李玉峰，宗国庆，张东豪.基于具身大模型的多场景智能巡检机器人系统框架与多机器人协同应用集成研究[J]. 智能计算机与应用，2025,15(5):37-43. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24082001

基于具身大模型的多场景智能巡检机器人系统框架与多机器人协同应用集成研究

李玉峰[1],宗国庆[1],张东豪[2]

(1南京禄口国际机场空港科技有限公司，南京211100;2南京玄策智能科技有限公司，南京210023)

摘 要： 随着工业自动化与智能化的发展，巡检机器人在复杂和动态环境中的应用需求日益增长。然而，传统巡检机器人在面对多变环境时，常面临适应性差、执行效率低和协同作业困难等挑战，亟需依托前沿技术进行突破。针对这一问题，本文提出了一种基于具身大模型的智能巡检机器人系统框架，旨在通过多模态数据融合技术、边缘计算与云计算协同机制，提高巡检机器人的智能化水平和应用效能。研究在民航机场的飞机停机坪与维修机库环境中进行实验，采用多种传感器和设备，如高清 RGB 相机、超声探伤仪、红外热成像仪和激光雷达，通过实时数据融合实现飞机蒙皮损伤的精确检测。系统通过部署轻量化本地模型与云端大模型协同工作，结合材料特性与环境变化，实现了对裂纹、腐蚀和变形等异常的快速识别与精准定位。多机器人协同作业框架通过智能任务分配优化，显著提高了任务分配效率和执行精度。实验结果验证了该系统在提升巡检效率、保障安全和降低人工成本方面的显著优势。综合来看，本研究不仅提出了具身大模型与多机器人协同的新型系统框架，还通过技术融合和系统优化，突破了传统巡检机器人的感知、决策和执行瓶颈，具有重要的理论价值与实际应用前景。

关键词： 具身大模型；智能巡检机器人；多模态数据融合；云边协同工作；系统集成

中图分类号： TP399 **文献标志码：** A **文章编号：** 2095-2163(2025)05-0037-07

Research on the embodied large model-based multi-scenario intelligent inspection robot system framework and multi-robot collaborative application integration

LI Yufeng[1],ZONG Guoqing[1],ZHANG Donghao[2]

(1 Nanjing Lukou International Airport Technology Co.,Ltd.,Nanjing 211100,China;
2 Nanjing Xuance Intelligent Technology Co.,Ltd.,N**anjing 210023,** China)

Abstract: With the advancement of industrial automation and intelligence,the demand for inspection robots in complex and dynamic environments is growing rapidly.However,traditional inspection robots often face challenges such as poor adaptability,low execution efficiency,and difficulties in collaborative operations when confronted with changing environments,necessitating breakthroughs through cutting-edge technologies.To address these issues,this paper proposes a framework for an embodied large language model-based intelligent inspection robot system,aiming to enhance the intelligence level and application efficiency of inspection robots through multimodal data fusion technology,edge computing,and cloud computing collaboration mechanisms.The experiment is conducted in the aircraft apron and maintenance hangars of Nanjing Lukou Intemational Aiport,utilizing various sensors and devices, such as high-definition RGB cameras,ultrasonic flaw detectors,infrared thermal imagers,and LiDAR,to achieve precise detection of aircraft skin damage through real-ime data fusion.The system employs a lightweight local model and a cloud-based large language model working in coordination**,incorporating** material characteristics and environmental changes to quickly identify and accurately locate anomalies such as cracks, **corrosion,** and deformation.A multi-**robot collaborative framework,**optimized through intelligent task allocation,significantly improves task distribution efficiency and execution accuracy.Experimental results validate the system's remarkable advantages in improving inspection efficiency, **ensuring** safety,and reducing labor costs.In conclusion,this study not only proposes a novel system framework based on embodied large language models and multi-robot collaboration,but also breaks through the sensory,decision-making,and execution bottlenecks of traditional inspection robots through technological integration and system optimization,offering substantial theoretical value and promising practical application prospects.

Key words: embodied large language models;intelligent inspection robot;multimodal data fusion;cloud-edge collaboration; system integration

作者简介： 李玉峰(1976—),男，博士，高级工程师，主要研究方向：人工智能，多模态大模型等。Email:3194045113@qq.com; 宗国庆(1975—),男，工程师，主要研究方向：机器人；张东豪(1994—),男，工程师，主要研究方向：人工智能。

