DOI: 10.3901/JME.2020.13.165

智能化挖掘机的研究现状与发展趋势*

李运华¹ 范茹军¹ 杨丽曼¹ 赵斌² 权龙²

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191;

2. 太原理工大学机械电子工程研究所 太原 030024)

摘要: 智能化挖掘机是传统挖掘机与人工智能、自动控制和信息物理网络等技术深度融合的产物。相对于传统挖掘机,其拥有更高的功率利用率及作业精度,集远程作业、环境感知、智能诊断为一体,在抗震救灾、太空及水下作业等领域都有广阔的应用前景。然而挖掘机液压系统具有强非线性、流量耦合、时变等特点,而工作装置又存在动力学耦合和负载不确定性,结构简单、参数依赖度低、高精度的智能控制算法将提高挖掘机自主作业精度;由于视觉传感器易受光照、气象条件影响,研究多传感器融合及其智能算法将提升挖掘机的环境感知能力;液压系统故障模式隐藏性高,受机载设备硬件限制,探索非冗余小规模深度学习网络和压缩感知技术是实现在线智能故障诊断的关键。从轨迹控制、环境感知、远程控制与智能故障诊断四个方面,综述了挖掘机智能化的国内外研究现状;指出了智能化挖掘机发展存在的问题与发展趋势;最后根据现有研究成果得出了五点结论。

关键词: 智能化挖掘机; 轨迹控制; 环境感知; 远程控制; 故障诊断

中图分类号: TU621

Research Status and Development Trend of Intelligent Excavators

LI Yunhua¹ FAN Rujun¹ YANG Liman¹ ZHAO Bin² QUAN Long²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineer, Beihang University, Beijing 100191;

2. Institute of Mechatronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: The intelligent excavator is the transformation and upgrading of the traditional excavator by using artificial intelligence, automatic control and cyber-physical technology, which has higher energy efficiency and operation precision. Because of the remote operation, environment perception and fault diagnosis, it has wide potential application in earthquake relief, space and underwater operations. However, the excavator hydraulic system has the characteristics of powerful nonlinearity time-varying, and strong fluid coupling, while the working device has dynamic coupling and load uncertainty. Therefore, the intelligent control algorithm with simple structure, low parameter dependence and high precision is the basis of the autonomous excavation. The visual sensor is easily affected by illumination and meteorological conditions. Thus the Multi-sensor fusion intelligent algorithm will enhance the environmental sensing ability of the excavator. The fault mechanisms of the hydraulic system is highly complex and diverse. Because of the limit of the hardware, the non-redundant small-scale deep learning network and compressed-sensing technology is the key to realizing online fault diagnosis. The inland and overseas research status of intelligent excavators in trajectory control, environment perception, remote control and fault diagnosis are reviewed. Meanwhile, the existing key problems and development trend of the research on intelligent excavators are pointed out. At last, five conclusions about the current research status are drawn.

Key words: intelligent excavator; trajectory control; environment perception; remote control; fault diagnosis

0 前言

目前,挖掘机被广泛用于城市建设、农田水利

和露天开采等工程,在保证工程质量,提高劳动生产率方面发挥着重要的作用^[1]。传统挖掘机以驾驶员为基础来完成各种动作,但这种方式存在以下问题^[2-4]: ① 功率利用率低; ② 操作难度大,技术要求高,工作强度大; ③ 工作环境恶劣、危险,水下、太空等领域人类无法直接进入; ④ 视野受限,仅依靠驾驶员目测进行环境观察。近二十年来,通过对

* NSFC-山西煤基低碳联合基金(U1910211)和国家自然科学基金(51475019)资助项目。20190603收到初稿,20191203收到修改稿

液压节能、混合动力以及动力与传动匹配等先进技术的研究,传统挖掘机存在的油耗高、排放差和功率利用率差的问题得到了较大程度的解决^[5-7],但挖掘机液压系统故障检测难、维修难度高、操作难度大、安全性低等问题依然严重制约着生产效率。为应对不断提高的作业精度及效率要求,适应危险、恶劣环境,智能化、自主化已成为挖掘机的主要发展趋势^[8]。

智能化挖掘机是利用人工智能技术、数字化技术、机器人技术和信息物理网络技术对传统挖掘机的升级改造,集智能自主作业、智能感知、远程遥控、智能诊断等功能为一体。目前,国内外典型的智能化挖掘机系统有美国卡内基梅隆大学的自主装载系统^[9](Autonomous loading system, ALS),英国兰卡斯特大学的智能挖掘机系统^[10](Lancaster university computerised intelligent excavator, LUCIE),国内中南大学、浙江大学都有比较成熟的智能化挖掘机试验平台^[11-12]。近些年,智能化挖掘机得到了快速发展,首先得益于多传感器融合和存储技术的进步^[13],该技术可以收集和存储大量离线和在线样本数据,为精确测量挖掘机姿态、提升环境感知和故障诊断能力提供了基础。其次,在于人工智能(Artificial intelligence, AI)技术的不断创新和日益成熟。人工智能^[14]是一种计算机程序,可以不断学习新知识以优化性能,并使机器以人类思维方式思考。当前,机器学习(Machine learning, ML)是人工智能的一个热门领域,该技术已在图像识别、语音识别和其它模式识别领域^[15-17]得到了广泛应用。AI技术与自动控制结合,会产生更有效的智能轨迹控制算法;挖掘机日积月累的运行状态信息形成海量数据,将AI技术应用到环境感知和大数据下的故障诊断^[18],也将极大提升挖掘机的智能化水平。

本文综述了智能化挖掘机在轨迹控制、智能感知、远程控制、在线监测与故障诊断四个方面的研究现状,论述了各项技术的机理、特点及不足,并对智能化挖掘机存在的问题进行了分析,指出了智能化挖掘机未来的发展趋势。

1 智能化挖掘机系统组成

智能化挖掘机是在传统挖掘机的基础上采用智能技术升级改造完成的,除具有传统挖掘机的基本系统之外,还具有机器感知系统、网络通信系统、故障诊断系统与智能控制系统,以便实现自主智能化作业。智能化挖掘机的系统组成如图1所示。机器感知系统可以实时获取自身及周围环境信息,然

后将信息反馈到智能控制系统,辅助操作员完成作业任务;机器与操作员通过网络通信系统实现远距离人机交互,以便操作员实时掌握作业情况;故障诊断系统实时显示机器健康信息,确定故障类型及故障位置,实现自我修复或发出警告。

图1 智能化挖掘机系统组成

2 智能化挖掘机轨迹控制

2.1 轨迹控制

2.1.1 轨迹规划方法

轨迹规划是指构建一条从起点到终点,无碰、高效、节能的运动序列。轨迹规划可分为关节空间和笛卡儿空间轨迹规划两种。关节空间轨迹规划对关节角、角速度及角加速度进行规划,由于直接规划控制变量,所以控制方便,但需经过运动学正解求工作空间轨迹。笛卡儿空间轨迹规划直接规划铲斗末端的位移、速度与加速度,便于工作任务分解,但需通过逆运动学求解关节变量,计算量较大,控制不便。轨迹规划通常采用3次样条插值函数、高次多项式插值函数、B样条函数、正弦及修正的正弦函数进行规划。

