



堆取料机无人化系统 在散货港口的应用

赵德安, 余海波, 李洋洋

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对现有堆取料机无人化系统解决方案中存在的问题, 提出一种基于 3D 主动激光扫描技术的堆取料机无人化控制系统。3D 主动激光扫描技术可独立于堆取料机设备的运动状态, 主动感知周边作业环境。作业前和作业过程中通过激光扫描系统采集数据构建并实时更新作业对象料堆三维模型。构建基于三维模型分析作业控制策略决策算法系统, 实现堆取料机的无人化全自动控制。同时构建人机友好的可视化交互系统。此系统成功用于大型煤炭港口的储煤料场, 通过系统应用有效降低人力成本, 改善操作人员工作环境, 提高设备作业过程的安全可靠性, 提升堆取作业效率和料场利用率, 技术和经济效益显著。

关键词: 堆取料机; 无人化系统; 3D 主动扫描; 三维模型; 散货港口

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0310-06

Stacker-reclaimer unmanned control system applied in bulk cargo port

ZHAO De-an, SHE Hai-bo, LI Yang-yang

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In view of the problems existing in the current solutions of the stacker-reclaimer unmanned control system, this paper proposes a stacker-reclaimer unmanned control system based on 3D active laser scanning technology. The 3D active laser scanning technology can be independent of the movement of the stacker-reclaimer and actively perceive the surrounding operation environment. The three-dimensional material pile model is generated and updated based on the data collected by the laser scanning system before and during operation. The control decision algorithm system generates the related operation strategy based on the shape analysis of the three-dimensional model, and completes the automatic unmanned control of the stacker-reclaimer. Meanwhile, a human-machine friendly visual interactive system is constructed, which has been successfully applied to the coal stockyard of a large coal port, and achieved remarkable technological and economic benefits through effectively reducing the labor costs, improving the operators' working environment, improving the equipment operation safety and reliability, improving the working efficiency and utilization rate of the stockyard.

Keywords: stacker-reclaimer; unmanned system; 3D active scanning; 3D model; bulk cargo port

散货港口作为散料货物的运输和中转中心, 通常采用堆取料机进行货物的堆料和取料作业。堆取料机的控制通常采用机上人工操作, 通过机

上配备 PLC 实现自动化作业, 需要配备多名操作人员轮流倒班作业, 人力成本较高; 现场粉尘浓度大, 作业环境恶劣; 且由于人员操作不规范、

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 赵德安(1988—), 男, 工程师, 研究方向为散货港口重型起重设备自动控制技术。

注意力不集中导致的误操作等也会影响作业效率和设备寿命。如何降低人工成本、最大限度地改善工作环境、稳定生产率、提高信息化程度等成为散货港口面临的问题。

从技术角度出发，国内目前的无人化系统主要有 2 种解决方案：1) 基于体积预估计算建模。该方式的主要问题在于堆形建模精度波动大、堆形无法实时感知、无法避免人工手动操作介入、特殊工况下无法自动作业等，不适用于物料复杂多变的料场和作业工艺复杂需求。2) 基于 2D 激光扫描机器视觉建模。该方式获取地形需要结合大臂的运动来实现，需要进行专门的扫描作业，且扫描效率很低，可能需要多次扫描才能获得完整的地形；激光扫描设备安装在臂架前段，震动剧烈，粉尘浓度大，建模精度无法保证；堆形在作业过程中无法实时感知，需要作业完成后进行专门的扫描建模；受建模误差等影响，无法避免手动人工介入。本文介绍基于 3D 主动激光扫描技术的堆取料机无人化控制系统在散货港口的成功应用^[1]。

1 系统概述

该系统采用 3D 主动激光扫描仪结合高精度的 RTK-GNSS 定位系统实时建模，通过激光扫描系统采集点云数据，通过图形处理算法实现作业对象地形三维模型构建，并随同作业过程实时更新。以料场精确的三维数据为基础，采用智能化堆取料控制算法，结合作业指令和工艺，自动生成堆取料机的作业和控制指令，自动完成堆取料机的无人化全自动控制。系统同时还构建了直观的符合工业人机工程学的可视化交互系统，操作人员可在中控室内实现对多台堆取料机设备的过程监测和管理。