收稿日期： 2024-08-20

0 引 言

研究可知，国内制造业正积极推动机器人在智能制造中的应用，尤其在电力、安防和物流领域，巡检机器人逐步替代人工操作，提高了工作效率和安全性[1。

然而，传统巡检机器人在复杂环境中面临诸多挑战，如环境感知能力不足、数据处理效率低、实时反馈不及时等问题。高电磁干扰和复杂地形条件下，机器人的传感器性能受到显著影响，导致数据偏差、不准确甚至丢失[2]。此外，尽管多机器人集群在多任务目标实现[3]和动态实时协同任务规划4]等方面展现了强大的群体智能分布式能力，但在协同机制设计、数据共享模式优化及智能数据理解等方面仍面临技术瓶颈[4]。

随着大模型技术的持续发展与突破，多模态大模型已具备类人化的感知与认知能力，能够高效完成复杂任务。这一技术为巡检机器人赋能，提升了机器人的环境适应性、决策效率和任务协同能力，展现出强大的应用潜力[5。

基于多模态融合技术，通过整合视觉、听觉、触觉等多源感知数据，大模型能够构建更为细致的环境认知，为复杂场景下的智能决策提供支持[6。此外，多模态大模型还可通过开源社会媒体信息动态扩充机器人知识库，实现自适应学习，提升系统在多变任务中的适应性7。

自“中国制造2025”提出以来，云边端协同架构成为智能工厂的新模式，展现出高效、实时的运行特点[8]。云边计算能够进行智能设备连接与任务处理，减少对云端的依赖，提升响应速度和处理效率，同时云端负责数据存储、管理与全局优化，为智能制造提供算力支持[9]。

本文旨在研究具身大模型驱动的智能巡检系统集成。首先，通过多模态数据融合技术增强巡检机器人环境感知能力；其次，优化边缘计算与云计算的协同机制，以满足智能化和低延迟需求；最后，通过系统集成，提升多机器人协同工作能力，并进行场景模拟与验证。研究旨在推动巡检机器人技术革新，提高巡检效率、保障安全、降低成本，助力工业自动化与数字化转型，并为产业升级提供参考。

1 研究内容综述

总体研究如图1所示，具身大模型驱动的机器人智能巡检系统集成的研究内容涉及实时检测算法、低延迟响应机制、本地与云端协同工作、系统集成方法研究及异构多机器人协同五个方面。