文献[19]采用3次样条插值在关节空间进行轨迹规划,其计算效率高,但存在加加速度突变,造成关节冲击。为了降低关节冲击,ANGELES等^[20]采用分段多项式样条插值函数进行轨迹规划,该方法无需求解运动学逆解,但是多项式系数较难计算。美国卡内基梅隆大学SINGH等^[21]提出了一套实时轨迹规划和执行复杂挖掘运动的参数化过程方法,可以实现液压挖掘机实时轨迹规划和执行复合挖掘动作。

国内浙江大学朱世强等^[22]在7次B样条曲线规划的基础上,研究了机械臂脉冲连续的新型算法。

ZHANG 等^[23]采用预先设置齿尖轨迹的方法, 利用 Visual C++ 开发了可以自动计算执行机构速度和加速度的程序, 实现了 3D 实体仿真。翁文文等^[24]对比了变阶 5 次多项式曲线与 5 次非均匀有理 B 样条曲线 (Non-uniform rational B-splines, NURBS) 的规划效果, 实验显示 5 次 NURBS 曲线运动更平稳。浙江大学李勇等^[12]将铲斗运动划分为加速、匀速、减速三个阶段, 采用正弦函数规划了加速度连续的铲斗齿尖轨迹, 如图 2 所示。

图 2 正弦加减速规划^[12]

综上所述, 现有方法虽能满足一定的作业需求, 但各有利弊, 表 1 总结了轨迹规划常用函数的优缺点。针对不同的作业工况, 如何选择最佳的轨迹规划方法, 规划出吻合度更高的齿尖轨迹是现阶段国内外的研究重点。

表 1 常用规划函数优缺点表

规划函数	优点	缺点
3 次多项式	计算简单	加加速度不连续, 冲击较大
高次多项式	速度、加速度连续, 冲击较小	系数计算复杂, 效率低
B 样条	保凸性好、关节角度变化小、导数连续、局部支撑性	无法描述抛物线外的二次曲线
NURBS	局部特性好, 权因子、控制定点和节点矢量可调整	求导程序复杂

2.1.2 轨迹优化

机械臂在使用过程中, 由于受到机械结构、力矩等条件的限制, 其速度、加速度需要加以约束, 因此需要采用优化方法对轨迹进行优化。最优运动轨迹指的是一条能够使某一或多个性能指标达到最优, 而且满足相关约束条件的轨迹。其中, 运动时间、能量消耗是轨迹规划优化时主要考虑的两个指标。

(1) 基于时间最优的轨迹规划。

机械臂的运动时间与生产效率挂钩, 因此以运动时间最短为目标的轨迹规划是目前的研究热点之

一。在使用 3 次多项式进行轨迹优化时, 存在加速度突变问题, 实际应用时会产生较大冲击。为了解决这一问题, 布达佩斯大学 NAGY 等^[25]采用直接转换法生成速度轮廓, 实现了机械臂的全局时间最优。在对速度和加速度进行约束的条件下, 孙志毅等^[26]基于 4-3-3-3-4 分段多项式插值函数, 采用差分进化算法获得了运动时间最短的挖掘轨迹。但是, 采用优化算法进行时间最优的轨迹优化时, 往往将约束条件直接作为判断条件使用, 这样每迭代一次都需要对约束条件进行判断, 整个寻优过程时间较长, 甚至搜索不到最优解。

(2) 基于能量利用最优的轨迹规划。

为降低挖掘机能耗, 韩国斗山公司 YOO 等^[27]采用 B 样条函数对执行机构位移进行参数化处理, 建立了泵的最大流量与执行机构运动约束之间的耦合关系, 实验结果表明挖掘机运动平稳, 能显著降低能耗和机械磨损。在矿用电铲方面, STAVROPOULOU 等^[28]建立了电铲挖掘力与能耗的数学模型, 为电铲的挖掘轨迹优化及能量消耗分析提供了依据。国内大连理工大学 WANG 等^[29]采用不同幂次的高阶多项式规划了以能量消耗最低为目标的电铲轨迹, 结果表明 6 次多项式最符合实际要求, 但是忽略了电机输出功率的时变特性, 而且对速度和加速度的范围并没有进行约束。

单一指标最优往往满足不了具体的作业需求, 因此需要多种优化指标综合最优的轨迹规划方法。但是, 综合最优计算量较大, 会间接影响生产效率。针对整个作业循环, KIM 等采用递归几何算法完成了以时间最短、扭矩最小为目标的轨迹规划^[30]。在考虑土-斗相互作用的基础上, 重庆大学 ZOU 等^[31]采用 B 样条对铲斗齿尖进行了时间最优、能量利用最优以及机器损伤最小的多目标轨迹规划。在包含以能量利用最优为目标的轨迹规划时, 挖掘力对目标函数影响较大, 因此需要研究更精确的挖掘力模型, 提高挖掘力理论值与真实值之间的吻合度。随着人工智能技术的发展, 通过无监督的强化学习, 试错的同时与环境之间不断交互学习, 将更好地完成机械臂的轨迹规划。

2.1.3 铲斗轨迹控制

根据不同的控制目标, 挖掘机铲斗轨迹控制可分为两类: 以控制精度为目标的位置伺服控制和以力适应为目标的柔顺控制。

(1) 位置伺服控制。

挖掘机电液伺服系统是典型的非线性系统, 主要表现在比例阀死区、间隙、流量压力非线性、阀控非对称缸动态响应不对称、非线性摩擦、系统参

数随温度变化等;联合动作时,还存在流量耦合、结构动力学耦合和负载不确定性。这些影响因素要求轨迹控制方法具有一定的适应性和鲁棒性。目前,位置伺服控制方法主要有以下几类。

1) PID(Proportional-integral-derivative)控制。

PID 控制因其设计简单,在挖掘机控制领域得到了广泛应用。文献[32-33]采用传统 PID 控制实现了对挖掘机铲斗轨迹的控制。南京工业大学 FENG 等^[34]采用改进的遗传算法对挖掘机轨迹跟踪 PID 控制参数进行优化,通过 Ziegler-Nichols(Z-N)方法使初始种群在 PID 参数范围内产生,采用自适应的适应度函数、交叉和变异概率,避免了寻优时过早收敛和停滞。但是上述方法比较适合速度不高的场合,当运动速度过快或负载变化剧烈时,无法保证 PID 控制精度。由于工作环境复杂多变,传统 PID 控制方法往往难以满足智能化挖掘机的高精度作业要求。

2) 滑模变结构控制。

滑模控制能够在一定程度上克服系统的非线性与不确定性,是一种鲁棒性控制方法。为了降低负载扰动和系统非线性的影响,澳大利亚机器人研究中心的 HA 等^[35]设计了基于模糊规则的滑模控制器,首先利用极点配置法设计了等效控制,然后采用开关控制确保系统达到滑模,最后通过模糊整定降低了系统的抖振。沈阳化工大学张金萍等^[36]基于拉格朗日法建立了包括回转在内的挖掘机四自由度动力学方程,提出了自适应模糊滑模控制方法。该方法采用自适应模糊的输出项代替滑模控制的切换项,降低了抖振,并通过仿真进行了验证。滑模控制的主要缺点是系统的“抖振”现象,当负载剧烈变化时,需要增大功率来克服系统的不确定性,这样会引起系统饱和,甚至破坏系统的稳定性。