2 系统组成与主要功能

2.1 系统架构

3D 无人化控制系统的硬件系统主要由 3D 激光扫描仪、堆取料机 RTK-GNSS 高精度定位系统、图形处理和智能化控制服务器、单机 PLC 控制系统、臂架防碰撞系统、数据存储系统、可视化人机交互系统等子系统和设备构成。

3D 激光扫描仪利用飞行时间测距原理计算出料堆表面参照与激光扫描仪的距离和角度，再由图形处理服务器结合堆取料机高精度定位系统通过坐标变换、数据滤波等一系列图像处理算法，进行料堆表面网格的三维空间坐标计算，实现料堆的三维建模。3D 扫描仪的扫描范围水平最大可达 360°，垂直方向 110°，可实现独立于堆取料机设备的运动状态，主动感知和检测周边作业环境。扫描距离超过 100 m，平均精度可到 5 mm。

北斗 RTK-GNSS 高精度定位系统，利用差分数据补偿原理，可获得高精度定位数据，平面 ±10 mm，高程 ±15 mm，并能够支持更新频率最高可达 20 Hz。此高精度定位系统是处理扫描点云数据，并将其转化为准确料堆模型的必要基础。

2.2 系统组成

3D 无人化控制系统按照架构主要为中控及斗轮堆取料机机上 2 个组成部分(图 1)。其中，中控部分主要包括三维地形模型的存储服务器、地形可视化终端计算机、人机交互界面控制计算机以及 RTK-GNSS 定位系统基站；机上部分主要包括三维激光扫描仪、TRK-GNSS 定位系统流动站、臂架防碰撞系统、大机急停安全系统、PLC 控制系统以及智能控制计算机。