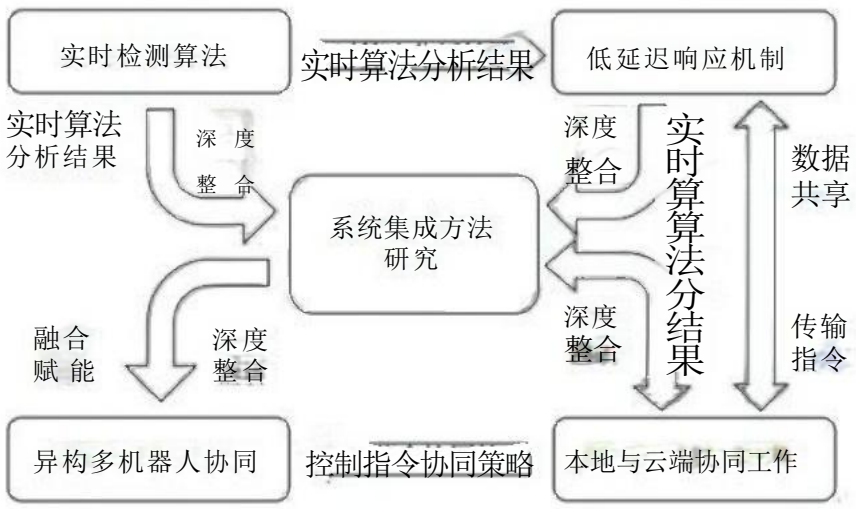


图 1 总体研究内容示意图

Fig.1 Overall research diagram

1.1 实时检测算法

实时检测算法研究如图2所示，实时检测算法的研究包括多模态数据融合、快速特征提取和异常检测三部分内容。

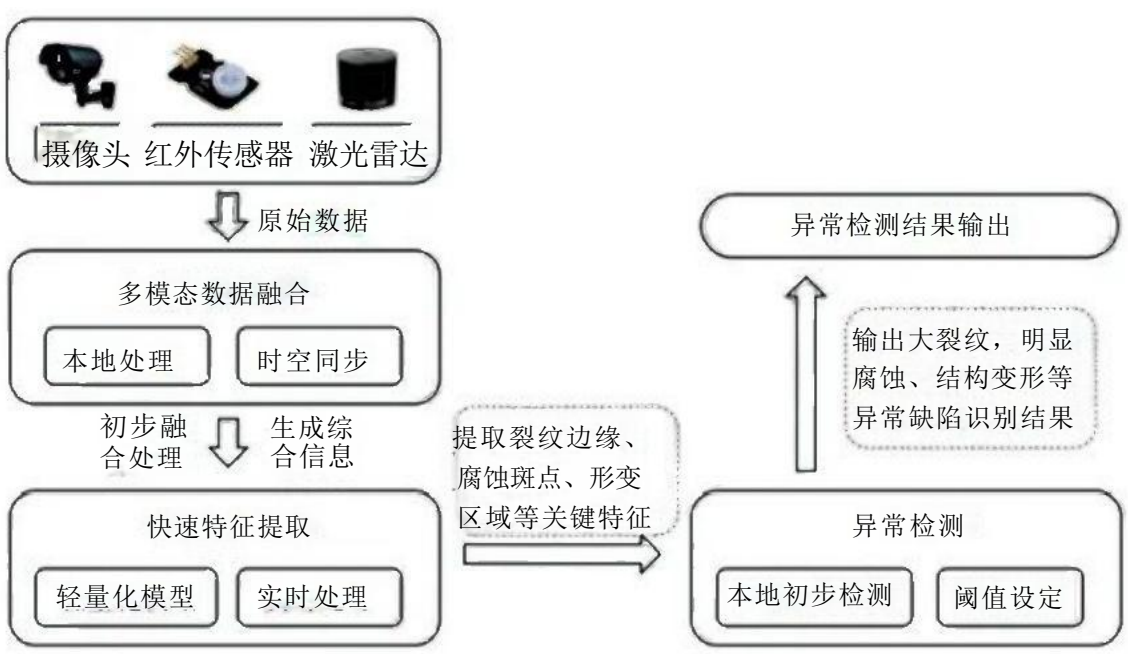


图 2 实时检测算法研究内容示意图

Fig.2 **Diagram of real-time detection algoritn se**公 众 号 ·智 能 机 器 人 科 技

1.1.1　多模态数据融合

机器人利用来自摄像头、红外传感器和激光雷达等多种传感器的数据进行初步融合。采用自适应空间特征融合算法[10],基于YOLOv5x网络框架，结合轻量级MobileNet作为特征提取网络，优化网络深度以提高处理速度。通过快速整合多模态数据，生成精确的环境模型，为后续决策和路径规划任务提供可靠支持[1。

1.1.2　快速特征提取

部署压缩优化的轻量化模型，从多模态数据中高效提取关键特征，如飞机蒙皮的裂纹、腐蚀斑点和形变等。这些模型在资源受限环境下保持高效性能，应用轻量级MobileNet并使用深度可分离卷积减少计算量，同时融合硬件加速技术，实现快速的数据处理与实时响应。

1.1.3　异常检测

在本地模型中，通过简单的异常检测算法识别明显缺陷和异常情况。例如，在机场地勤巡检中，飞机表面(主要为蒙皮)易受损，且历史上与蒙皮损伤相关的飞行事故较多。飞机表面由金属和复合材料构成，巡检时需识别大裂纹、腐蚀和结构变形等问题。依托本地检测，系统能迅速定位并识别这些问题。根据任务需求设置合理阈值与规则，确保快速判断异常并触发报警与处理机制。

1.2　本地与云端协同工作

本地与云端的协同工作是智能系统中关键的组成部分，涵盖了分层处理和优化通信协议两大方面。

1.2.1　分层处理

本地通过轻量化模型实现实时检测与初步异常识别，处理常见异常(如硬件故障或系统异常),以毫秒级响应减少对云端资源的依赖。对于复杂异常，系统将关键数据上传云端，由大模型进行深度分析，确保高效与准确性。

1.2.2　优化通信协议

为确保高效上传与低延迟反馈，优化本地与云端的数据传输协议，提升数据速率和稳定性，减少延迟和丢包，降低通信时间成本。采用数据压缩技术减少数据量，提升传输效率，减轻网络负担。为确保数据传输安全，使用高标准加密算法保护敏感数据，符合法规要求，保障系统可靠性[12]。