3) 自适应鲁棒控制(Adaptive robust control, ARC)。

鲁棒控制适合处理小范围内的快变不确定性,而自适应控制适合处理大范围的慢变不确定性,两种方法有机结合形成自适应鲁棒控制。美国普渡大学 BU 等^[37]为了解决液压机械臂非线性及强耦合问题,研究了基于加速度观测器的自适应鲁棒控制方法。该方法同时考虑了系统非线性、载荷及参数不确定性的影响,可以保证控制误差渐进收敛。中南大学 HE 等^[38]也将 ARC 应用到挖掘机控制,采用非连续投影法近似处理阀的非线性增益系数以及系统的非线性,提高了轨迹跟踪精度。但当传感器精度不够时,测量噪声对 ARC 控制精度影响较大,这就对传感器的精度提出了严格的要求。

4) 时延控制(Time delay control, TDC)。

时延控制与其它控制方法相比,不需要进行系统识别,其通过时延估计来补偿系统非线性与复杂的动力学耦合。韩国先进科学技术研究院的 CHANG 等^[39]为了克服挖掘机液压系统非线性时变的影响,采用了时间延迟控制技术,将直线平地作业误差控制在 10 cm 之内。与传统时延技术相比,离散时延控制不需要加速度信息,这样就避免了包含在加速度信息中的噪声,因此更适合实际应用。为了提高控制精度,韩国釜山大学 KIM 等^[40]将离散时延控制与非线性滑模控制结合,降低了系统计算量与传感器数量,将跟踪精度控制在 2 cm 之内。但要保证 TDC 控制精度的话,系统需要较高的采样频率。

5) 智能控制。

人工智能技术可以有效处理非线性等不确定性问题,将其与控制技术结合,可有效处理挖掘机轨迹控制问题。在综合考虑土壤与工作装置相互作用以及控制系统非线性因素的基础上,韩国首尔大学 PARK 等^[41]采用具有一定自学能力的回声状态网络,实现了复合动作的精确控制。LE 等^[42]将模糊自校正和神经网络进行融合,给出了二自由度微型电液挖掘机的轨迹控制模型。国内 CAI 等^[43]提出了专门针对非线性行为进行精确建模的方法,并采用径向基(Radial basis function, RBF)神经网络对复杂的动态过程进行模拟,获得了较为理想的效果。神经网络虽然在处理非线性问题时效果较好,但是网络参数的选择需要大量的理论和实验数据,适用范围窄,对机载设备硬件要求高。

上述控制方法虽然取得了不错的控制效果,但没有考虑多执行器间误差的互相影响。由于每个执行器受到的干扰、负载一般各不相同,造成控制效果也不相同,若其中某个执行器的误差较大,铲斗的控制效果也会不理想。为了解决上述问题,协同控制算法得到了应用。

6) 协同控制。

为了进一步提高轨迹控制精度,韩国首尔大学 KIM 等^[44]将系统非线性和扰动作为联合动力学中的不确定性来处理,利用 PD(Proportional-derivative)反馈将系统非线性近似线性化,并引入模型参考自适应理论设计了基于 μ -synthesis 的鲁棒控制器来保证系统的鲁棒性。通过对每个关节采用相同的二阶参考模型,提高了轨迹跟踪精度,然而并没有实验验证该方法的有效性。浙江大学李勇将神经网络、自适应控制、终端滑模控制与反馈线性化结合,提出了自适应神经网络终端滑模控制算法^[12]。该方法

采用自适应回声状态网络在线拟合系统未知函数,从而使该控制方法不依赖系统模型参数,同时引入鲁棒控制项处理观测及拟合误差,提高了控制效果。

(2) 柔顺控制。

柔顺控制主要针对挖掘阶段,包括被动柔顺控制和主动柔顺控制。被动柔顺控制一般通过柔性关节或装置来实现,硬件要求高。主动柔顺控制根据力反馈进行主动力控制,可分为直接力和间接力控制。在直接力柔顺控制领域,加州理工大学 RAIBERT 等^[45]提出了基于铲斗位置的混合位移/力控制策略,当铲斗处于挖掘阶段时为力控制,自由运动时为位移控制,但在控制模式切换的瞬间系统可能会失稳。与直接力控制相比,间接力控制在挖掘机领域得到了更广泛的应用。为适应不同环境的挖掘阻力,VÄHÄ 等^[46]提出了认知力控制策略,该方法可以根据阻力大小自动调节挖掘深度及铲斗速度,避免过大冲击。澳大利亚机器人研究中心 NGUYEN 等^[47]设计的鲁棒力控制器可以实现油缸力对目标力的追踪,同时采用观测器消除了非线性摩擦力对系统性能的影响。该系统结构简单,但在实验中用高性能伺服阀代替了多路比例阀,与实际情况差别较大。

可见,位置伺服控制可以保证铲斗高精度完成挖掘动作,柔顺控制则可以降低挖掘力对机械臂的冲击。位置伺服控制比较适合挖掘力较小的场合,如松散、沙质土壤。柔顺控制在坚硬土壤或存在障碍物的环境中具有更强的顺应性,但是需要响应快、可靠性强的力传感器,而且系统比位置伺服控制更加复杂。

2.2 智能避障控制

在轨迹精确控制的基础上,自适应载荷需求的自主挖掘成为了挖掘机发展的新趋势。因此,通过传感器技术和智能化算法来使挖掘机避开工作环境中的障碍显得尤为重要。

挖掘机避障可分为移动避障与机械臂避障两种,在此我们主要讨论后者。机械臂避障与移动避障区别:① 空间维数高;② 避障同时,还要避免连杆相交。针对这一问题,韩国 PARK 等^[48]利用神经网络改善了传统方法求解伪逆方程所需时间较长的问题,实现了挖掘、联合控制和避障同步完成,并指出采用神经网络算法可以有效提高挖掘机的避障能力。KIM 等^[49]重点研究了可集群控制智能工程装备的系统构架、人与物识别、调度、资源分配以及导航策略,其基于 GPS(Global position system)的碰撞预测与障碍规避系统可避开静止和移动的障碍。国内中南大学朱建新等^[50]在分析工作装置运动

特性的基础上,提出了工作装置回转避障方法,该方法通过安装在挖掘机两侧的激光雷达对施工场景进行辨识,通过求解障碍物的可行域,采用避障算法控制挖掘机完成避障动作。

上述研究大多是针对机器感知系统可以观测到的障碍物,从而采用避障方法进行避让。但在非均匀介质环境中,挖掘环境存在较大的不确定性,可能存在连续多障碍物的情况,且具有不可观测性,因此如何在此类环境中避开多个障碍物,同时满足满斗率要求,是实现挖掘机智能化的重要条件之一。