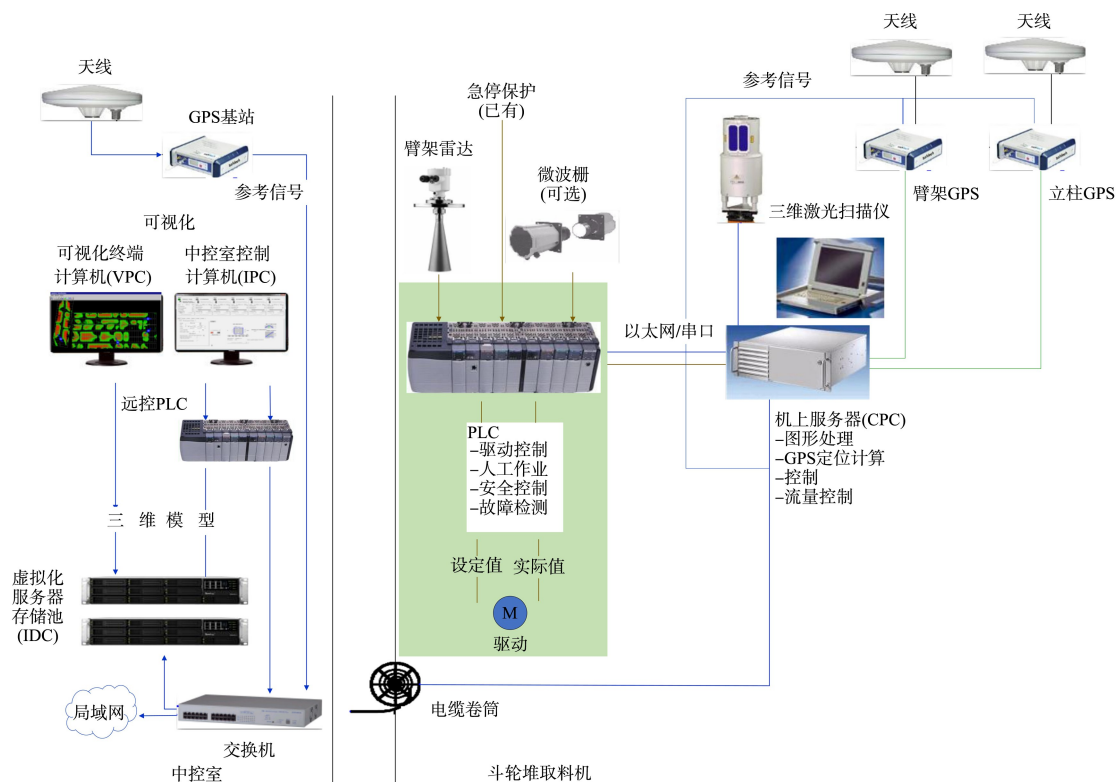


图 1 无人化控制系统架构

3 关键技术

3.1 料堆的三维主动扫描

根据 3D 激光扫描仪的特性,在每台堆取料机顶部安装 1 台三维激光扫描仪。安装位置远离作业时粉尘密集区和震动剧烈区,同时保证扫描仪能够获得良好的视野范围,充分利用 3D 主动扫描的特性,提高扫描数据的准确性,减少扫描盲区,加强扫描的实时性,扩大视觉的检测范围,提高扫描效率。相比 2D 技术需要人工控制臂架和走行在料堆上方来回移动的方式更新扫描地形,3D 技术只需要在安全的归零状态位置移动走行即可更新扫描地形,单次动作能够更新的区域面积更大;相比于 2D 方案,3D 方案主动扫描的动作策略更安全、扫描效率更高、扫描效果更好、扫描盲区减少。扫描仪安装位置和扫描效果如图 2 所示。

堆取料机顶部安装的三维激光扫描仪可以在走行的过程中扫描到设备周边的地形，通过扫描获取堆料表面至扫描仪的距离，通过扫描仪获取的点云数据构建料堆的轮廓数据。

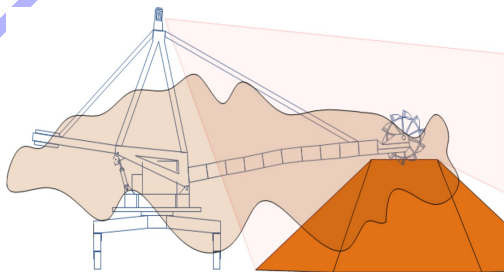


图2 3D扫描仪安装扫描

3.2 高精度定位系统解算

系统采用北斗 RTK-GNSS 进行堆取料机的定位计算, 在地面固定位置安装差分基准站, 在堆取料机上安装流动站, 基站通过网络将差分数据发送给机载流动站, 由机载流动站进行差分补偿计算得到堆取料机高精度的定位位置数据。

基准站在投入使用前须进行绝对坐标的标定, 获得当前安装位置全球坐标系下的真实坐标。在日常作业过程中由于存在轨道误差、时钟误差、SA(降低单点精度)影响、大气影响、多径效应以及其他误差, 基准站接收机解算出的实时坐标将与标定的基准坐标存在差分值。基准站利用数

据链将此差分改正数据发送给机载流动站, 并且对其解算的流动站坐标进行改正, 解算得出厘米级的流动站位置坐标^[2]。在堆料料机上安装 2 个流动站, 通过 2 个流动站的位置进一步解算出堆取料机的走行、回转、俯仰的位置姿态。

基站采用热冗余设置, 双基站同时接入, 确保系统的整体稳定性。数据更新频率达到 20 Hz,

充分覆盖斗轮堆取料机位姿变化的频率, 保证设备震动等情况均能实时监测到。目前我国的北斗定位系统已经全部部署完毕, 能够充分保证全天候状态下, 所需解算的北斗星数满足要求(大于4 颗星即可, 通常为 15~20 颗星)。港口应用现场的 RTK-GNSS 定位解算系统界面如图 3 所示。