1.3　系统集成方法研究

系统集成方法研究如图3所示。系统集成方法研究包括架构设计与分层集成、数据流与工作流管理、通信协议与数据同步、模型管理与调度四部分内容。

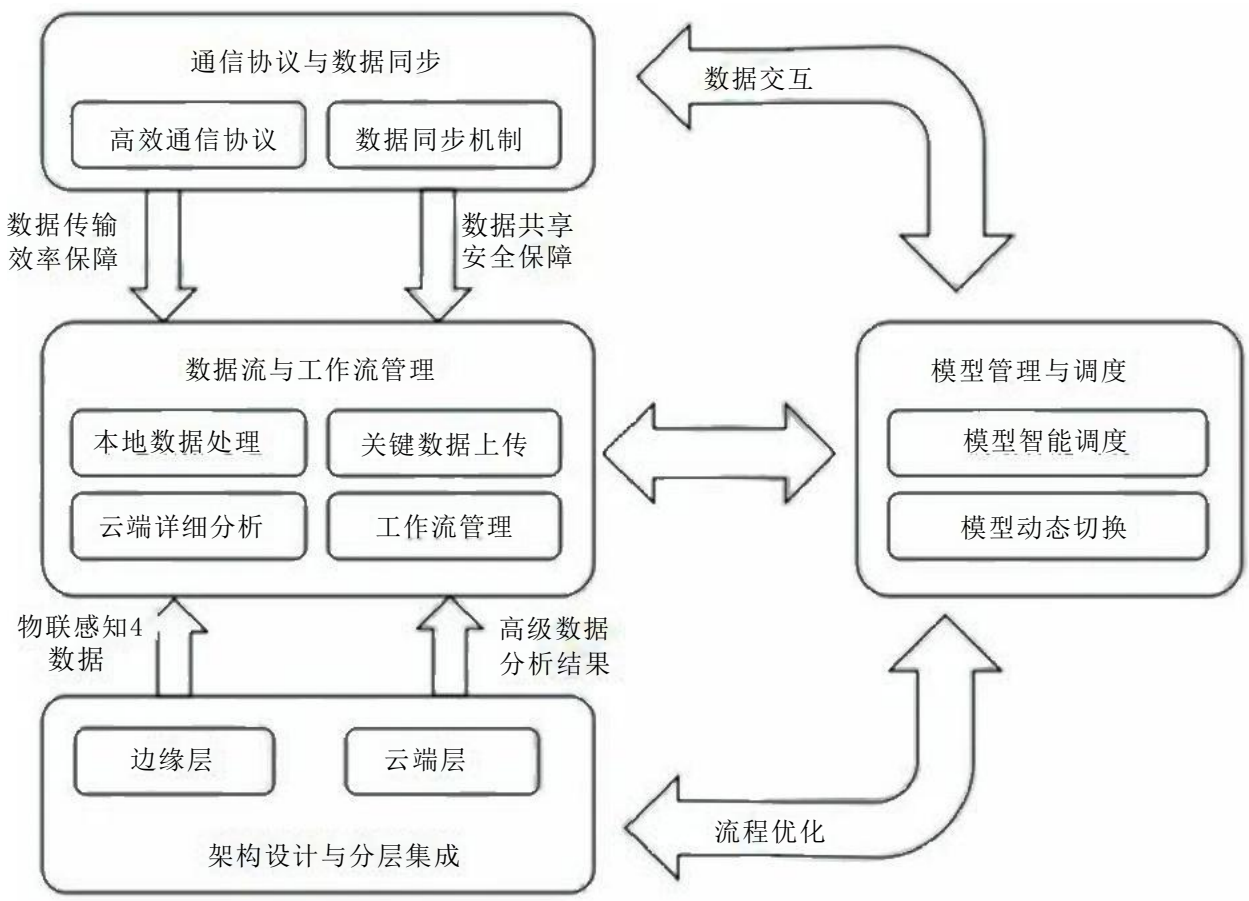


图 3　系统集成方法研究内容示意图

Fig.3　Diagram　of　system　integration　approach　research

1.3.1　架构设计与分层集成

采用边缘层与云端层的分层架构，边缘层部署在本地，进行数据采集、初步处理与异常识别，减少对云端的依赖；云端层提供高性能计算资源，进行复杂分析与决策支持[13]。同时，系统采用模块化设计，提升维护性与可扩展性。

1.3.2　数据同步

采用时回戳同步机制标怨俸感器数据，稳保时

间一致性，便于分析与决策。引入数据版本控制机制，管理上传过程中的数据版本，保障数据准确性与一致性，提升系统可靠性[14]。

1.3.3 模型管理与调度

引入动态切换机制，确保网络不佳时切换至本地轻量化模型进行数据处理，恢复网络后切换至云端模型，保障不同网络环境下的系统稳定性与可靠性。

1.4 异构多机器人协同研究

异构多机器人协同研究如图4所示。异构多机器人协同研究包括多机协同规划、协同通信机制、协同感知与决策、协同控制与执行、数据共享与处理、多机协同演示与验证和故障处理与恢复七部分内容。