2.3 无人化控制

在轨迹精确控制和智能避障的基础上,智能化挖掘机开始向整机无人化作业方向发展,以满足特殊环境作业和确保操作人员人身安全的需要。无人自主作业挖掘机的发展主要分为两个阶段:基于轨迹规划的自动挖掘阶段与面向现场工况的自主作业阶段。

基于轨迹规划的自动挖掘通过对工作装置进行轨迹规划,采用复杂的控制算法能够完成简单工况的自主作业。澳大利亚机器人技术中心的自主挖掘项目(Australian center for field robotics, ACFR),通过对小松微型挖掘机进行一定程度的改造,使其具有任务分解、状态监控及路径规划等功能,采用模糊滑模控制将自主挖掘机的轨迹作业精度可以控制在 20 cm 以内,同时在液压系统非线性及系统不确定性方面具有较强的鲁棒性^[47]。英国兰卡斯特大学 GU 等^[10]研发的智能化挖掘机系统 LUCIE,可以在不同土壤和障碍环境中高效完成直沟渠的自主挖掘作业。国内中南大学赵鑫等^[11]在山河智能挖掘机的基础上,搭建了基于 OpenGL 的挖掘机可视化虚拟样机系统,实现了挖掘机自主挖掘的虚拟控制。在挖掘机自主智能作业的研究中,QUANG 等^[51]总结了 ACFR 实验室关于挖掘机自动化的一些方法,并指出机器人技术和计算机技术为挖掘机自动化提供了有力的保障。

面向现场工况的自主作业挖掘机,具有复杂工况实时建模、任务分解、自主避障等功能。美国威斯康星大学 SEO 等^[52]研制的智能控制系统(Intelligent excavation system, IES),具有环境感知、自主避障、自主作业等功能。小松将智能化挖掘机与智能施工(Smart construction)技术结合,实时采集工况信息并制定施工方案,部分实现了挖掘机的全自动作业。

国内自主作业挖掘机主要处于轨迹规划的自动挖掘阶段,而国外部分已达到面向现场工况阶段。基于轨迹规划的自主作业主要是面向确定性工况,采用离线的轨迹规划方法,结合挖掘机感知系统,

可以完成工况较为单一的无人挖掘作业。如果环境改变, 轨迹无法实时更新, 同时其无法与其它机械配合完成复杂的作业任务。面向现场工况的挖掘机根据作业现场情况能够及时调整作业任务划分, 在非确定性环境下自主作业, 是智能化挖掘机的主要发展方向。

3 智能化挖掘机感知技术

3.1 姿态测量

姿态数据是轨迹规划的数据基础, 智能控制系统会根据轨迹规划的结果来控制工作装置的运动, 同时判断实际轨迹与期望轨迹的吻合度。

3.1.1 接触式测量

接触式测量是指在工作装置上安装传感器来测量其姿态, 如在液压缸上安装位移传感器来测量其伸缩量, 进而通过运动学求解来获取工作装置的姿态信息。

为了实现矩形沟渠的自主挖掘, 日本政府公共工程研究机构和筑波大学^[53]利用旋转编码器和电位计来获取挖掘机的姿态信息。英国兰卡斯特大学 GU 等^[54]采用旋转电位计和倾角传感器来估计智能化挖掘机 LUCIE 的姿态信息。国内中联重科股份有限公司采用传感器测量臂架油缸伸缩量, 得到机器工作姿态参数, 从而计算挖掘机稳定系数, 防止倾翻。华侨大学牛大伟^[55]采用微机电传感器(Micro electro-mechanical systems, MEMS)对挖掘机姿态信息进行测量, 提高了姿态监测的稳定性与可靠性。

由于传感器安装在工作装置上, 作业工程中的碰撞会造成传感器的毁坏, 同时剧烈震动对数据精确采集产生影响, 从而影响测量准确度。

3.1.2 非接触式测量

非接触式测量是以光电、电磁等技术为基础, 在不接触被测物体的情况下, 得到机器位姿信息的测量方法。

非接触式测量主要分为非视觉测量与视觉测量两种。其中, 非视觉测量主要有惯性测量, 全球定位系统, 无线局域网等方法。视觉测量是一种源自于计算机视觉的新型非接触式测量技术。美国普渡大学 YUAN 等^[56]基于立体视觉技术, 通过提取混合运动形态和关键节点特征对挖掘机进行检测和跟踪。加拿大阿拉巴马大学 XU 等^[57]研究了一种基于视觉神经网络的机械臂姿态估计新方法, 如图 3 所示。该方法利用安装在驾驶室上的摄像头对机械臂图像进行采集, 通过神经网络将姿态信息反馈至 PI (Proportional-integral) 控制系统, 从而对机械手进行

控制, 实验表明该方法具有稳定的分级性能, 但该系统的实时性较难解决。图像采集速度较低或者神经网络处理图像时间较长会给控制系统带来明显时滞, 因此图像处理速度是影响视觉伺服控制系统实时性的主要因素之一。

图 3 液压缸位置控制系统的反馈结构^[57]

由于卷积神经网络在图像识别方面具有优异的性能, 美国密歇根大学 LIANG 等^[58]采用深度卷积神经网络(Convolutional neural networks, CNN)训练挖掘机图片集, 得出机器二维姿态信息。然后, 堆叠沙漏网络利用二维姿态估计结果, 对三维位姿进行预测和重构, 与传感器测量相比更加准确。但是该方法存在以下问题: ① 图片集来自于实验室, 当应用到背景复杂的施工现场时性能可能不太理想; ② 三维姿态是以二维姿态估计为基础, 会产生累积误差; ③ 网络结构和硬件计算会产生一定的延迟。

为了增强图像质量, 国内西南交通大学王海波等^[59]通过加装红外光源和滤光片的方法来避免自然光变化对工业摄像机的影响, 采用鞍点检测法能够快速获得工作装置的姿态信息。由于三维点云数据的高可靠性与较强的环境适应性, 朱建新等^[60]提出了一种基于点云聚类特征值方图的目标识别方法。基于机器视觉的位姿测量需要对图像特征进行准确提取, 是挖掘机位姿测量的关键步骤。在复杂的施工背景下, 如何提高匹配算法的鲁棒性、准确性, 是提高视觉测量精度的关键。

3.2 智能施工

为提高生产效率, 必须建立一个适应于地质特征的有效挖掘计划, 为此需要建立整个施工现场的全局模型, 同时能够对局部地形进行实时更新。韩国教育大学 YOO 等^[61]采用车载三维激光扫描仪建立施工现场的全局模型, 得到工程区域的范围和生产数据, 通过安装在驾驶室上方的 2D 激光扫描仪进行局部建模, 由于机器前端的施工地形不断变化, 因而局部模型需要不断更新, 但范围受挖掘机前方半径 8 m 的约束, 如图 4 所示。由于车载扫描仪的

高度有限,当施工现场存在高地或树林时,扫描仪会被阻挡,影响施工效率,而且为了扫描全局需要车辆不断运动。

图4 全局与局部地形建模^[61]