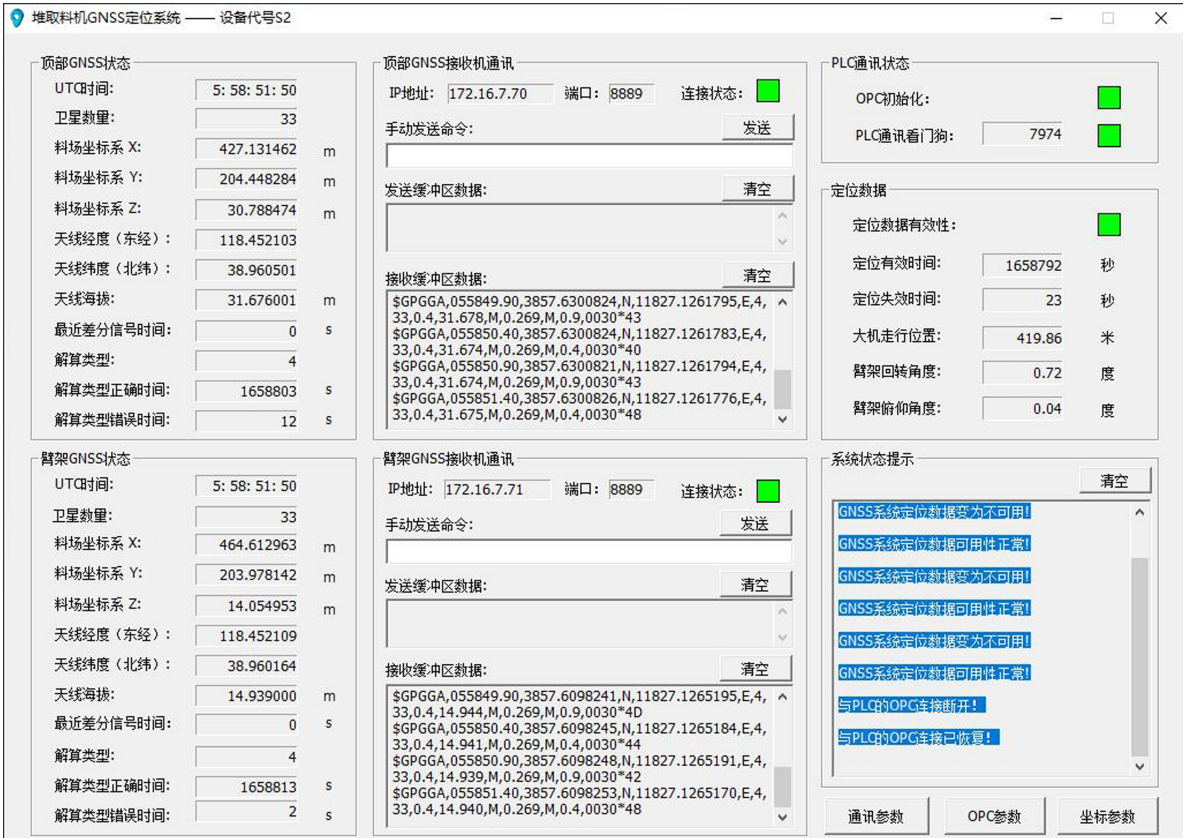


图 3 堆取料机 GNSS 定位系统解算软件画面

3.3 三维建模和料场可视化

通过三维扫描数据和高精度定位数据的拟合解算, 得到料堆表面的点云数据以及实时的堆取料机的位置姿态。结合这两点, 利用堆取料机定位系统提供的位置和姿态数据, 将三维坐标转换成为以料场固定参考点为坐标系零点的绝对坐标, 将料堆表面的以扫描仪为中心的点云数据转化为料场的绝对坐标下的料堆点云。通过对料堆点云的滤波采用简化筛选等预处理方法及网格化的方式来构建料堆的三维模型^[3-4]。

每台堆取料机都通过 3D 激光扫描仪获取周

边的地形, 通过网络将地形数据传输到中控的图形拼接处理服务器上, 并在服务器中对整个料场坐标系下不同设备获取的地形进行拼接和融合, 从而形成整个料场的实时可视化地形, 并在可视化软件中显示堆取料机的位置姿态, 便于调度和操作人员对整个料场进行管理和作为指导生产作业的重要依据。同时, 采用国际上对于地理地貌通用的 2.5D 的方式进行可视化界面显示, 即通过俯视图显示整个料场的地形和位置姿态, 用不同颜色显示地形地貌的高度变化, 颜色越深表示高度值越大。散货码头现场的料堆地形可视化软件如图 4 所示。