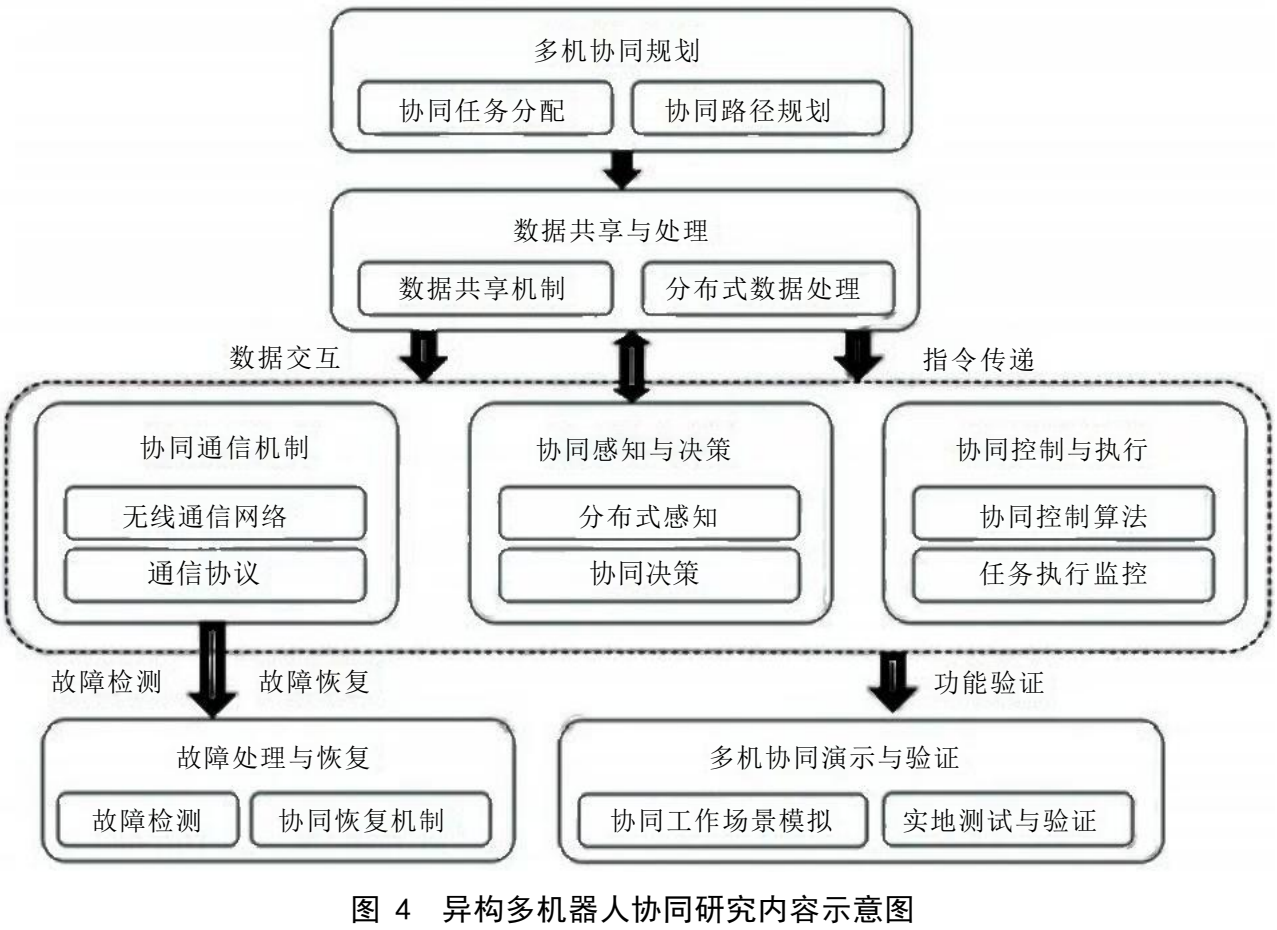


图 4 异构多机器人协同研究内容示意图

Fig.4 Diagram of heterogeneous multi-robot collaboration research content

1.4.1 多机协同规划

提出动态任务分配与协同路径规划策略，优化资源利用，提升巡检效率与覆盖率。开发多机器人路径规划算法，避免路径冲突，确保巡检区域的完整覆盖[15]。

1.4.2 协同通信机制

优化无线通信架构，确保数据稳定传输与实时更新。采用基于消息队列的通信机制，减少延迟，提高协调性与响应速度[16。

1.4.3 协同感知与决策

采用分布式感知和协同决策技术，结合多种传感器数据(如视觉、红外、激光雷达等),形成全局感知网络，提高环境理解和目标识别能力。通过分布式决策算法，各机器人共享信息并实时调整任务分配和行为策略，提升巡检效率和质量[17]。同时，研发分布式决策算法，使各机器人在协同工作过程中能够实时共享信息[18]。

1.4.4 协同控制与执行

研究多机器人协同控制算法，通过全局路径规划和实时状态调整，避免干扰并优化协调性。构建实时监控与反馈系统，确保任务进度和机器人状态同步，及时处理异常行为[19]。

1.4.5 故障处理与恢复

引入故障检测与协同恢复技术，通过多传感器数据快速定位故障源，采取自动任务重分配与智能调度，保障任务连续性和系统鲁棒性[20。

2 本地与云端模型赋能

在智能巡检机器人的设计中，本地与云端模型的深度协同赋能是实现高效巡检任务的关键。通过本地轻量化模型与云端大模型结合，系统可发挥各自优势，提供智能、实时和高效的任务执行能力。