韩国建筑技术研究院 CHAE 等^[62-63]开发了一种用于智能开挖的三维曲面建模系统,该系统可以对作业环境模型进行实时更新,自动更新机群作业顺序,指导挖掘机进行自主作业。日本小松公司联合英伟达公司开发了基于 Nvidia Jetson 嵌入式平台的 KomVision 系统^[64],该系统采用 AI 技术对机载视觉信息和定点巡逻无人机视觉信息进行整合分析,得到高精度的施工现场三维图并制定施工方案,如图 5 所示。目前小松的智能施工技术已经在 4 000 多处施工现场得到了应用。

图5 小松工况智能感知系统^[64]

挖掘机感知系统常用的传感器主要有视觉传感器、激光传感器等,每种传感器各有特点和局限性,如表 2 所示。有效组合各类传感器,采用多源信息融合技术对不同传感器信息进行融合,互相验证、互为补充各自信息,可以有效增强感知系统的灵活性和鲁棒性,取得更加可靠、准确的结果。目前基于视觉的控制算法较为丰富,但是受光照、天气影响较大,研究多传感器融合算法,也是提高感知能力的关键。

表2 各类传感器优缺点表

传感器	优点	缺点
单目摄像头	动态响应快、信息丰富、成本低、现有算法丰富	受光照、天气影响大,精度低,需要不断更新维护,需要几何约束,几乎无法实现三维建模
双目摄像头	耗时短、无需几何约束、适应范围广、三维成像	受光照、天气影响大,计算量大、小型化难度大、视角小
激光扫描仪	三维成像好、精度高、稳定性高、鲁棒性好	价格昂贵,仅依靠点云无法识别物体及分类

4 智能化挖掘机远程控制

在复杂、恶劣、危险的施工环境中,利用远程挖掘机替代操作员完成危险工作是理想的解决方案之一。

4.1 基于无线通信的远程控制

从遥控视距来看,遥控技术主要经历了视距遥控、超视距遥控和远程无线遥控三个阶段。20 世纪 80 年代初,美国约翰迪尔公司的无线遥控挖掘机,遥控半径达到 1 500 多米。2003 年,澳大利亚机器人中心解决了挖掘机遥控操作中的推力控制问题。国内浙江大学开发的无线挖掘机,遥控半径 20 m。中南大学与山河智能在无线遥控、远程监控等方面合作,将无线遥控距离提高到 100 m。此后,山河智能融合多传感技术与无线技术将遥控距离提高到 500 m 左右,并实现了精确控制。

时延是远程通信系统无法避免的问题之一,而高速、低功耗、低延迟正是 5G 最引人注目的特点。2018 年,韩国斗山公司首次展示了与 LGU+ 共同研发的利用 5G 技术对工程机械进行远程控制的技术,可以远程操控 880 km 之外的仁川挖掘机。2019 年,国内三一重工展示了与华为、中国移动等联合打造的 5G 遥控挖掘机,可以远程控制河南洛阳柴川钼矿的挖掘机作业,将操作误差控制在 10 cm 之内^[65],如图 6 所示。

图6 三一重工 5G 遥控挖掘机的遥控画面^[65]

4.2 基于穿戴式的远程控制

基于穿戴式的远程控制是指通过安装在操作员身上的传感器,将操作员的动作信息映射到挖掘机。韩国蔚山大学 LE 等^[66]提出了一种集视觉反馈和便携操作为一体的远程控制方法。该方法利用头盔显示器(Head mounted display, HMD)取代传统显示屏,将环境信息反馈给远程操作员,前置、司机室和后

置摄像机可以跟踪操作员的头部运动,会根据操控手柄的动作来选择视野,如操作机械臂时便会显示铲斗、动臂、斗杆及周围环境的信息,提高了操作灵活性,如图7所示。但是由于其使用的是 CCD (Charge coupled device)相机,传输立体图像的效果不佳,另外由于眼部被 HMD 罩住,无法观察手柄位置容易造成误操作。

图7 挖掘机机械臂液压缸控制系统的控制器结构^[66]

韩国首尔大学 KIM 等^[67]设计了一种基于主从关系的远程挖掘机控制系统,如图8所示。该系统的惯性测量单元通过测量手腕的欧拉角来控制挖掘机回转、动臂和斗杆的运动;测量仪测量上臂相对于重力方向的角度,并通过 RS-232 与计算机通信来控制斗杆的运动;旋转编码器通过测量手臂和小指之间的角度来控制铲斗运动。

图8 基于穿戴式的远程遥控挖掘机^[67]

该装置重量轻且构造简单,但操作时手臂需要长时间保持一定姿势,易产生疲劳且无法完成挖掘机回转与动臂提升的联合动作。此外,还需配备附加设备,如工业计算机和电源,实际应用难度较大。

4.3 基于力反馈式的远程控制

力觉感知能够使远程操作员真实感知挖掘机与环境之间的相互作用力,以便操作员能够如亲临现场般实现对机械臂的控制,更加准确的完成复杂的挖掘动作。

力觉感知主要通过力反馈式操作手柄来实现。韩国高丽大学 KIM 等^[68]通过波变量法设计了一种双边远程触觉装置来控制远程挖掘机,该系统将动臂、斗杆、铲斗的运动分别映射到操作者的肘部、腕部及食指,如图9所示。在满足挖掘机动力学要求的同时,该装置还具有力觉感知功能,可以使操作者真实感受操控力,以避免出现危险情况。传统操作手柄需要双手操作,而此装置除转动之外只需要单手操作,操作简单。

现阶段,国内外远程遥控挖掘机主要集中在中小型挖掘机,大吨位的遥控挖掘机数量较少。在抗震救灾、矿山开采等领域,小型挖掘机生产效率低,难以满足施工要求,并且无线遥控挖掘机成本昂贵,实用性有待提高。基于穿戴式与力觉感知的远程挖掘机仍处于实验室阶段,而且较难完成复杂的联合动作,从操作员到机器的动作映射造成控制精度偏低。

图9 挖掘机力反馈操作手柄^[68]

5 智能化挖掘机在线监测与故障诊断

在线监测与故障诊断技术是确保装备高效可靠运行的关键,也是中国制造 2025 建设制造强国的核心技术之一。

5.1 在线监测

为了更好地满足客户需求,基于状态的维护(Condition based maintenance, CBM)越来越受到厂商欢迎,CBM 需要原始设备制造商对在线状态参数进行持续监控。德国 O&K 公司的挖掘机监控系统可以实时监测作业过程中的各节点关键信息,显示故障类型以及健康状况,在重大故障发生前会发出警告,避免损失。小松康查士管理系统将机器运行状况上传到公司服务器,用户可以查询挖掘机的状态参数,如油耗、作业情况及故障等。学术界方面,英国拉夫堡大学 NG 等^[69]采用内嵌式颗粒污染传感器对移动机械的液压系统进行动态数据监测,根据液压油中金属颗粒的大小、形状来确定磨损发生的位置及程度,为及时维修做准备。韩国机械材料研究所 LEE 等^[70]通过分析液压油污染程度来检测大型挖掘机齿轮传动箱的磨损程度,并采用频率响应特性来判断齿轮箱的轮齿是否失效。

