hybrid retinal image registration using phase correlation. *Imag Sci J*, 2013, 61: 369–384
- 43 Karani R, Sarode T K. Image registration using discrete cosine transform and normalized cross correlation. In: *Proceedings of IJCA Proceedings on International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology, India: IEEE*, 2012. 28–34
- 44 Sarvaiya J, Patnaik S, Kothari K. Image registration using log polar transform and phase correlation to recover higher scale. *J Pattern Recognit Res*, 2012, 7: 90–105
- 45 Tong X H, Zhen Y, Xu Y S, et al. A novel subpixel phase correlation method using singular value decomposition and unified random sample consensus. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2015, 53: 4143–4156
- 46 Pedrosa G V, Barcelos C A Z. Anisotropic diffusion for effective shape corner point detection. *Pattern Recognit Lett*, 2010, 31: 1658–1664
- 47 Zhang X, Wang H, Smith A W B, et al. Corner detection based on gradient correlation matrices of planar curves. *Pattern Recognit*, 2010, 43: 1207–1223

- 48 Elias R, Laganieri R. JUDOCA: Junction detection operator based on circumferential anchors. *IEEE Trans Image Process*, 2012, 21: 2109–2118
- 49 Zhang W C, Wang F Y, Zhu L, et al. Corner detection using Gabor filters. *IET Image Process*, 2014, 8: 639–646
- 50 Smith S M, Brady J M. SUSAN—A new approach to low level image processing. In: *Proceedings of International Journal of Computer Vision*. Norwell: Springer, 2015. 45–78
- 51 Shui P L, Zhang W C. Corner detection and classification using anisotropic directional derivative representations. *IEEE Trans Image Process*, 2013, 22: 3204–3218
- 52 Chen Y Q, Zheng H C, Yan Z W, et al. Parallax image alignment with two-stage mesh optimization based on homography diffusion constraints (in Chinese). *Acta Automat Sin*, 2024, 50: 1129–1142 [陈殷齐, 郑慧诚, 严志伟, 等. 基于单应性扩散约束的二步网格优化视差图像对齐. *自动化学报*, 2024, 50: 1129–1142]
- 53 Gong Y. Research on Data Association for 3D Reconstructions from Multi-View Images (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Wuhan: Wuhan University, 2023 [龚焱. 面向多视角影像三维重建的数据关联研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2023]
- 54 Wang S Q, Zhang J Q, Li L Y, et al. Application of MVSNet in 3D reconstruction of space objects (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2022, 49: 176–185 [王思启, 张家强, 李丽圆, 等. MVSNet在空间目标三维重建中的应用. *中国激光*, 2022, 49: 176–185]
- 55 Xie B X, Zhang Y, Chen J T, et al. An improved GM-C-CPHD algorithm for spatial multi-target tracking (in Chinese). *Aerospace Shanghai*, 2024, 41: 89–96 [谢贝旭, 张艳, 陈金涛, 等. 一种改进的GM-C-CPHD空间多目标跟踪算法. *上海航天*, 2024, 41: 89–96]
- 56 Zhou D, Sun G, Lei W, et al. Space noncooperative object active tracking with deep reinforcement learning. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2022, 58: 4902–4916
- 57 Li B, Huang J, Feng Y, et al. A machine learning-based approach for improved orbit predictions of LEO space debris with sparse tracking data from a single station. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2020, 56: 4253–4268
- 58 Hu Y P, Li K B, Chen L. Toward space situational awareness: A space-based autonomous optical tracking method for space objects (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 424–434 [胡云鹏, 黎克波, 陈磊. 面向空间态势感知的天基可见光空间目标自主跟踪方法. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51: 424–434]
- 59 Qiao P, Lyu X N, Zhao J S, et al. Space target tracking and positioning algorithm using multi-satellites (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2021, 30: 9–15 [乔鹏, 吕晓宁, 赵军锁, 等. 应用多星的空间目标跟踪定位算法. *航天器工程*, 2021, 30: 9–15]
- 60 Jiang L H, Gong B C, Liu C K, et al. Space multi-target tracking method for space-based distributed passive detection (in Chinese). *Syst Eng Electron*, 2024, 46: 2789–2797 [江林海, 龚柏春, 刘传凯, 等. 天基分布式无源探测的空间多目标跟踪方法. *系统工程与电子技术*, 2024, 46: 2789–2797]
- 61 Zheng B Q, Li B Q, Liu H W, et al. Distributed target tracking based on adaptive consensus UKF (in Chinese). *Optics Precision Eng*, 2019, 27: 260–270 [郑斌琪, 李宝清, 刘华巍, 等. 采用自适应一致性UKF的分布式目标跟踪. *光学精密工程*, 2019, 27: 260–270]
- 62 Wang S, He C, Gong B, et al. Cooperative angles-only relative navigation algorithm for multi-spacecraft formation in close-range. *Comput Model Eng Sci*, 2023, 134: 121–134
- 63 Lowe S, Fitzpatrick D, Buynovskiy A, et al. Concept of operations for SWARM-EX: A three cubesat formation-flying mission. In: *Proceedings of 2024 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky: IEEE, 2024. 1–13
- 64 Zhang P, Lei W M, Zhao X L, et al. A survey on multi-target multi-camera tracking methods (in Chinese). *Chin J Comp*, 2024, 47: 287–309 [张鹏, 雷为民, 赵新蕾, 等. 跨摄像头多目标跟踪方法综述. *计算机学报*, 2024, 47: 287–309]
- 65 Xia J Y. Researches on Monocular Vision Based Pose Measurements for Space Targets (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2012 [夏军营. 空间目标的单目视觉位姿测量方法研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2012]
- 66 Volpe R, Sabatini M, Palmerini G B. Pose and shape reconstruction of a noncooperative spacecraft using camera and range measurements. *Int J Aerospace Eng*, 2017, 2017: 1–13
- 67 Segal S, Carmi A, Gurfil P. Stereovision-based estimation of relative dynamics between noncooperative satellites: Theory and experiments. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2014, 22: 568–584
- 68 Wang D Y, Zhang L, Zhu W H, et al. Autonomous relative navigation for noncooperative target using stereo vision measurements (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 024509 [王大轶, 张磊, 朱卫红, 等. 基于双目光学图像信息的空间非合作目标自主相对导航方法. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49: 024509]
- 69 Feng Q, Pan Q, Hou X L, et al. A parameterized method to estimate relative pose and inertia information of a non-cooperative target (in