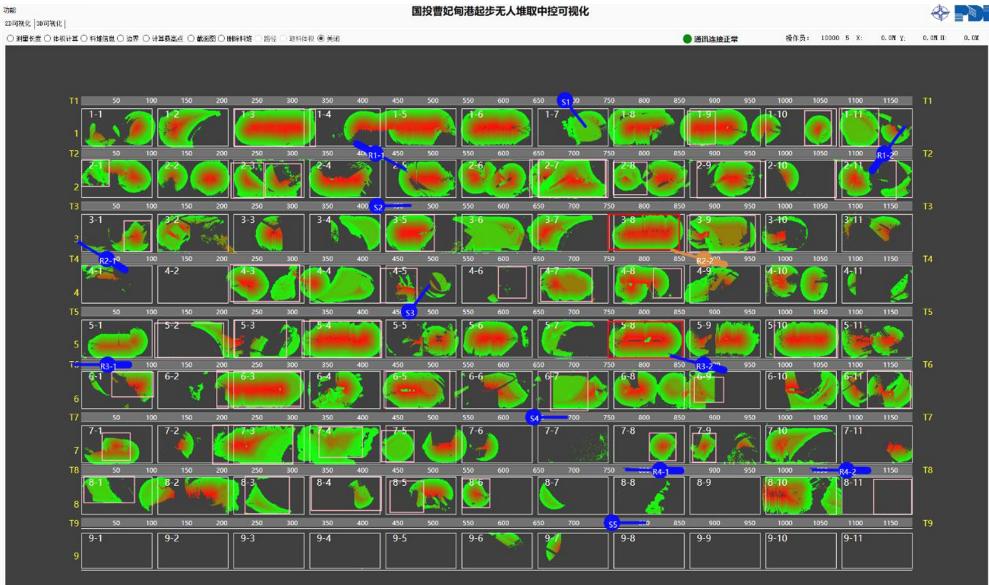


图 4 料场地形可视化软件

3.4 智能化堆取料控制策略

依据高精度 3D 扫描构建的三维模型是指导自动化作业的重要依据，根据设定好的策略控制库来实现自动作业过程中进行合理、安全的控制和指令的自动生成。

在堆料过程中，最主要的是能够准确找到自动堆料的起堆点。无论是新堆还是补堆，智能化系统通过对作业区域已有地形的分析，构建一个虚拟成堆对象空间的形状模型，通过模型分析堆料路径上的起始堆料点。通过分析出的起堆点位置，自动生成作业指令控制设备运动到该起堆点作业区域来确定规划区域和路径。最终生成整个堆料作业的完整控制策略，实现料堆的规整化，有利于提高后续料堆的取料效率^[5]。

在取料过程中，最主要的是找到第 1 次开边的取料位置。智能化系统通过对已有地形的三维模型分析，根据取料工艺的不同，采用斗轮轨迹相切边原则进行开边操作。通过对三维料堆虚拟模型的取料路径分析计算，得到合适的斗轮运行轨迹与料堆取料层的相切位置，根据计算出的位置自动生成控制指令以控制堆取料机运动到该开边位置点。后续自动分析不同料层宽度的变化和取料到边的识别策略。根据当前整体料堆的高度，

自动调整取料的层高，保证每层的取料流量处于合理范围，减少底层料的残余量。最终通过一系列完整过程的控制策略实现自动取料连续过程，直到完成取料作业(图 5)。

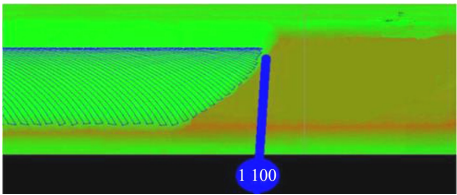


图 5 智能化堆料补堆路径规划

3.5 取料流量控制

堆取料机的取料流量控制是衡量自动化作业控制系统控制能力的一个重要指标。无人化系统在堆取料作业过程中会根据取料流量进行实时动态的调整控制。依据液压系统的有功作为取料流量的有效转换值，将此有功作为控制对象，以设备设定目标取料流量作为控制指标，采用双 PID 控制实现取料流量精确控制，满足各种不同需求的取料要求。通过地形识别预测料堆中的空隙，自动提高回转速度，快速越过空隙区域，提高取料效率。使流量控制精度在±10%的偏差范围内。