国内河北天远集团研发的“工程机械远程监控系统”,具有状态实时监测、故障诊断与报警功能。三一重工研发了基于 GPRS(General packet radio service)的远程监控平台,具有数据监测、数据处理、远程监控等功能。石家庄铁道大学冯萧^[71]研究了油液在线监测技术,并开发了基于 LabVIEW 的油液分析管理系统,为挖掘机故障诊断提供了依据。虽然国内挖掘机远程监控技术取得了快速发展,但很多是仿制国外产品,与国外相比仍有差距。

5.2 故障诊断

随着计算机技术与人工智能技术的进步,故障诊断技术迎来了快速发展。

美国卡特彼勒公司的智讯系统(Cat product link),通过收集挖掘机关键性能指标和运行数据,可以帮助客户实时监测、管理设备,并预测设备的潜在故障。美国捷尔杰公司的 Clear Sky 系统可以准确判断故障点,指导维修人员直接赶赴维修点,也可以进入其监控系统,进行故障查找及排除,有效缩短了维修时间和成本。

随着工业制造 4.0 时代到来,国内三一重工推出了集远程监控与在线诊断为一体的故障诊断平台,该平台能够对挖掘机位置、作业动态进行信息采集和分析,但故障类型仍需工程师诊断。徐工的物联网系统通过对数据挖掘分析,可以实现设备远程监控与故障诊断。随着机器学习在故障诊断领域的应用,石家庄铁道大学 LI 等^[72]采用双谱熵和深度置信网络(Deep belief networks, DBN)相结合的方法对液压泵故障进行预测,该方法采用量子粒子群优化算法优化网络参数,提高了故障诊断准确度。为了提高挖掘机液压系统的可靠性,中南大学 HE 等^[73-74]分别采用偏最小二乘回归、主成分分析和模糊聚类相结合的方法对挖掘机液压系统进行故障诊断。此外,HE 等^[75]还采用动态主成分分析方法对挖掘机液压系统故障诊断进行了较为完整的研究。但是,大部分诊断方法只研究了单个故障,对多故障联合发生的情况研究较少。国内工程机械在故障诊断领域虽然发展迅猛,但国内设备主要针对单机现场监控,在远程状态实时监测与故障诊断方面与国外差距较大,监控核心装备大部分依赖进口。

通过总结可以看出,挖掘机故障诊断还存在以下问题。

- (1) 故障诊断系统主要针对挖掘机液压系统,对其他系统研究较少。
- (2) 诊断故障类型单一。大多数故障诊断只是针对某一类型,当多故障同时发生时,采用数学分析方法无法给出准确结果及故障原因。
- (3) 国内远程故障诊断智能化程度低。虽然企业与客户实现了远距离故障诊断对接,但仍需工程师判断故障并进行维修。
- (4) 深度学习作为智能故障诊断领域中的一颗新星,近年来引起了研究者的广泛关注。目前常用的深度学习模型有四种:深度神经网络(Deep neural network, DNN)、深度置信网络、卷积神经网络和递归神经网络(Recurrent neural network, RNN)。基于机器学习的智能故障诊断在旋转机械、滚动轴承、齿轮箱等领域取得了快速发展^[76-78],但在挖掘机整机及液压系统故障诊断方面的研究相对匮乏,有待进一步深入研究。

6 存在问题与发展展望

(1) 高精度控制算法。

挖掘机液压系统具有强非线性、机电液强耦合性、时变等特点；执行复合动作时，工作装置存在动力学耦合和负载不确定性；室外作业时，液压系统参数变化范围大，挖掘阻力复杂多变。非线性控制尽管效果较好，但需提前测定液压元件特性，对无法测定的模型参数需要进行辨识，因此探索结构简单、参数依赖度低的高性能智能控制算法是解决问题的关键。其次，作业精度要求较高时，需要多执行器协同运动，研究高精度的协同控制算法也是未来的研究方向之一。

(2) 多传感器融合的智能感知技术。

目前，感知所采用的传感器主要包括：单目摄像头、双目摄像头、各种雷达等。这些传感器各有利弊，施工现场存在环境干扰的情况下，图像识别率不高，如何进行各传感器多层次、多空间的信息互补和优化组合是解决问题的关键之一。多传感器系统获取多样、复杂、完整的信息，主要体现在融合算法上。因此，探索基于深度神经网络的智能融合算法是未来提升感知系统自适应能力与稳定性的关键。

(3) 基于大数据分析的智能故障诊断。

挖掘机液压系统由多个子系统组成，短时间内存在多个源故障并发的可能，导致多个子系统功能异常，因此故障模式的数量随着系统复杂度增加呈指数增长，造成故障隐藏性高，难以判断故障根源。采用深度神经网络进行故障诊断时需要大规模的网络参数，对于智能机载诊断设备来说，诊断效率受到硬件限制，因此需要探索一种非冗余的小规模网络结构。其次，挖掘机多个系统长时间的运行信息形成海量数据，推动故障诊断进入“大数据”时代，探索压缩感知技术，通过采集极少量数据获取最大程度的机械运行状况显得尤为重要。

7 结论

(1) 轨迹优化方向逐渐由单目标向多目标转变，以时间最优、能量利用最优为目标兼以速度、加速度为约束条件。为建立更精确的挖掘力与能耗关系模型，需要对挖掘力模型进行改进。

(2) 现有挖掘机自主作业主要在确定性工况下进行。针对可视化障碍物，可利用避障算法使挖掘机自动避开。研究物料中隐藏的多障碍物连续避障

算法，实现不同土壤(矿堆)、不同作业要求的自规划轨迹，可进一步提高机器自适应能力。

(3) 远程控制主要针对中小型挖掘机，5G技术将极大提升远程控制距离、降低延迟，但离实用仍有距离。在大型挖掘机及矿用挖掘机领域，远程遥控案例较少，特别在粉尘较多的矿用领域，远程控制显得更加重要。

(4) 挖掘机的环境感知能力得到提高。通过将立体视觉、三维激光扫描仪等应用于挖掘机，结合机器学习在图像处理方面的优势，挖掘机的感知能力得到增强，利用状态反馈提高了挖掘机的运动控制效果。

(5) 国外在挖掘机智能化方面处于领先地位。国内挖掘机在线监测与故障诊断技术与国外相比有较大差距，国外产品已部分实现车载在线诊断，国内大部分仍需停机诊断。

参 考 文 献

- [1] 葛磊, 董致新, 李运华, 等. 系列化液压挖掘机数字样机研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(14): 186-196.
GE Lei, DONG Zhixin, LI Yunhua, et al. Research on digital prototypes of serial hydraulic excavators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(14): 186-196.
- [2] YUSOF A A, SAADUN M N A, SULAIMAN H, et al. The development of tele-operated electro-hydraulic actuator (T-EHA) for mini excavator tele-operation[M]. New York: IEEE, 2016.
- [3] LEE S U, CHANG P H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(7): 697-711.
- [4] PAPADOPOULOS E, MU B, FRENETTE R. On modeling, identification, and control of a heavy-duty electrohydraulic harvester manipulator[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(2): 178-187.
- [5] 李泽鹏, 权龙, 葛磊, 等. 液电混合驱动液压挖掘机动臂特性及能效研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 213-219.
LI Zepeng, QUAN Long, GE Lei, et al. Research on characteristics and energy efficiency of hydraulic-electric combined driving hydraulic excavator boom[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 213-219.
- [6] GE L, QUAN L, LI Y W, et al. A novel hydraulic excavator boom driving system with high efficiency and potential energy regeneration capability[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 166: 308-317.

