

软硬协同驱动下的无人机实时实景三维重建系统装备研发

李 珪¹ 王思琪² (通讯作者) 李新建² 刘乔风² 覃敏姚²

1. 广西壮族自治区产业技术研究院 广西南宁 530200

2. 广西产研院时空信息技术研究所有限公司 广西南宁 530200

摘要: 本文探究无人机实时三维重建系统中软硬协同驱动技术, 剖析装备在高精度与低延时双重目标下面临的核心难题, 构建包含异构计算架构、轻量神经网络、分级数据处理、模块化设计等系统性解决方案。实验表明, 此类协同策略有效兼顾重建质量与处理速度, 增强系统在复杂环境中的稳定性与适应能力, 为实际应用场景下的即时三维重建提供了切实可行的技术途径。

关键词: 无人机三维重建; 软硬协同驱动; 实时处理; 系统集成优化

引言

无人机实时三维重建技术随计算机视觉与遥感技术发展不断完善, 在应急救援、城市规划、文物保护等场景显现价值。探究软硬协同驱动方法、优化算法与设备融合策略, 是推动无人机实时实景三维重建系统装备实现轻量化与实用化的关键途径。

一、无人机实时实景三维重建系统的概述

无人机实时实景三维重建系统整合航空摄影测量、计算机视觉及深度学习等前沿技术。整体架构包含空中数据采集平台、计算处理单元及地面控制站。空中平台搭载高清相机或多光谱传感器, 获取目标区域丰富图像; 计算单元对接收数据进行特征提取、立体匹配、点云生成与模型构建; 地面站则完成飞行任务规划、数据管理与结果可视化。整个重建过程依托多视角图像间的几何关系还原空间结构, 生成精细三维坐标点云, 最终形成高度逼真的三维模型。

系统核心价值主要表现为实时性、准确性及自动化三个维度。实时性反映在数据全流程处理的低延时响应;

课题:

项目号1: 广西壮族自治区应急管理厅2024年度应急管理联合创新科技攻关项目(Ⅲ类)《基于无人机的实时三维建模关键技术研究与应用》(项目编号: 2024GXJY053);

项目号2: 广西产研计划项目《Space-Time泛在地理环境监测时空大数据云平台关键技术研究及应用》(项目编号: CYY-HT2023-JSJJ-0025)。

作者简介: 李珪(1988--)男, 汉族, 籍贯: 广西博白, 大学本科, 研究方向: 电子信息。

准确性集中于模型几何结构精度与表面纹理还原度; 自动化则强调操作智能程度与人机交互便捷性。伴随边缘计算技术迭代, 系统日益呈现轻量化、便携化特性, 计算能力逐渐从传统地面服务器转移至机载嵌入式平台, 处理模式由离线批处理进化为实时在线分析, 建模流程实现从人机协作到智能自动的跨越, 显著提高了三维重建的实用性与时间效益。

二、软硬协同驱动技术的重要性

(一) 硬件协同关键技术

硬件协同技术构成无人机实时三维重建系统的技术基石, 主要涵盖感知设备融合、计算架构优化与数据流转体系。感知层面融合高精度相机阵列、全局快门成像设备、轻量激光测距仪及姿态测量装置, 按精确几何排布获取空间信息。计算层面采用GPU与FPGA异构架构, GPU负责特征匹配等计算密集任务, FPGA处理图像预处理与点云生成等实时环节。两种计算单元间构建高效数据通路, 形成运算管线, 缩减系统响应时间。飞行平台上精细的能源分配机制在保证计算性能同时兼顾续航, 电源控制电路根据任务需求分配资源。

通信系统采用频段分离策略, 控制指令与影像数据分别在低频与高频信道传输, 保证指令可靠性与数据传输效率。机上存储采用高速固态阵列, 结合数据冗余技术增强读写速度与信息安全。针对复杂电波环境, 抗干扰链路确保远程数据连接稳定。各组件通过时钟同步方案保持时间基准一致, 解决数据时序差异, 为信息融合提供保证。硬件系统采用模块化理念, 各功能单元可根据应用需求灵活替换, 增强适应能力。这些协同技术相互融合, 营造高效可靠的硬件运行环境, 支持三维重建任务执行。

（二）软件协同关键技术

软件协同体系为无人机实时三维重建构建算法层级，涵盖图像增强、特征识别、空间匹配与立体构建环节。图像层应用自适应光照均衡与多尺度滤波，提高各类光照条件下影像品质。特征环节融合SIFT与深度学习方法，保持精度同时缩短计算时间。匹配过程中全局优化与局部匹配相结合，平衡效率与精度。构建阶段整合增量式SfM与区域MVS策略，加速大场景重建。各算法单元形成流畅计算序列，处理结果直接传递至下游环节，减轻数据存储负担。算法针对CPU、GPU及FPGA等硬件架构优化，发挥异构计算优势。