2.1 本地轻量化模型能力

由于本地设备计算资源的限制，轻量化模型重点解决多模态数据实时处理、低延迟响应以及带宽和存储节省问题。

2.1.1 多模态数据实时处理与初步分析

本地轻量化模型能够快速处理来自图像、红外和激光雷达等传感器的数据，进行初步分析并及时识别异常情况。通过多模态数据融含较术；禁绕可

在本地识别潜在故障，提升异常检测的准确性与即时性。

2.1.2　低延迟响应

即便在无网络或网络不稳定的环境下，本地模型仍能执行关键数据采集与处理任务，确保系统基本功能不受影响。通过优化算法和提高计算效率，系统能够实现低延迟响应，满足实时数据分析需求。

2.1.3　节省带宽与存储

通过初步处理与过滤机制，本地模型仅上传关键数据和异常情况，减少数据传输量，优化传输效率，降低网络负载。同时，本地存储最近数据，减少对云端存储的依赖，提升数据访问速率和系统稳定性[21]。

2.2　云端大模型的能力

云端大模型依托高性能计算资源，实现高级图像识别、多模态数据深度处理、模型训练优化、数据高效存储管理及计算资源弹性扩展。

2.2.1　高级图像识别分析

云端大模型利用强大的计算能力处理高分辨率图像与视频流，精确捕捉细节并完成复杂的图像识别任务，如裂纹检测、腐蚀与表面损伤检测。通过深度学习算法，云端能够有效识别细微缺陷，提升检测准确性和可靠性[22]。

2.2.2　计算资源弹性扩展

云端通过动态计算资源分配机制，根据任务负载灵活调整资源，确保高峰期的高效处理。分布式计算架构支持任务拆分与并行处理，提升计算效率并缩短数据处理时间，从而优化模型推理过程，增强系统性能与响应速度。

