

20Vantage-S–Vantage-S 激光跟踪仪来开展全场控制网的构建工作，在 120 米区域当中把拼接工作完成耗时 4 小时，精度比 0.03 毫米要高，输送线支架会依据实时测量数据来开展设备的精调工作，并且把温度补偿算法植入到它当中。全线的直线度已经被控制在 0.08 毫米的范围之内，机器人开展联调的过程当中，涵盖了十八台设备，并且进行了全参数标定以及刚度补偿工作，在采集了两百个姿态点之后，运动学参数就得以实现优化，并且负载补偿模型马上被加载。校准

参数被控制器接收了，并且数字孪生监控系统马上启动。为验证本文提出的“激光跟踪+联合补偿”策略在实际复杂工业场景中的有效性，项目组于 2025 年 9 月至 11 月期间，在江苏常州某头部新能源动力电池模组 PACK 产线（代号：Project-HelixPhaseII）中开展了全流程工程应用。该产线全长 126 米，涵盖电芯上料、堆叠、焊接及终检等 18 个关键工艺段，涉及 KUKA 与 FANUC 混合部署的工业机器人共 24 台。

表 2 传统校准方法与本文策略性能对比

评价指标	传统方法	本文策略	性能增益 / 误差改善
设备落位精度	± 0.48mm	± 0.046mm	误差降低 90.4%
机器人绝对定位精度	± 1.02mm	± 0.148mm	误差降低 85.5%
机器人重复定位精度	± 0.052mm	± 0.021mm	误差降低 59.6%(
单次产线校准耗时	47.5 小时	11.8 小时	效率提升 302%
环境适应性	弱 (温度漂移 >0.1mm/°C)	强	抗干扰能力提升 1 个数量级
长期稳定性	± 0.35mm	± 0.04mm	稳定性提升 8.7 倍

4.2 测试结果

经过了 72 小时一直不间断地开展满负荷测试，，本方案重点验证了两大核心指标：一是协作机器人的重复定位精度，二是大型设备在流水线落位时的对接精度（特别是针对不同厂家设备接口不一致导致的误差）。测试结果表明，在昼夜温差 5°C 到 28°C 波动的环境下，系统动态补偿功能有效抵消了热变形影响，并未对校准过程产生显著干扰。在大型设备落位环节，通过激光跟踪仪对不同厂家设备的接口基准进行统一校正，关键对接点的定位精度稳定在 ±0.04 毫米；同时，经校准后的机器人重复定位精度也达到同等高水平。把模组装配工作开展完成之后，电池包间隙的均值为 0.06 毫米，标准差为 0.012 毫米，装配精度合格率从 82% 提升到了 99.5%。

5 结论

智能制造质量保障的核心之处在于开展设备的高精度定位以及进行机器人校准，传统方法通常会受到静态框架的制约，误差的来源相对比较单一，并且缺乏进行动态调整

的机制，一套用于提升准确性的系统性方案得以设计出来。综合运用了激光跟踪动态测量技术、运动学与非运动学联合标定算法以及数字孪生闭环反馈机制，来实现从设备安装到机器人作业的全链条精度控制，这个策略把设备落位精度提高到了 ±0.05 毫米，并且极大程度上优化了机器人的绝对定位精度以及长期稳定表现，这样就可以去应对复杂环境当中的高精度作业挑战。云边协同架构正在被开展深入的探索工作，这主要原因在于 5G 通信以及边缘计算技术不断地演进，这个架构致力于开展不同厂区以及多条产线之间的精度数据互通工作，并且让系统得以实现自适应演进，这样的研究方向会在这个领域当中占据关键的地位。

参考文献

[1] 晏院飞. 通用设备服务在工业流水线控制系统中的应用[J]. 自动化仪表, 2023,44(2):45-49.

[2] 张志强, 李伟. 基于激光跟踪仪的工业机器人绝对定位精度校准方法研究[J]. 机械工程学报, 2022,58(10):23-31.

[3] RothZ, MooringB, RavaniB. Anover view of robotcalibration[J]. IEEEJournalon Robotics and Automation,1987,3(5):377-385.

Application and Precision Analysis of Multi-source Remote Sensing Data Fusion in Land Change Monitoring

Junbo Cui

The Third Institute of Aerial Survey and Remote Sensing, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Multi-source remote sensing data fusion technology provides efficient support for land change monitoring by integrating data from different sensors. Remote sensing data comes in various forms, including optical imagery, radar imagery, and LiDAR, each with distinct spatial resolutions and acquisition methods. Through data fusion, the advantages of each data type can be fully utilized to improve monitoring accuracy, especially in fields such as land use, urban expansion, agricultural changes, and ecological environment changes. This technology not only effectively identifies and extracts land change information but also overcomes the limitations of traditional monitoring methods, offering more precise data support for land resource management and environmental protection. Accuracy analysis shows that multi-source remote sensing data fusion enhances the reliability of monitoring, especially in dynamic monitoring and large-area applications, demonstrating its unique advantages and potential.