3.6 安全防碰撞策略

堆取料机设备与设备间的防碰撞是基于堆取

料机高精度 RTK-GNSS 定位系统实时获取堆取料机的位置信息和姿态, 通过空间位置实时计算空间 2 条线的最近距离, 通过分析计算多个姿态下 2 点的距离关系取最小值。同时, 对堆取料机的运动轨迹进行预测计算, 实现堆取料机之间的两级防碰撞策略, 包含报警减速区和停机区。减少对作业的影响, 提高安全等级^[6]。

堆取料机臂架与料堆的防碰撞则是在臂架两侧配备微波栅和超声波, 微波栅检测距离可达 100 m, 能够有效覆盖保护臂架整个长度, 超声波的有效检测距离可到 10 m, 充分满足臂架靠近料堆时能够形成减速和停止两级保护区域。当臂架靠近料堆时, 可以根据情况发出两级保护信号, 由 PLC 系统控制后续保护动作。采用的是非接触式测距方式, 避免了常规接触式传感器易损坏、可靠性低等缺点, 实现系统的可靠工作。

通过以上两层防碰撞系统保护, 实现堆取料机之间、堆取料机与料堆之间的综合安全防碰撞保护(图 6)。

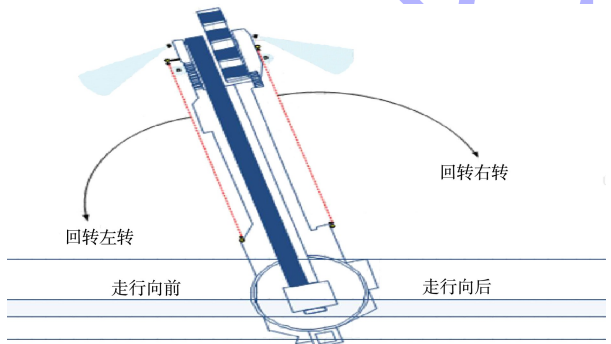


图 6 臂架防碰撞系统

4 结论

1) 基于 3D 的主动扫描技术实现高效率的料堆地形更新, 为堆取料机的运动控制提供实时的料堆地形数据基础, 为构建料堆三维模型提供数据精度更高、实时性更好的基础扫描数据。

2) 通过对高精度的 GNSS 定位系统的实时数

据解算, 能够得到高精度、实时性好、可靠性高的定位数据, 相对于编码器定位系统, GNSS 定位系统性能显著提升。结合 3D 扫描地形数据, 能够构建精度±5 cm 以内的、充分满足要求的三维地形模型, 并以可视的方式呈现。

3) 基于高精度的料堆地形三维模型, 实现智能化的堆取料机控制策略和设备的智能化自动控制, 提高设备的安全性。能够改善劳动环境、降低劳动强度、大幅提高整体生产的稳定性。实现稳定的取料流量控制, 提高取料的效率, 提升配煤的精度。

4) 通过对于堆取料机臂架的防碰撞保护和对设备间的空间碰撞保护, 提高设备作业的安全性, 减少人为因素的影响。

5) 该系统成功应用于大型散货港口, 有效改善劳动环境, 降低劳动强度, 减少人力成本, 提高生产的稳定性, 并为港口提供更好的安全保障。

参考文献:

[1] 吕明荟, 李毅民. 斗轮堆取料机的发展趋势[J]. 港口装卸, 2008(2): 6-9.

[2] 廖华, 冯威, 黄丁发. 中央差分定位系统的设计与实现[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(5): 764-769.

[3] DOUILLARD B, UNDERWOOD J, KUNTZ N. On the Segmentation of 3D LIADR Point Clouds[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Shanghai: IEEE, 2011: 2798-2805.

[4] 路兴昌, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于激光扫描数据的三维可视化建模[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1624-1629.

[5] 李晨. 斗轮堆取料机生产能力提升技术改造探讨[J]. 科技创新与应用, 2018(34): 145-146.

[6] 塔怀锁, 吴翠兰. 空间两条异面直线最短距离的讨论[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2010, 9(2): 92-94.

(本文编辑 郭雪珍)