- Chinese). *J Astronaut*, 2021, 42: 1128–1138 [冯乾, 潘泉, 侯晓磊, 等. 一种参数化非合作目标相对位姿和惯量估计方法. *宇航学报*, 2021, 42: 1128–1138]
- 70 Li Y, Wang Y, Xie Y. Using consecutive point clouds for pose and motion estimation of tumbling non-cooperative target. *Adv Space Res*, 2019, 63: 1576–1587
- 71 Lu R R, Sun H B, Fu S F, et al. Point cloud registration based satellite motion parameter identification method (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2019, 56: 211–220 [鲁荣荣, 孙海波, 付双飞, 等. 一种基于点云配准的卫星运动参数辨识方法. *激光与光电子学进展*, 2019, 56: 211–220]
- 72 Li P, Wang M, Zhou D, et al. A pose measurement method of a non-cooperative spacecraft based on point cloud feature. In: *Proceedings of Chinese Control and Decision Conference*. Hefei: IEEE, 2020. 4977–4982
- 73 Guo W, Hu W, Liu C, et al. Pose initialization of uncooperative spacecraft by template matching with sparse point cloud. *J Guid Control Dyn*, 2021, 44: 1707–1720
- 74 Lampariello R, Mishra H, Oumer N W, et al. Robust motion prediction of a free-tumbling satellite with on-ground experimental validation. *J Guid Control Dyn*, 2021, 44: 1777–1793
- 75 Peng J, Xu W, Liang B, et al. Pose measurement and motion estimation of space non-cooperative targets based on laser radar and stereo-vision fusion. *IEEE Sens J*, 2018, 19: 3008–3019
- 76 Meng C, Li Z, Sun H, et al. Satellite pose estimation via single perspective circle and line. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2018, 54: 3084–3095
- 77 Mu J, Li S, Xin M. Circular-feature-based pose estimation of noncooperative satellite using time-of-flight sensor. *J Guid Control Dyn*, 2024, 47: 840–856
- 78 Shu A, Pei H D, Duan H X. Trinocular stereo visual measurement method for spatial non-cooperative target (in Chinese). *Acta Optica Sin*, 2021, 41: 163–171 [束安, 裴浩东, 段慧仙. 空间非合作目标的三目立体视觉测量方法. *光学学报*, 2021, 41: 163–171]
- 79 Wang Y, Zhang Z, Huang Y, et al. High precision pose estimation for uncooperative targets based on monocular vision and 1D laser fusion. *J Astronaut Sci*, 2024, 71: 1–26
- 80 Pan W, Zhu F, Hao Y, et al. Fast and precise 6D pose estimation of textureless objects using the point cloud and gray image. *Appl Opt*, 2018, 57: 8154–8165
- 81 Feng C, Wu H T, Chen B. Method for relative pose parameters between spacecrafts based on mixing of multi-sensor (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2015, 44: 1616–1622 [冯春, 吴洪涛, 陈柏. 基于多传感器融合的航天器间位姿参数估计. *红外与激光工程*, 2015, 44: 1616–1622]
- 82 Chen B, Cao J, Parra A, et al. Satellite pose estimation with deep landmark regression and nonlinear pose refinement. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops*. Seoul: IEEE, 2019. 2816–2824
- 83 Lotti A, Modenini D, Tortora P, et al. Deep learning for real-time satellite pose estimation on tensor processing units. *J Spacecr Rockets*, 2023, 60: 1034–1038
- 84 Gao X H, Liang B, Pan L, et al. A monocular structured light vision method for pose determination of large non-cooperative satellites. *Int J Control Autom Syst*, 2016, 14: 1535–1549
- 85 Song D P, Lu L. Non-cooperative circle characteristic pose measurement using multiple cameras without public field of view (in Chinese). *Infrared Techn*, 2020, 42: 93–98 [宋代平, 陆璐. 多相机非共视场的非合作圆特征位姿测量方法. *红外技术*, 2020, 42: 93–98]
- 86 Du X, Liang B, Xu W, et al. Pose measurement of large non-cooperative satellite based on collaborative cameras. *Acta Astronaut*, 2011, 68: 2047–2065
- 87 Du R Z. On-Orbit State Estimation Methods of Space Targets Utilizing Multi-View ISAR Images (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xidian University, 2022 [杜荣震. 基于多视角ISAR图像的空间目标在轨状态反演方法. 博士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2022]
- 88 Zhao D, Sun C, Zhu Z, et al. Multi-spacecraft collaborative attitude determination of space tumbling target with experimental verification. *Acta Astronaut*, 2021, 185: 1–13
- 89 Matsuka K, Santamaria-Navarro A, Capuano V, et al. Collaborative pose estimation of an unknown target using multiple spacecraft. In: *Proceedings of 2021 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky: IEEE, 2021. 1–11
- 90 Sun C, Zhao D, Deng Z X. A method of feature information transfer and cooperative tracking in the observation of space tumbling non-cooperative targets (in Chinese). China Patent: CN202011199729.8, 2021-02-02 [孙冲, 赵迪, 郑子轩. 一种空间翻滚非合作目标观测过程中