Keywords

Multi-source remote sensing data; land change monitoring; data fusion; accuracy analysis; deep learning

多源遥感数据融合在土地变化监测中的应用与精度分析

崔鋈波

自然资源部第三航测遥感院, 中国·四川成都 610000

摘要

多源遥感数据融合技术通过整合来自不同传感器的数据, 提供了对土地变化监测的高效支持。遥感数据种类繁多, 包括光学影像、雷达影像、激光雷达等, 各自具有不同的空间分辨率和获取方式。通过数据融合, 可以充分发挥各类数据的优势, 提高监测精度, 特别是在土地利用、城市扩展、农业变化及生态环境变化等领域。该技术不仅能有效识别和提取土地变化信息, 还能克服传统监测手段的局限, 为土地资源管理和环境保护提供更加精准的数据支持。精度分析表明, 多源遥感数据融合能够提升监测的可靠性, 尤其是在动态监测和大范围区域的应用中, 展现了其独特的优势与前景。

关键词

多源遥感数据; 土地变化监测; 数据融合; 精度分析; 深度学习

1 引言

土地变化监测作为环境科学、资源管理等领域的重要组成部分, 在土地利用规划和生态环境保护中具有不可忽视的作用。传统的土地变化监测方法如地面调查和单一传感器遥感影像分析, 虽然在某些情境下有效, 但难以满足大范围、高精度监测的需求。随着遥感技术的快速发展, 多源遥感数据融合技术逐渐成为解决这一问题的有效手段。通过将不同类型的遥感数据, 如光学影像、雷达数据和激光雷达数据等进行融合, 能够发挥各类数据的互补性, 提供更加精确的土

地变化信息。此外, 数据融合技术在处理复杂的空间信息时, 能够有效提升监测精度, 尤其是在变化较为细微的地区或动态监测任务中表现出较大的优势。遥感数据融合技术在土地变化监测中的应用, 既推动了技术发展, 也为实际应用提供了强有力的支持, 成为当前研究中的重要方向。

2 多源遥感数据融合概述

遥感数据可以从不同的传感器平台获取, 主要包括光学遥感数据、雷达遥感数据和激光雷达数据。光学遥感数据通过捕捉地表反射的太阳辐射来获取信息, 具有较高的空间分辨率, 能够提供详细的地表信息。然而, 它在云层覆盖和夜间无法工作。雷达遥感数据利用微波信号, 能够穿透云层和夜间工作, 具有较强的环境适应性。它的空间分辨率较低, 但可以提供地表的形态和结构信息。激光雷达数据则通过激光扫描技术, 能够精确地测量地表的高程信息, 特别适用于

【作者简介】崔鋈波(1997-), 男, 中国四川广元人, 本科, 助理工程师, 从事遥感数据获取与处理工作和基础测绘、国土资源调查研究。

森林、城市等地形复杂区域的高精度建模。这些数据各自具有不同的特点，能够在空间、时间和功能上提供多样化的监测手段，且其不同传感器的融合能够弥补各自的局限性，提升监测的整体性能。

3 多源遥感数据融合技术分析

3.1 图像配准与数据预处理

图像配准和数据预处理是多源遥感数据融合中的基础性技术，确保不同数据源之间具有相同的空间位置。图像配准的精度直接影响到最终融合结果的准确性。常见的图像配准技术包括基于地面控制点（GCP）、特征点匹配、频域方法和基于模型的方法。基于地面控制点的方法通过对不同图像进行地面位置标定，计算出它们之间的变换矩阵，以实现精确配准。而特征点匹配方法则通过提取图像中的关键特征点（如角点、边缘等）进行匹配，常用的算法包括 SIFT（尺度不变特征变换）和 SURF（加速稳健特征）。数据预处理通常包括辐射校正、几何校正、噪声去除等操作。例如，辐射校正能够消除大气、地形和传感器的影响，而几何校正则通过标准化的地图投影来消除地形起伏带来的影响。为了提高数据的质量，通常采用滤波技术对图像中的噪声进行处理，去除影像中的不规则波动，确保数据的一致性。