- [7] LIN T, WANG Q. Hydraulic accumulator-motor-generator energy regeneration system for a hybrid hydraulic excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(6): 1121-1129.
- [8] 杨华勇. 工程机械智能化进展与发展趋势[J]. 建设机械技术与管理, 2017, 30(12): 19-21.
YANG Huayong. Progress and trend of construction machinery intelligence[J]. Construction Machinery Technology and Management, 2017, 30(12): 19-21.
- [9] CANNON H N. Extended earthmoving with an autonomous excavator[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1999.
- [10] GU J, TAYLOR C J, SEWARD D W. Proportional-Integral-Plus control strategy of an intelligent excavator[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(1): 16-27.
- [11] 赵鑫. 智能挖掘机轨迹控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
ZHAO Xin. Trajectory control of the new intelligent excavator[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [12] 李勇. 自动作业液压挖掘机的铲斗轨迹控制和回转力矩控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
LI Yong. Study on bucket trajectory and swing torque control for the autonomous hydraulic excavator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [13] TIAN T, SUN S, LI N. Multi-sensor information fusion estimators for stochastic uncertain systems with correlated noises[J]. Information Fusion, 2016, 27: 126-137.
- [14] RUSSELL S J, NORVIG P. Artificial intelligence: A modern approach[M]. Malaysia: Pearson Education Limited, 2016.
- [15] SEO Y, SHIN K S. Hierarchical convolutional neural networks for fashion image classification[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 116: 328-339.
- [16] DUA M, AGGARWAL R K, BISWAS M. Discriminatively trained continuous Hindi speech recognition system using interpolated recurrent neural network language modeling[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(10): 6747-6755.
- [17] LI B T, PI D C. Learning deep neural networks for node classification[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 137: 324-334.
- [18] 雷亚国, 贾峰, 孔德同, 等. 大数据下机械智能故障诊断的机遇与挑战[J]. 机械工程学报, 2018, 54(5): 94-104.
LEI Yaguo, JIA Feng, KONG Detong, et al. Opportunities and challenges of machinery intelligent fault diagnosis in big data era[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(5): 94-104.
- [19] KIM K W, KIM H S, CHOI Y K, et al. Optimization of cubic polynomial joint trajectories and sliding mode controllers for robots using evolution strategy[C]// Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. Piscataway: IEEE, 1997, 1444-1447.
- [20] ANGELES J, ALIVIZATOS A, ZSOMBOR-MURRAY P J. The synthesis of smooth trajectories for pick-and-place operations[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 173-178.
- [21] SINGH S, CANNON H. Multi-resolution planning for earthmoving[C]// 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 1998, 121-126.
- [22] 朱世强, 刘松国, 王宣银, 等. 机械手时间最优脉动连续轨迹规划算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 47-52.
ZHU Shiqiang, LIU Songguo, WANG Xuanyin, et al. Time-optimal and jerk-continuous trajectory planning algorithm for manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 47-52.
- [23] ZHANG B, WANG S, LIU Y, et al. Research on trajectory planning and autodig of hydraulic excavator[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-10.
- [24] 翁文文, 殷晨波, 冯浩, 等. 挖掘机器人自主挖掘轨迹规划方法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(2): 5-9.
WENG Wenwen, YIN Chenbo, FENG Hao, et al. Autonomous mining trajectory planning method for mining robot[J]. Machine Design and Research, 2018, 34(2): 5-9.
- [25] NAGY A, VAJK I. Nonconvex time-optimal trajectory planning for robot manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME, 2019, 141(11): 111007.
- [26] 孙志毅, 张韵悦, 李虹, 等. 挖掘机的最优时间轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 166-174.
SUN Zhiyi, ZHANG Yunyue, LI Hong, et al. Time optimal trajectory planning of excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 166-174.
- [27] YOO S, PARK C, YOO S, et al. A dynamics-based optimal trajectory generation for controlling an automated excavator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering

- Science, 2010, 224(10): 2109-2119.
- [28] STAVROPOULOU M, XIROUDAKIS G, EXADAKTYLOS G. Analytical model for estimation of digging forces and specific energy of cable shovel[J]. Coupled Systems Mechanics, 2013, 2(1): 23-51.
- [29] WANG X B, SUN W, LI E Y, et al. Energy-minimum optimization of the intelligent excavating process for large cable shovel through trajectory planning[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(5): 2219-2237.
- [30] KIM Y B, HA J, KANG H, et al. Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators[J]. Automation in Construction, 2013, 35: 568-578.
- [31] ZOU Z, CHEN J, PANG X. Task space-based dynamic trajectory planning for digging process of a hydraulic excavator with the integration of soil-bucket interaction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2019, 233(3): 598-616.
- [32] GAO Y J, JIN Y C, ZHANG Q. Motion planning based coordinated control for hydraulic excavators[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1): 97-101.
- [33] ZWEIRI Y H, SENEVIRATNE L D, ALTHOEFER K. Modelling and control of an unmanned excavator vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2003, 217(14): 259-274.
- [34] FENG H, YIN C B, WENG W W, et al. Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105: 153-168.
- [35] HA Q P, NGUYEN Q H, RYE D C, et al. Fuzzy sliding-mode controllers with applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(1): 38-46.
- [36] 张金萍, 刘阔, 林剑峰, 等. 挖掘机的 4 自由度自适应模糊滑模控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 87-92. ZHANG, Jinping, LIU Kuo, LIN Jianfeng, et al. 4-DOF adaptive fuzzy sliding mode control of excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 87-92.
- [37] BU F, YAO B. Observer based coordinated adaptive robust control of robot manipulators driven by single-rod hydraulic actuators[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2000: 3034-3039.
- [38] HE Q H, ZHANG D Q, HAO P, et al. Modeling and control of hydraulic excavator's arm[J]. Journal of Central South University, 2006, 13(4): 422-427.
- [39] CHANG P H, LEE S J. A straight-line motion tracking control of hydraulic excavator system[J]. Mechatronics, 2002, 12(1): 119-138.
- [40] KIM J, JIN M, CHOI W, et al. Discrete time delay control for hydraulic excavator motion control with terminal sliding mode control[J]. Mechatronics, 2019, 60: 15-25.
- [41] PARK J, CHO D, KIM S, et al. Utilizing online learning based on echo-state networks for the control of a hydraulic excavator[J]. Mechatronics, 2014, 24(8): 986-1000.
- [42] LE H D, AHN K K, KHA N B, et al. Trajectory control of electro-hydraulic excavator using fuzzy self tuning algorithm with neural network[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1): 149-160.
- [43] CAI G, TONG Z, XING Z. Modelling of electro-hydraulic system using RBF neural networks and genetic algorithm[J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4):1-12.
- [44] KIM S, PARK J, KANG S, et al. A robust control approach for hydraulic excavators using μ -synthesis[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(4): 1615-1628.
- [45] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1981, 103(2): 126-133.
- [46] VÄHÄ P K, SKIBNIEWSKI M J. Cognitive force control of excavators[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1993, 6(2): 159-166.
- [47] NGUYEN Q H, HA Q P, RYE D C, et al. Force/position tracking for electrohydraulic systems of a robotic excavator[C]// Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Computer Society, 2000: 5224-5229.
- [48] PARK H, LEE S, CHU B, et al. Obstacle avoidance for robotic excavators using a recurrent neural network[C]// 2008 International Conference on Smart Manufacturing Application. Piscataway: IEEE, 2008: 583-588.
- [49] KIM S K, SEO J, RUSSELL J S. Intelligent navigation strategies for an automated earthwork system[J]. Automation in Construction, 2012, 21: 132-147.
- [50] 朱建新, 罗刚, 汪志杰, 等. 基于激光雷达的挖掘机器人回转避障研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(9): 41-44. ZHU Jianxin, LUO Gang, WANG Zhijie, et al. Study on