的特征信息传递与协作跟踪方法. 中国发明专利: CN202011199729.8, 2021-02-02]

- 91 Zhou L, Wang A Q, Wu L P, et al. Agent collaboration technology based on multi-camera pose monitoring system. *Trans Nanjing Univ Aeronaut Astronaut*, 2023, 40: 77–84
- 92 Nallapu R T, Xu Y, Schuler T, et al. Development of a hardware demonstration platform for multispacecraft reconnaissance of small bodies. *IEEE J Miniatur Syst*, 2023, 4: 283–304
- 93 Felicetti L, Emami M R. A multi-spacecraft formation approach to space debris surveillance. *Acta Astronaut*, 2016, 127: 491–504
- 94 Felicetti L, Emami M R. Attitude coordination of multiple spacecraft for space debris surveillance. *Adv Space Res*, 2017, 59: 1270–1288
- 95 Felicetti L, Emami M R. Spacecraft formation for debris surveillance. In: Proceedings of 2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2017. 1–12
- 96 Yuan J, Hou X, Sun C, et al. Fault-tolerant pose and inertial parameters estimation of an uncooperative spacecraft based on dual vector quaternions. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: J Aerospace Eng, 2019, 233: 1250–1269
- 97 Huo J, Cui J S, Wang W X. Error analysis of monocular visual position measurement based on coplanar feature points (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2014, 43: 144–150 [霍炬, 崔家山, 王伟兴. 基于共面特征点的单目视觉位姿测量误差分析. 光子学报, 2014, 43: 144–150]
- 98 Zhou J, Hao Y M, Zhu F, et al. Influence of the error of camera parameters on the accuracy of pose measurement (in Chinese). In: Proceedings of The Ninth Youth Academic Conference of China Instrumentation Society. Huangshan, 2007. 565–569 [周静, 郝颖明, 朱枫, 等. 摄像机标定参数误差对位姿测量精度的影响. 见: 中国仪器仪表学会第九届青年学术会议论文集. 黄山, 2007. 565–569]
- 99 Hao Y M, Zhu F, Ou J J, et al. Error analysis of P3P pose estimation (in Chinese). *Comp Eng Appl*, 2008, 44: 239–242 [郝颖明, 朱枫, 欧锦军, 等. P3P位姿测量方法的误差分析. 计算机工程与应用, 2008, 44: 239–242]
- 100 Hao R J, Wang Z Y, Li Y R. Error analysis method for monocular vision pose measurement system (in Chinese). *J Appl Optics*, 2019, 40: 79–85 [郝仁杰, 王中宇, 李亚茹. 一种单目视觉位姿测量系统的误差分析方法. 应用光学, 2019, 40: 79–85]
- 101 Liu Y, Xie Z, Liu H. Three-line structured light vision system for non-cooperative satellites in proximity operations. *Chin J Aeronaut*, 2020, 33: 1494–1504
- 102 Zhang Z, Zhao R, Liu E, et al. A fusion method of 1D laser and vision based on depth estimation for pose estimation and reconstruction. *Rob Auton Syst*, 2019, 116: 181–191
- 103 He Y, Liang B, Zou Y, et al. Depth errors analysis and correction for Time-of-Flight (ToF) cameras. *Sensors*, 2017, 17: 92
- 104 Hu G L. Research on Short-Range Pose Measurement Technology of Space Non-Cooperative Target Based on Vision Information (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2020 [胡国良. 基于视觉信息的空间非合作目标近距离位姿测量技术研究. 博士学位论文. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2020]
- 105 Zhang Y Q, Chen M J, Hu B, et al. Transmission mechanism and suppression methods of measurement error based on camera networking (in Chinese). *Acta Optica Sin*, 2023, 43: 128–140 [张跃强, 陈铭杰, 胡彪, 等. 基于相机组网的测量误差传递机理及抑制方法. 光学学报, 2023, 43: 128–140]
- 106 Gao G, Yao L, Li W, et al. Onboard information fusion for multisatellite collaborative observation: Summary, challenges, and perspectives. *IEEE Geosci Remote Sens Mag*, 2023, 11: 40–59