3　工作流程

智能巡检机器人工作流程如图5所示。反映了具身大模型驱动的智能巡检机器人工作流程。

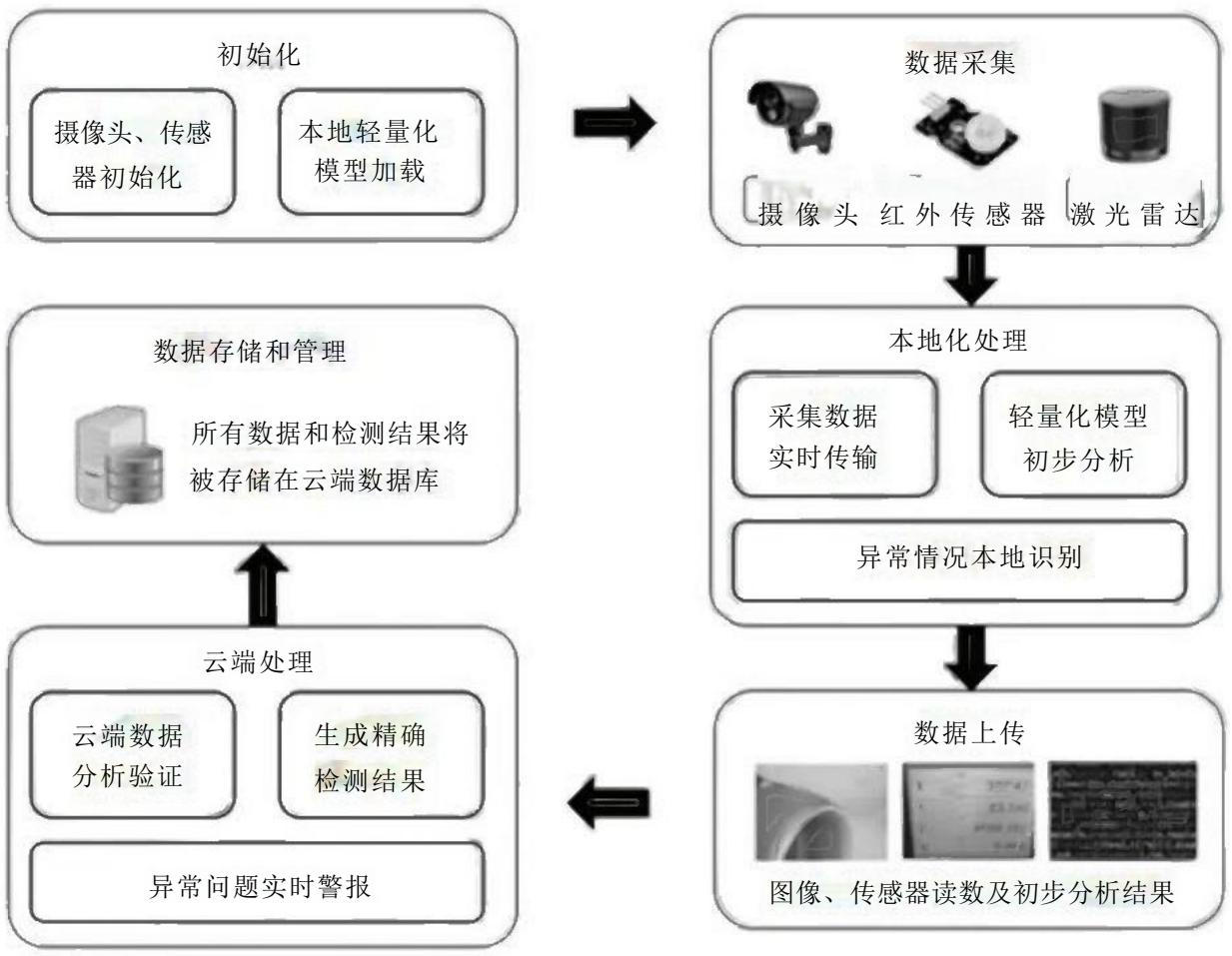


图 5　智能巡检机器人工作流程示意图

Fig.5　Diagram of intelligent inspection robot workflow

流程开始时，机器人启用，摄像机和传感器初始化，加载本地轻量化模型，准备数据处理。机器人沿预定路径开展巡检任务，连续采集图像和传感器数据，实时传输至本地处理模块，利用轻量化模型进行初步分析，识别大裂纹和明显腐蚀等异常情况，对复杂问题进行标记并提示进一步分析。

随后，标记数据(包括图像、传感器读数及初步分析结果)上传至云端服务器，云端大模型利用丰富历史数据和强大计算资源进行详细分析，生成精确检测结果。若发现严重问题，系统即时生成警报。

云端分析完毕后，将检测结果反馈至本地处理模块，生成最终报告并在必要时发出警报。所有数据和检测结果存储在云端数据库，以支持后续数据分析和模型优化，确保数据处理的即时性、问题检测的准确性和系统运行的可靠性。

4　应用场景

如前文出众蒙皮智能驾踢部

分，长期暴露于大气中，面临腐蚀、裂纹及变形等多种损伤风险。若未及时发现，这些损伤将极大威胁飞行安全，历史上因蒙皮损伤导致的飞行事故屡见不鲜。传统人工巡检方法在精度、效率及覆盖范围方面存在明显局限，特别在复杂机场巡检场景中，面对不同材料的蒙皮和多种损伤模式，容易误判或漏判。因此，提高巡检的精准性和实时性，已成为航空领域亟待解决的关键问题。

4.1 技术设计与应用场景

本系统基于具身大模型驱动的智能巡检机器人，选择民航机场的飞机停机坪和维修机库作为应用场景，集成了多种先进技术，提供高效、精准的飞机蒙皮巡检解决方案。系统装备了高清RGB相机、超声波探伤仪、红外热成像仪和激光雷达等传感器，利用多模态数据融合技术，实时获取飞机蒙皮表面精确信息。通过融合光学图像、热成像图谱和振动分析数据，系统建立了损伤模型，能根据材料属性区分裂纹(线性模式)、腐蚀(斑块特征)和形变(轮廓变化)。同时，加载了具身大模型，并通过迁移学习优化了对特定损伤模式的识别精度。

为了保证实时性，轻量化子模型被部署在边缘计算单元上，能快速筛查明显异常(如裂纹超过2 mm、腐蚀超过5%和形变超过3°)。系统根据材料和环境条件动态调整检测敏感度，减少误报。当机器人完成初筛后，边缘设备上传结果至云端进行二次分析，云端大模型执行高精度损伤检测，并结合历史巡检数据生成综合报告，支持故障溯源分析。

异常检测后，机器人触发警报并生成维修建议书，所有数据实时传输至机场智能监控中心，支持后续审计和趋势预测。

4.2 实验验证与结果分析

在实际应用中，对25架飞机进行停机巡检，系统准确识别16处裂纹、9处腐蚀点和5个结构形变。与传统人工巡检方法相比，系统检测效率提高了约60%,精度提升了32%。初筛阶段，本地异常检测时延控制在500ms 以内，异常识别到云端验证的闭环响应时间平均为6s。