系统层面协同体现于任务编排与数据管理。任务机制依据时效性为算法分配优先级，确保核心流程优先执行。数据管理采用内存资源池设计，避免频繁内存操作带来的时间损耗。数据跨硬件传输使用零拷贝技术，降低传递开销。运行监测系统采集算法性能指标，动态调节资源配置。软件架构遵循模块解耦理念，各功能通过标准接口连接，便于功能演进。场景适应参数优化根据环境特性选取最优算法配置，适应各类作业条件，提升系统稳定性与环境适应力。

三、当前无人机三维重建系统现状及问题

无人机三维重建技术领域逐渐形成地面服务器处理与边缘计算两种主流技术范式。地面处理范式借助强大计算集群实现高精度模型构建，但数据传输环节引入显著延迟，影响系统响应速度。边缘计算范式将运算环节前置至飞行平台，大幅提升时效性，却因飞行器承载能力与电池容量限制，难以部署高复杂度算法。当代商业系统多采取硬件平台与软件系统分离研发方式，硬件端注重提升元器件性能指标，软件端致力于优化算法执行效率，两个维度间的契合度偏低，制约了系统整体性能发挥。

复杂环境下多源数据融合问题日益凸显，不同传感器采集信息在时间与空间维度上的配准误差降低了重建成果质量。环境适应性方面表现欠佳，系统在光线剧变、表面纹理单一等条件下常出现重建中断现象。行业标准缺失导致各厂商产品接口规格迥异，阻碍了技术体系良性互通。数据安全保障机制尚显单薄，信息传输与存储过程面临安全威胁。这些现实困境深层次反映出传统分离式设计思路难以满足新型应用需求，引导行业走向软硬一体化协同创新道路。

四、软硬协同驱动下的系统装备研发策略

（一）硬件系统集成优化策略

实时三维重建系统面临计算性能与时效性平衡挑战，三层异构计算架构将任务划分至ARM处理器、嵌入GPU

与FPGA芯片。ARM承担系统调度控制，GPU执行特征密集运算，FPGA处理实时图像流与点云构建。传感设备融合采用精密机械定位结构确立相机阵列几何关系，配合校准装置执行起飞前自校准。图像与姿态数据协调通过电路级方案解决，微秒级硬件触发保证数据时序统一。能源系统采用智能分级供电，根据任务动态调整功率，锂电池与超级电容混合系统延长作业时间。

硬件标准化集成建立统一接口规范，包括物理特性、数据协议与电气标准，实现不同模块平滑整合。安全架构将加密单元融入数据流，实现传感信息与计算成果保护，物理隔离通道增强数据安全。环境适应性借助数字信号处理与频域技术提升，增强干扰区域通信稳定性。硬件采用模块独立封装，形成灵活配置能力。耐受性设计改良元器件热特性与散热布局，保证极限温度下稳定工作。系统可靠性措施包括关键节点冗余与退化机制，在部分失效时保持核心功能，确保在严苛环境中完成预定任务。这些策略共同解决硬件集成面临的多维度技术挑战，提升系统整体性能。

（二）软件算法协同优化策略

实时三维重建领域中精度与效率的矛盾催生了创新算法设计方案。轻量化神经网络结构融合知识蒸馏与网络剪枝技术，保留核心特征提取能力同时减少计算负担。环境干扰下特征匹配问题通过自适应特征框架解决，结合传统特征算子与深度学习特征描述，应对各类纹理条件。场景变化引起的重建中断现象借助多模态信息融合技术缓解，整合边缘、纹理、深度等多维特征，增强环境适应性。计算资源受限情况下采用三级计算流程优化性能，按预处理、粗略重建及精细构建分级执行，根据算力调控处理深度。代码优化针对ARM、GPU及FPGA等计算单元特性重构关键函数，提升硬件计算效率。

系统整体优化聚焦算法协同与数据流畅通。实时监测框架采集各模块执行指标，为资源调度提供决策依据。飞行过程中光照与纹理变化由参数自适应调整机制应对，根据场景复杂度平衡重建质量与速度。算法间数据交换引发的延迟问题通过零拷贝流水线设计解决，共享内存缓冲区减少数据搬运开销。异构平台兼容性问题由算法抽象层解决，将核心逻辑与硬件实现分离，便于算法跨平台迁移与部署。这些优化策略协同作用，提升软件系统计算效率与环境适应能力，解决复杂场景下的三维重建挑战。

（三）实时处理与传输技术策略

实时三维重建系统中数据处理与传输环节存在诸多技术瓶颈，分级数据处理方法为其提供了优雅解决路径。

此方法按信息价值赋予处理优先次序，空间结构数据获得即时处理，而纹理细节则在资源充裕时完善。增量数据传输理念使系统仅记录与发送场景动态变化信息，有效缓解传输压力。边缘智能架构将数据初筛与特征计算前移至感知端，减轻主系统处理负荷。空间区域并行计算策略将复杂场景分解为离散计算单元，多处理器同步运算，显著缩减整体计算周期。