- 107 Yu Q F, Zhang Q, Chen W J, et al. Videometrics methods and applications of static and dynamic deformation of large-scale structures (Invited) (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2024, 61: 129–142 [于起峰, 张强, 陈文均, 等. 大型工程结构静动态变形摄像测量方法与应用(特邀). 激光与光电子学进展, 2024, 61: 129–142]
- 108 Yu Q F, Guan B L, Hu B, et al. Large-scale structural deformation monitoring technology based on camera networking measurement (in Chinese). *Struct Environ Eng*, 2023, 50: 108–114 [于起峰, 关棒磊, 胡彪, 等. 基于相机组网测量的大型结构变形监测技术与应用. 强度与环境, 2023, 50: 108–114]
- 109 Zhang T, Zhang L, Chen Y, et al. CVIDS: A collaborative localization and dense mapping framework for multi-agent based visual-inertial SLAM. *IEEE Trans Image Process*, 2022, 31: 6562–6576
- 110 Jang Y, Oh C, Lee Y, et al. Multirobot collaborative monocular SLAM utilizing rendezvous. *IEEE Trans Robot*, 2021, 37: 1469–1486
- 111 Lin Z, Wu B. Image-based multispacecraft feature tracking control under visibility constraints with observer. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2024, 60: 8069–8085

An overview of the state estimation for space non-cooperative target with multi-spacecraft cooperative observation

WANG ZhaoLong^{1,3,4,5}, ZHU WenShan^{2,3,4,5}, MU JinZhen^{2,3,4,5*},
HAN Fei^{3,4,5} & JING ZhongLiang¹

¹ School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

² College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

³ Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China

⁴ National Key Laboratory of Space Target Awareness, Shanghai 201109, China

⁵ Shanghai Key Laboratory of Space Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China

*Corresponding author (email: jinzhen_mu@163.com)

Large debris such as failed satellites are generally in a tumbling state and cannot provide auxiliary measurement markers, which is called a space non-cooperative tumbling targets. Visual measurement is the core premise of large debris capture and removal in orbit. The traditional measurement method based on a single observation spacecraft is difficult to ensure a good observation state for a long time. Multiple spacecrafts carry visual cameras respectively to observe the target simultaneously from different directions, which can effectively deal with the complex interference in the measurement process. Based on this, this paper summarizes the research progress of space non-cooperative tumbling target state estimation through multi-spacecraft cooperative observation, summarizes from the aspects of concept development of multi-spacecraft cooperative observation, feasibility and advantage analysis of multi-spacecraft cooperative observation, multi-camera system self-calibration, multi-view cooperative observation, state estimation of space non-cooperative tumbling target, measurement error analysis and optimization. Finally, according to the analysis of the research status, the key problems of multi-spacecraft cooperative observation such as camera configuration, space domain, baseline and network are discussed, and the recommendations for the further development are presented.

space non-cooperative tumbling target, on-orbit capture, relative state estimation, multi-spacecraft multi-view cooperative observation, camera networking measurement

PACS: 07.05.Pj, 07.87.+v, 42.66.Si, 95.75.-z, 87.57.Gg

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0288](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0288)