系统的可靠性得到了验证。通过云端多轮校验技术，误报率减少了5%,并成功预测了3起潜在危险损伤的恶化趋势，支持预防性维护。

4.3 小结

本实验展示了基于多模态数据融合和云边协同的智能巡检机器人系统，在飞机蒙皮巡检中的关键问题上取得了突破。高效的传感器数据融合、实时异常检测和智能云端分析显著提升了巡检效率和准确性，增强了智能化水平。实验结果表明，该系统在民航机场应用具有较高可行性，为航空领域提供了先进的智能巡检解决方案。

5 结束语

本研究在具身大模型、多模态数据融合、云边协同计算等技术领域进行了系统性探讨，构建了一个适用于多场景智能巡检的机器人系统框架。通过在实际机场环境中利用异构传感器网络，实现了对关键损伤的实时检测与精准定位；结合本地轻量化模型和云端大模型协同优化，提高了系统的响应能力与决策精度；以智能任务分配机制和多机器人协作算法，大幅度提升了复杂环境下任务执行的效率与覆盖范围。实验验证表明，所提出的框架和技术方案有效突破了传统巡检机器人在环境适应、协同决策和任务优化方面的技术瓶颈，大幅提高了巡检效率，降低了人工干预需求，强化了工业自动化领域的应用价值。

综合来看，本研究不仅展示了具身大模型与多机器人协作在巡检机器人领域中的技术前沿，还为下一代机器人智能系统的开发提供了理论与实践参考。研究结果表明，本文提出的框架与方法在促进巡检机器人技术创新、拓展智能制造场景应用以及推动产业升级方面具有显著的积极作用。

参考文献

[1]张晓轩.石油石化企业智能巡检机器人的使用现状与对策[J].中国管理信息化，2022,25(19):222-225.

[2]王建明.智能巡检机器人在电力设备中的应用现状与展望[J].电力系统自动化，2022,46(3):123-130.

[3]张梦婷，杜建强，罗计根，等.多目标优化特征选择研究综述[J].计算机工程与应用，2023,59(3):23-32.

[4]刘若辰，李建霞，刘静，等.动态多目标优化研究综述[J].计算机学报，2020,43(7):1246-1278.

[5]汪群博，刘静.基于大模型的多模态具身智能研究与展望[J].人工智能，2024(3):27-35.

[6]孙长银，穆朝絮，柳文章，等.自主无人系统的具身认知智能框架[J].科技导报，2024,42(12):157-164.

[7]王文晟，谭宁，黄凯，等.基于大模型的具身智能系统综述[J].自动化学报，2025,51(1):1-19.

[8]黄美璇，骆旭坤.基于机器视觉的智能工厂中枢系统的设计[J].宁夏工程技术，2021,20(3):266-270.

[9]付强.云计算与边缘计算协同发展的相关探讨[J].中国设备工程，2022(12):218-220.

[10]宋明俊，严文，邓益昭，等.轻量化机器人抓取位姿实时检测算法[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(3):599-610.

[11]谢静，龙志宏，刘志坚等二云边端热作的架空鳞路鸟巢检测与定位算法研究[J.测量与仪器学报，202年，38(7):68.

[12]廖胜.云边协同的隐私保护数据共享方案[J]. 网络安全和信息化，2023(11):128-130.

[13]王成.基于神经网络模型的云边协同训练与在线优化机制的研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2023.

[14]侯战胜，刘世栋，刘川，等.基于卡尔曼滤波的虚拟电厂时间同步方法[J]. 电力信息与通信技术，2024,22(11):1-6.

[15]王积旺，沈立炜.面向多机器人环境中动态异构任务的细粒度动作分配与调度方法[J]. 计算机科学，2023,50(2):244-253.

[16]严军.高速公路隧道巡检机器人无线通信系统设计及应用[J]. 中国交通信息化，2024(12):126-129.

[17]陈旻.基于边云协同的分布式模型训练研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2023.

[18]张文璐，霍子龙，赵西雨，等.面向智能工厂多机器人定位的无线分布式协同决策[J]. 无线电通信技术，2022,48(4):718-727.

[19]姚翔宇.多机器人系统分析及分布式协同控制研究[D]. 北京：中国地质大学，2021.

[20]刘浩.基于联盟链的可信数据分布式存储与共享研究[D]. 长沙：湖南大学，2022.

[21]莫梓嘉.面向边缘智能的深度卷积神经网络训练与推理优化方法研究[D]. 北京：北京邮电大学，2023.

[22]肖恭翼.面向人工智能图像识别的云边协同任务卸载方法研究[D]. 济南：齐鲁工业大学，2023.

[23]朱凯歌.云边协同环境下工作流调度与资源编排算法研究[D]. 北京：北京交通大学，2023.

公众号 · 智能机器人科技