3.2 数据融合算法的分类与比较

数据融合算法是多源遥感数据融合的核心，常用的融合算法根据融合层次的不同，可以分为像素级融合、特征级融合和决策级融合。像素级融合是在图像的像素层面进行直接融合，常用的算法有加权平均法、主成分分析（PCA）、波段加权法（Band-Weighted Method）等。加权平均法通过对不同数据源的像素赋予不同的权重，综合各个数据源的信息。PCA 是一种线性变换技术，通过提取数据中的主要特征，减少冗余信息，提高融合图像的质量。特征级融合则是在数据的特征空间进行融合，常用的技术包括目标提取、边缘检测、纹理分析等，能够更好地保留图像的结构信息，尤其在目标识别和分类应用中非常有效。决策级融合则是在不同数据源的分析决策后进行融合，常用的方法包括投票法、贝叶斯推理、模糊逻辑等，这些方法能够综合不同数据源的结论，提高决策的可靠性和准确性。每种算法在实际应用中都有不同的优缺点，例如像素级融合适用于精细化的空间分析，但可能会带来数据的冗余，特征级和决策级融合则适用于特定任务，如分类、变化检测等任务^[1]。

4 多源遥感数据融合在土地变化监测中的应用

4.1 土地变化监测的需求与目标

土地变化监测在现代环境管理中扮演着关键角色，尤其是在土地利用变化、城市扩展和农业变化等方面。随着人类活动的不断变化，尤其是城市化进程的加速，土地的变化速度不断加快，这对土地资源的合理管理提出了更高的要求。传统的土地变化监测方法，如地面调查和单一遥感影像

分析，在效率和精度上存在一定的局限性，无法满足大规模、实时变化监测的需求。多源遥感数据融合技术能够有效结合光学影像、雷达影像和激光雷达数据等不同类型的数 据，提供更为全面的土地变化信息。在城市扩展监测中，融合数据可以提供精细的空间分辨率，及时反映城市发展带来的变化。在农业监测中，多源数据能够帮助追踪土地利用类型的变化，监测作物生长状况。结合遥感影像与社会经济数据的融合，为决策者提供更精准的土地变化动态，从而制定科学合理的土地管理与利用政策。

4.2 多源遥感数据融合在城市扩展监测中的应用

城市扩展是现代城市化过程中不可避免的现象，其带来的土地变化对于环境、交通、资源利用等多个方面产生了深远影响。利用多源遥感数据融合技术，能够高效、准确地监测城市扩展过程中的土地利用变化。光学影像通过其高空间分辨率能够清晰展示城市区域的建筑、道路和绿地等结构特征，适用于详细的城市区划和土地利用分析。而雷达数据，尤其是合成孔径雷达（SAR），能够提供城市建筑的高度、形态以及变化信息，克服了光学数据在云雾天气下的局限性。激光雷达数据则通过提供精确的高程信息，帮助精确建模城市的三维结构。在这些数据的融合过程中，像素级融合方法常被应用，通过融合不同分辨率的影像，提高土地变化检测的空间精度与时效性，从而实现城市扩展过程的实时动态监测，辅助城市规划与资源管理，应用流程详见图 1。

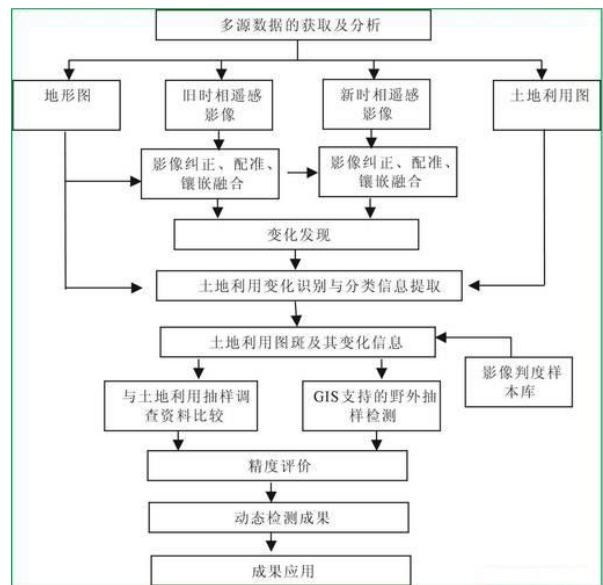


图 1 多源遥感数据融合在土地变化监测中的应用流程图

4.3 多源遥感数据融合在农业变化监测中的应用

农业变化监测在全球食品安全、农业可持续发展和生态环境保护中占据重要地位。通过多源遥感数据融合，能够有效监测农业用地的动态变化，包括农田面积、作物种类、土地利用方式的转换等。光学遥感数据在农业监测中广泛应用，通过获取作物的光谱反射特征，可以准确识别作物类