数据流通层面，智能频谱管理协议根据周围电波环境灵活调整传输参数，保证信号穿透复杂环境。针对高速移动平台信号中断问题，差异化数据包重传策略确保核心信息不受干扰。链路质量评估系统实时分析信道状态，智能预设传输参数，抢先应对信号衰减。数据安全采用适合边缘计算的轻巧加密方案，在确保信息安全基础上节约处理资源。网络架构设计融合近距离高带宽与远程稳定传输通道，构建多层次通信保障体系。这套处理与传输技术体系共同支撑无人机三维重建系统在各类复杂环境中保持流畅运转，实现真正意义上的即时三维场景构建。

（四）系统装备轻量化与实用化策略

无人机重建系统受限于飞行载荷与装备空间，轻量化设计贯穿整体规划。选材引入航空级碳纤维复合材料取代金属框架，提供同等强度下的质量优势。结构设计采用计算机辅助拓扑优化，裁剪非关键区域，平衡强度与重量。电子系统集成度提升依靠高密度封装工艺，缩减电路板占用空间。热管理结合石墨烯导热管与相变材料，建立无风扇热扩散网络，解决主动散热带来的能耗。动力系统整合新型锂聚合物电池与能量捕获装置，配合电源调控算法，根据负荷分配电能，延长飞行作业周期。功能模块间连接简化为高可靠性接插组件，降低系统内部复杂度。

实用化方面强化装备在实际环境中的适应性与操控便捷性。系统构建基于独立功能模块，支持按需求灵活组装与替换。操作界面融合图形交互与语音指令识别，降低技能要求。作业流程自动化将复杂任务简化为场景预设与执行确认操作。环境适应能力通过IP67防护标准与宽温域元器件保障，使系统在多样气候条件下保持稳定。维护简便性表现在嵌入式自诊断与远程监测系统，提供明确维护指引。野外保障机制包括快速启动与模块级应急维修，最小化故障影响。数据接口符合测绘行业标准，实现与地理信息系统平台对接，扩展应用生态，提升装备在多领域的实际价值。

（五）系统集成测试与性能评估策略

无人机三维重建系统验证面临测试点分散与评价标

准多元化挑战，递进式测试框架为质量保障提供解决方案。该框架将验证过程分为模块、子系统及整机三层级，逐步深入系统核心。模块层级考察独立功能组件表现，积累硬件与算法基础性能数据。子系统层级观察各部分协同效果，评估计算平台与算法体系衔接性，发现潜在接口问题。整机层级构建多样场景测试集，覆盖日常应用与边缘工况，检验系统环境适应能力。测试管理平台记录性能指标，生成评估文档，降低主观因素，增强结果可信度。

评估方法建立在多层次指标体系上，融合技术与应用双重维度。技术维度考量重建精确度、处理延时、能源效率等指标；应用维度聚焦任务效率、环境耐受性与可靠性。客观评价采用参考比较法，将系统输出与基准模型对比分析，量化几何准确性与细节保真度。主观评价结合专家判断，从实际应用角度评定系统表现。版本比较法追踪系统迭代中指标改进趋势，明确优化方向。场景适应力测试研究系统在变化光照、复杂纹理环境下的稳定性，识别薄弱环节。评测结果转化为研发改进依据，驱动系统持续优化，确保技术路线契合实际应用需求，提升整体集成效果。

结语

软硬协同驱动思想引领无人机实时三维重建系统装备研发进程，实现硬件资源与软件算法的深度融合，创造出卓越系统整体性能。从感知数据采集、运算处理、信息传输到装备集成各层面的协同优化，显著增强了重建质量、响应速度及应用场景广度，推动三维重建技术迈入实际应用新阶段。

参考文献

- [1]梅豪, 都兴霖, 许登荣, 等. 有人/无人机协同电磁频谱作战问题研究[J]. 舰船电子对抗, 2024, 47(01): 29-34.
- [2]史军彦, 侯典宁. 微小型无人机与地面无人系统城市反恐行动协同研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(09): 36-40.
- [3]韩春雷, 刘钦, 潘浩, 等. 无人机集群任务自协同技术研究[J]. 战术导弹技术, 2025, (05): 161-172.
- [4]谭建雄. 超一线城市无人机反制技术现状及发展趋势[J]. 物联网技术, 2025, 15(24): 111-112+116.
- [5]张君彪, 吴静, 赵飞, 等. 俄乌冲突中无人机作战运用情况及启示[J]. 现代防御技术, 2025, 53(06): 37-45.