- obstacle avoidance of excavator robot rotating based on laser radar[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(9): 41-44.
- [51] QUANG H A, SANTOS, MIGUEL, et al. Robotic excavation in construction automation[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2002, 9(1): 20-28.
- [52] SEO J, LEE S, KIM J, et al. Task planner design for an automated excavation system[J]. *Automation in Construction*, 2011, 20(7): 954-966.
- [53] YAMAMOTO H, MOTEKI M, SHAO H, et al. Development of the autonomous hydraulic excavator prototype using 3D information for motion planning and control[J]. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 2012, 48(8): 488-497.
- [54] GU J, MA X D, NI J F, et al. Linear and nonlinear control of a robotic excavator[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(7): 1823-1831.
- [55] 牛大伟. 基于 MEMS 传感器的挖掘机姿态检测系统的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2015.
- NIU Dawei. The research of the excavator attitude detection system based on MEMS sensor[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2015.
- [56] YUAN C X, LI S, CAI H B. Vision-based excavator detection and tracking using hybrid kinematic shapes and key nodes[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 31(1): 04016038.
- [57] XU J, YOON H S. Vision-based estimation of excavator manipulator pose for automated grading control[J]. *Automation in Construction*, 2019, 98: 122-131.
- [58] LIANG C J, LUNDEEN K M, MCGEE W, et al. A vision-based marker-less pose estimation system for articulated construction robots[J]. *Automation in Construction*, 2019, 104: 80-94.
- [59] 王海波, 邹海龙, 张如照. 基于视觉测量的挖掘机工作装置姿态测量系统[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 302-308.
- WANG Haibo, ZOU Hailong, ZHANG Ruzhao. Attitude measurement system for excavator's manipulator based on vision measurement[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 302-308.
- [60] 朱建新, 沈东羽, 吴钰. 基于激光点云的智能挖掘机目标识别[J]. *计算机工程*, 2017, 43(1): 297-302.
- ZHU Jianxin, SHEN Dongyu, WU Kang. Target recognition for intelligent excavator based on laser point cloud[J]. *Computer Engineering*, 2017, 43(1): 297-302.
- [61] YOO H S, KIM Y S. Development of a 3D local terrain modeling system of intelligent excavation robot[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 21(3): 565-578.
- [62] CHAE M, KIM J, JANG J, et al. 3D imaging system for the intelligent excavation system(IES)[C]// 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical Univ Press, 2008, 286-291.
- [63] CHAE M J, LEE G W, KIM J Y, et al. A 3D surface modeling system for intelligent excavation system[J]. *Automation in Construction*, 2011, 20(7): 808-817.
- [64] KOMATSU. 现况高精度测量[EB/OL]. [2019-07-08]. <http://smartconstruction.komatsu/introduction/index.html>. KOMATSU. High-precision measurement of site conditions[EB/OL]. [2019-07-08]. <http://smartConstruction.komatsu/introduction/index.html>.
- [65] 三一集团. 三一、华为巨头联手, 全球首台 5G 遥控挖掘机投入实用[EB/OL]. [2019-07-05]. <https://www.sanygroup.com/xwzx/6993.html>. SANY GROUP. Sany cooperates with Huawei to put the world's first 5G remote control excavator into practice[EB/OL]. [2019-07-05]. <https://www.sanygroup.com/xwzx/6993.html>.
- [66] LE Q H, LEE J W, YANG S Y. Remote control of excavator using head tracking and flexible monitoring method[J]. *Automation in Construction*, 2017, 81: 99-111.
- [67] KIM D, KIM J, LEE K, et al. Excavator tele-operation system using a human arm[J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(2): 173-182.
- [68] KIM D, OH K W, LEE C S, et al. Novel design of haptic devices for bilateral teleoperated excavators using the wave-variable method[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(2): 223-230.
- [69] NG F, HARDING J A, GLASS J. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 83: 176-193.
- [70] LEE Y B. A study of the life test of hydraulic pump driving gear box for the large excavator[J]. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 2015, 39(3): 211-216.
- [71] 冯萧. 基于 WiFi 和虚拟仪器的工程机械参数监测及故障诊断系统研究与开发[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
- FENG Xiao. Study of system of engineering machinery's parameters on-line monitoring and fault-diagnosing based

- on technology of WIFI and virtual instruments[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.
- [72] LI H, TIAN Z, YU H, et al. Fault prognosis of hydraulic pump based on bispectrum entropy and deep belief network[J]. Measurement Science Review, 2019, 19(5): 195-203.
- [73] HE X Y, HE Q H, XIE X H, et al. Fault diagnosis of excavator hydraulic system based on partial least squares regression[J]. Journal of Central South University, 2007, 38(6): 1152-1156.
- [74] HE X, HE Q. Application of PCA method and FCM clustering to the fault diagnosis of excavator's hydraulic system[C]// 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway: IEEE, 2007, 1635-1639.
- [75] HE Q H, HE X Y, ZHU J X. Fault detection of excavator's hydraulic system based on dynamic principal component analysis[J]. Journal of Central South University, 2008, 15(5): 700-705.
- [76] SHAO H, JIANG H, ZHAO H, et al. An enhancement deep feature fusion method for rotating machinery fault diagnosis[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 119: 200-220.
- [77] GUO X, CHEN L, SHEN C. Hierarchical adaptive deep convolution neural network and its application to bearing fault diagnosis[J]. Measurement, 2016, 93: 490-502.
- [78] JING L, WANG T, ZHAO M, et al. An adaptive multi-sensor data fusion method based on deep convolutional neural networks for fault diagnosis of planetary gearbox[J]. Sensors, 2017, 17(2): 414.

作者简介: 李运华(通信作者), 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为液压传动与控制, 车辆与工程机械, 网络化运动控制与操纵等。

E-mail: yhli@buaa.edu.cn

范茹军, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电液系统控制, 工程机械臂轨迹优化。

E-mail: rujun_fan@163.com

杨丽曼, 女, 1975 年出生, 副教授。主要研究方向为机电系统控制与健康管理。

E-mail: ylm@buaa.edu.cn